

# 作業環境有害物即時監測運算 及驗證研究

.....  
**A Study of Real-Time Monitoring and Verification of  
Hazardous Materials in the Working Environment**





作業環境有害物即時監測運算  
及驗證研究

**A Study of Real-Time Monitoring and  
Verification of Hazardous Materials in  
the Working Environment**

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

# 作業環境有害物即時監測運算 及驗證研究

## **A Study of Real-Time Monitoring and Verification of Hazardous Materials in the Working Environment**

研究主持人：鄭乃云、王琳麒

研究主辦單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

研究期間：中華民國 107 年 6 月 12 日至 107 年 12 月 31 日

**\*\*本研究報告公開予各單位參考\***  
惟不代表勞動部政策立場

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

中華民國 108 年 6 月

# 摘要

近年來科技日新月異，各產業使用之化學品數量及種類劇增，勞工作業環境中面對多種化學性有害物，為能及時偵測作業場所之化學性暴露危害，並立即掌握暴露實態，本研究運用智慧感測裝置獲得廠區或作業現場勞工各化學物質之即時暴露濃度，另應用聯網技術收集監測資料，可直接由攜帶式或定點式之感測裝置將數據上傳雲端，以進行後續巨量資料之運算、分析之用。

本研究主要完成氣體感測模組及系統規格優化、實際場域驗證、市場效益推廣、法規研討評估等四大執行面向，成果包括：(1) 感測器優化調整，以降低感測化合物物性相近之干擾、(2) 感測裝置送至防爆規格之認證中心進行認證，以符合場域需求、(3) 本研究同時設計有監測資訊專用 APP，可隨時掌握氣體暴露實態、風險等級及緊急警報訊息、(4) 完成氣體智慧感測系統後端監控平台設計，並完成資安檢測、資料儲存與查詢功能及使用手冊，勞工或管理人員可於平台查看危害氣體及實資料紀錄、查詢歷史資料以及警訊推播通知、(5) 完成感測裝置於 4 種不同場域進行實際場域驗證，並依場域驗證成果進行產品效益分析、(6) 為推廣國內職場有害物智慧監測技術，本研究共舉辦 2 場次教育訓練及 2 場次技術推廣說明會，以增進職場危害智慧監測技術相關人才之培訓與技術運用。

最後本研究亦從法規層面、執行場域監測之難易與成效、監測之代表性、監測成本分析及行政措施等五大面向，強調本研究發展之智慧感測裝置與系統之優勢，作為產業推廣應用之說帖。另本研究亦對技術開發成本進行分析，未來透過專利申請與技術移轉，研究成果將可運用於作業環境有害物監控及事故之預防，促進國內運用智慧科技進行職場安全衛生管理之能力，同時有助於提升事業單位掌握職場化學性危害的暴露實態與制定防護策略之效率及效果，達成建立智慧安全職場及有效降低職業傷病發生率之願景。

關鍵詞：感測裝置、職場有害物、智慧監測系統、物聯網

# Abstract

In recent years, science and technology are changing with each passing day. The number and types of chemicals used in various industries have increased dramatically. In the labor environment, a wide selection of chemical hazards are encountered. In order to detect the chemical exposure hazards in the workplace and to immediately grasp the exposure, this study uses the smart sensing device to obtain the instantaneous exposure concentration of the chemical substances in the factory or on-site workers, and network technology is used to collect the monitoring data. In addition, the data can be directly uploaded to the cloud by the portable or fixed-point sensing device for the subsequent calculation and analysis of huge amount of data.

This research mainly completes four implementation aspects of gas sensing module and system specification optimization, actual field verification, market benefit promotion, and regulatory research evaluation. The results include: (1) Sensor optimization adjustment to reduce the physical properties of sensing compounds of similar interference, (2) The sensing device is sent to the certification center of the explosion-proof specification for certification to meet the field requirements, (3) Monitoring information-specific APP is designed at the same time, and the gas exposure state and risk level can be known at any time, and providing emergency alerting messages, (4) Completing the design of the back-end monitoring platform of the gas smart sensing system, and complete the security testing, data storage and query functions and manuals. Workers or management personnel can view hazardous gas and actual data records and inquiries on the platform with historical data and warning notices, (5) Completion of the sensing device for actual field verification in five different fields, and product benefit analysis based on field verification results, (6) Promotion of domestic workplace hazardous material intelligence monitoring technology. This study has conducted 2 sessions of education training and 2 sessions of technical promotion briefings to enhance the workplace hazard training of talents related to smart monitoring technology and the use of technology.

Finally, the research also emphasizes different regulatory levels, the difficulty and effectiveness of field monitoring, the representativeness of monitoring, the monitoring cost analysis and administrative measures, while emphasizing the advantages of the smart sensing device and system developed in this research. In addition, this study also analyzes the cost of

technology development. In the future, through patent application and technology transfer, the research results will be applied to the monitoring of hazardous substances in the operating environment and the prevention of accidents and promote the domestic use of smart technology for workplace safety and health management. It will help improve the efficiency and effectiveness of the exposure of the institutions of workplace chemical hazards and the development of protective strategies, achieve the vision of establishing a smart and safe workplace, and effectively reducing the incidence of occupational injuries.

Keywords: Sensor, Occupational Hazard Pollutants, Smart Monitor System, and Internet of Things (IoT)

# 目 次

摘 要.....	i
Abstract .....	ii
目 次.....	iv
圖目次.....	vi
表目次.....	viii
第一章 前言.....	1
第一節 研究背景.....	1
第二節 研究目的.....	3
第二章 文獻探討.....	4
第一節 石化業產業現況及危害分析.....	4
第二節 職業安全衛生與物聯網應用.....	7
第三節 作業環境有害物暴露危害.....	10
第三章 研究方法.....	12
第一節 研究架構.....	12
第二節 研究項目.....	13
第三節 驗證場域.....	14
第四節 平行比對規劃.....	17
第四章 研究結果.....	20
第一節 感測裝置產品化建置.....	20
第二節 實際場域驗證.....	29
第三節 職場環境監測系統模組建置.....	41
第四節 產品效益分析與初步推廣.....	53
第五節 成本效益分析.....	78
第六節 現行法規探討及影響評估.....	82
第五章 結論與建議.....	100
第一節 結論.....	100
第二節 建議.....	102

誌謝 .....	106
參考文獻 .....	107
附錄 1 感測器優化及驗證方法 .....	110
附錄 2 氣體感測裝置使用說明 .....	180
附錄 3 通訊協定 .....	197

# 圖目次

圖 1 IBM 的 Employee Wellness and Safety 解決方案示意.....	9
圖 2 人體位置追蹤與定位系統示意圖.....	9
圖 3 研究執行架構圖.....	12
圖 4 個人採樣器配戴示意圖.....	18
圖 5 Alphasense 與 MS1100 感測元件外觀比較.....	21
圖 6 區域定點式感測裝置外殼外觀.....	22
圖 7 穿戴式感測裝置及人員背帶.....	23
圖 8 穿戴式感測裝置外觀.....	23
圖 9 記憶卡模組示意圖.....	25
圖 10 感測器數據顯示.....	26
圖 11 警示與警示上限值超標事件示警處理邏輯示意圖.....	27
圖 12 警示與警示上限值超標事件示警處理介面圖示.....	28
圖 13 感測器資料獲取率示意圖.....	29
圖 14 TVOCs 感測裝置與 PID 之相關性.....	30
圖 15 TVOCs 感測裝置與傳統採樣之相關性.....	31
圖 16 配戴式感測器與個人傳統採樣 TVOCs(ppm)之相關.....	32
圖 17 配戴式感測器與個人傳統採樣異丙醇(IPA)(ppm)之相關.....	32
圖 18 配戴式感測器與個人傳統採樣苯(Benzene)(ppm)之相關.....	32
圖 19 定點式感測器與區域傳統採樣 TVOCs(ppm)之相關.....	33
圖 20 定點式感測器與區域傳統採樣異丙醇(IPA) (ppm)之相關.....	33
圖 21 定點式感測器與區域傳統採樣苯(Benzene)(ppm)之相關.....	33
圖 22 各樓層 PM <sub>2.5</sub> 以感測器連續七天監測之濃度分佈圖.....	34
圖 23 不同採樣點以感測器連續七天監測氧氣之濃度分佈圖.....	35
圖 24 運用感測模組監測不同天氣氣濃度變化.....	36
圖 25 採樣點擺放位置.....	36
圖 26 感測器及直讀式儀器連續性採樣結果相關性.....	37
圖 27 Day 1 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖.....	38
圖 28 Day 2 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖.....	39
圖 29 Day 3 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖.....	39
圖 30 Day 4 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖.....	40

圖 31 Day 5 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖 .....	40
圖 32 感測資料傳輸及雲端系統設計架構 .....	41
圖 33 感測點(站)各時間表之資料獲取率例圖 .....	42
圖 34 感測點(站)歷史資料檢視示意表圖 .....	43
圖 35 日報表資料檢視示意表圖 .....	43
圖 36 趨勢圖表資料檢視示意圖 .....	44
圖 37 即時監測數據展示示意圖 .....	45
圖 38 感測點建物樓層平面圖顯示 .....	46
圖 39 職場有害物即時監控系統首頁 .....	47
圖 40 職場有害物即時監控系統智慧感測數據顯示 .....	47
圖 41 職場有害物即時監控系統監測資訊 .....	48
圖 42 職場有害物即時監控系統顯示頁面 .....	49
圖 43 職場有害物即時監控系統警報功能操作說明 .....	50
圖 44 根據不同場域客製化感測器分布圖 .....	51
圖 45 勞研所最新消息公布欄 .....	52
圖 46 風險評估 APP 計算示意圖 .....	70
圖 47 教育訓練課程用感測產品宣傳單張 .....	74
圖 48 樹谷職訓中心教育訓練現場狀況-1 .....	75
圖 49 樹谷職訓中心教育訓練現場狀況-2 .....	75
圖 50 中正高雄職訓中心教育訓練現場狀況 .....	76
圖 51 楠梓加工出口區技術推廣說明會現場狀況 .....	76
圖 52 新市樹谷職訓中心技術推廣說明會現場狀況 .....	77
圖 53 裝置認證及品保體系示意流程 .....	96
圖 54 感測裝置認證制度流程設計 .....	98

# 表目次

表 1 我國石化產業產值與現況 .....	4
表 2 我國石化產業產值與代表性廠商 .....	5
表 3 感測裝置產品化建置種類一覽 .....	15
表 4 美國感測器指南 (Air Sensor Guidebook) 對感測器分級描述 .....	17
表 5 感測裝置分析性能比較 .....	20
表 6 區域定點式與電源供應模組規格說明 .....	24
表 7 感測裝置防爆測試考量項目說明 .....	26
表 8 裝置 IOS-P5CD 規格型號表型式與對應模組規格 .....	56
表 9 裝置 IOS-P5AM 規格型號表型式與對應模組規格 .....	58
表 10 裝置 IOS-P5BM 規格型號表型式與對應模組規格 .....	61
表 11 裝置 IOS-P5BM2 規格型號表型式與對應模組規格 .....	63
表 12 裝置 IOS-P5AM 規格型號表型式與對應模組規格 .....	67
表 13 相似暴露族群暴露實態等級劃分 .....	69
表 14 危害物毒性分級 (AIHA 之分級標準) .....	69
表 15 潛在健康風險矩陣示意 .....	69
表 16 危害物毒性分級 .....	70
表 17 感測裝置(SWOT)分析 .....	72
表 18 研發感測裝置與粉塵直讀式儀器比較表 .....	78
表 19 粉塵作業場域執實廠驗證執行成本比較表 .....	79
表 20 各類型直讀式儀器與感測器比較表 .....	80
表 21 感測裝置產品表-1 .....	81
表 22 感測裝置產品表-2 .....	82
表 23 與感測裝置之設計、設置、與測試相關之標準 .....	84
表 24 可參考使用之直讀式儀器與其可測量之物質及場域之應用 .....	89
表 25 職業安全衛生相關辦法針對環境濃度監測與測定之相關規範 .....	92
表 26 職業安全衛生相關辦法針對勞工健康危害之評估之相關規範 .....	93
表 27 即時感測裝置納入法規之可適性 .....	95
表 28 感測裝置精密度與誤差建議 .....	97

# 第一章 前言

## 第一節 研究背景

國際間工業發展迅速，各產業使用之化學品數量及種類劇增，危害化學品數量龐大，職業暴露限值(OELs)建置速度不及，且超出各國政府及廠商的能力範圍，因此必須發展一套健全之化學品管理系統，有效掌握化學品暴露危害問題；國內工作場所化學品標示約有 19000 多種，其中，有訂定作業容許濃度的有 491 種，而公告作業環境監測分析方法有 90 種，這些管制措施是否能保障勞工安全仍有待檢視。勞工於作業環境中面對多種有害物，包含化學性、物理性、安全性等暴露危害因子。

目前我國職業安全衛生仍有待改進之處，我國尚欠缺完整之職業暴露資料庫，依據勞工作業環境監測實施辦法對於化學性有害物之監測頻率多為 3 個月、6 個月或 1 年，無法即時掌握作業環境中有害物暴露實態。再者，對於作業環境空氣中有害物之暴露危害調查，傳統作業環境之採樣及分析方法需耗費大量人力及成本進行有害物濃度分析，企業考量高人力成本、高儀器成本及較長之分析時間，採樣點數在成本考量下，以及目前法規所訂之監測項目及頻率，無法有效及即時掌握職場中勞工危害子之暴露風險，達到預防職業病之效果。

現今國際間已逐漸出現應用智慧科技進行勞工職業安全衛生保護的方法，近年來穿戴式產品逐漸成熟，穿戴式具備了可以隨身監測而不干擾工作，可進行環境監與員工生物機能偵等制並以即時感知通訊，同時在嵌入感測器後，可進行環境監測與員工生物機能偵測，包括歐美各國皆試圖應用穿戴式科技來降低職安風險提高人身安全。工業型或整合型的感測器與結合它們的感測器網路，不管是在一般作業場所甚至危險作業場所，對於現地資訊的傳輸與整合發揮了極具有效率的功效，也協助了管理者對於即時應對策略的設計與規劃提供了更清楚的概況。

依據我國 106 年底職業傷病給付統計資料顯示，因與有害物接觸導致職業傷害(如鉛及其化合物、其他重金屬及其化合物、有機溶劑或化學物質氣體、職業性氣喘及過敏、礦工塵肺症及其併發症、矽肺症及其併發症、石綿肺症及其併發症、職業性皮膚病、職業相關癌症等)之件數共 20 件，105 年則為 28 件。顯示我國職場對於化學品管制監控仍有改善空間。

有鑑於石化產業為我國重要產業，且石化生產的原料大多具有易燃、易爆、有毒性、腐蝕性的危害性，且生產製程複雜，勞工於作業場所面臨較高之化學性暴露危害，因此本研究以石化廠為研究對象，建置石化業常見危害之感測裝置，並進行場域驗證。經濟部工業局（2015）指出國內產業如化學材料業（產品包括塑膠製品、化學製品、紡織品、橡膠製品、皮革毛皮及其製品、成衣及服飾品）對於石化業的需求極強，所以石化業安全與否，與國家競爭力憂戚相關，並且石化產業所造成的危害性，可能同時包括公共危險、環境污染、職業災害和產業的損失等。因此，各國為了避免危害的發生，紛紛擬定各種因應策略，例如美國職業安全衛生署 OSHA 發布製程安全管理規則 PSM( Process Safety Management )，要求石化業者實施自主性製程安全評估[3]，歐盟公布化學品事故預防指令（ Chemical Accidents: Seveso I, II and III ）-Prevention, Preparedness and Response87/216/EEC、壓力設備指令 97/23/EC Pressure Equipment[4]，英國發布重大事故危害管理原則 The Control of Major Accident Hazards Regulations[5]，日本經濟產業省制定高壓氣體保安法及石化工業區保安規則[6]等；至於我國則有經濟部主管的石油管理法、天然氣事業法、災害防救法和工廠管理輔導法，內政部主管的消防法、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、勞動部主管的職業安全衛生法、勞動檢查法、勞工作業環境監測實施辦法及高壓氣體勞工安全規則等。

雖然已有多項法令規範石化廠之作業安全，但仍不時有重大工安事件發生，本研究期望透過物聯網技術結合職場安全監測及控制，達到即時危害鑑別、警示及控制防護的效果。本研究已針對職場常見之有害物發展智慧感測系統，可偵測

項目包含：總揮發性有機化合物(TVOCs)、苯、氯氣、異丙醇及細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)，並透過實際場域驗證確認規格限制與實用性，據以修正為符合產業應用之產品。

## 第二節 研究目的

- 一、本研究透過資通訊與感測裝置之整合，建立一套可運用於職場作業環境有害物監測之無線氣體感測器，以獲得廠區或作業現場勞工各化學物質之即時暴露濃度，另應用聯網技術收集監測資料，進行後續巨量資料之運算、分析之用。
- 二、本研究建立之職場危害監測技術，透過實際場域驗證瞭解技術規格限制，並配戴於作業勞工身上，進行作業危害即時監測，在濃度過高時能於 APP 與後端平台同時發出警訊，以達到即時保護勞工作業安全的目的。
- 三、本研究透過教育訓練及技術推廣活動，強化職業安全衛生相關人員及作業勞工瞭解智慧科技在職場安全及危害監測之應用。
- 四、為使技術落實產業運用，本研究透過法規盤點與檢視，研擬智慧科技與物聯網技術導入職業安全衛生相關法規，以利技術擴大推廣及實場應用。

## 第二章 文獻探討

### 第一節 石化業產業現況及危害分析

石化產業是我國重要的支柱型產業，近年在全球區域資源產出發生重大變化的情形下，我國石化產業逐漸面臨原料與市場的重大變化，表 1 為我國石化產業產值與現況。我國石化產業產值與代表性廠商，其中石油化工原料製造業與合成樹脂及塑膠製造業以及合成橡膠製造業，以生產 PE、PP、SBR 等大宗石化產品為主，再將產品交由塑膠製品、橡膠製品與人造纖維製造業的廠家生產各式製品，彼此存在供應鏈的上下游關係。石油化工原料與合成樹脂及塑膠等產業產值達整體產業的九成，廠商數量少、產品營業額高、投資資本額大為其主要特色。國際石化廠商多為大資本額與營業額，我國廠商相對屬於中小企業；且多數國際廠商的生產線產品橫跨三個次產業，為由上游至下游均包辦生產的生產模式，表 2 為我國石化產業產值與代表性廠商。

表 1 我國石化產業產值與現況

單位：新台幣百萬元

次產業	2012	2013	2014	2015	2016	2017(e)
石油化工原料製造業	1,182,702	1,253,782	1,205,299	900,309	839,578	864,765
石油化工原料製造業	1,182,702	1,253,782	1,205,299	900,309	839,578	864,765
合成樹脂及塑膠製造業	585,916	607,579	597,302	513,654	492,264	507,032
合成橡膠製造業	50,451	39,727	39,321	34,509	32,647	35,912
石化產業合計	1,819,070	1,901,088	1,841,922	1,448,472	1,364,489	1,461,999

(資料來源：經濟部技術處產業技術知識服務計畫 (ITIS)，2017 石化業年鑑[1])

表 2 我國石化產業產值與代表性廠商

單位：新台幣百萬元

次產業	2016年產值	百分比	國內廠商家數
石油化工原料製造業	839,578	61.5%	92
合成樹脂及塑膠製造業	492,264	36.1%	365
合成橡膠製造業	32,647	2.4%	18
合計	1,364,489	100.0%	475家

(資料來源：經濟部技術處產業技術知識服務計畫 (ITIS)，2017 石化業年鑑[1])

廿世紀以來石油煉製業蓬勃發展，由原油中提煉出的各種產品，如乙烯、丙烯，從而發展製造出各類石化產品，這些產品無一不是用於國人所需的食、衣、住、行中。也因此石化業創造了大量的就業機會，也改善了人們的生活品質。但由於石化生產的原料大多具有易燃、易爆、有毒性、腐蝕性的危害性，且生產製程複雜，加工單元多屬高溫、高壓或冷凍，操作條件嚴苛，規模也因產品需求的增大所以愈來愈大型化、自動化、連續化，製程操作已不在只依靠人工操作，必須採用各種自動控制系統如分散式控制系統，對生產過程的各種參數如溫度、壓力、開車、停車進行監控以提高可靠度。但是這些設備、儀器在設計階段是否考慮周全，在其生產製程中是否依操作條件適當操作，定期或不定期的檢查是充份有效，維修是否到位，人為是否有疏漏，導致事故發生。

石化工廠在原料儲存、製程、設備、儲存、運輸等過程都可能產生危害因子，包括腐蝕、氣體外洩等問題，往往會產生火災、爆炸、中毒和缺氧等事故。石化業一旦發生工安或職安意外，均可能造成嚴重損失[2]。分析近年國內外石化業的重大職災案例，分析其原因依序為：1.與可燃氣體有關的爆炸及火災事故 (佔總事故數量的 70%); 2.與有毒有害氣體洩漏有關有害氣體洩漏總事故 (佔 10%);

3.與缺氧窒息有關的事故 (佔 5%)；4.與富氧有關的爆炸及火災事故為 2 起 佔 3%)；其他則包括氯氣中毒、氨中毒、甲苯、二甲苯有關的事故 (約 6%)。這些職災案例涉及的氣體種類很多，如：原油、天然氣、液化氣、甲醇、硫化氫、甲苯、氨氣、氯氣、氟化氫等，此外，氧氣濃度也在石化業職業災害中扮演了極其重要的角色，佔了所收集職災案例的接近 8% 的職災成因。且設備故障、管理不善等原因造成有害物洩漏，亦容易造成人員中毒的嚴重後果。103 年高雄丙烯管線氣爆事件，造成 32 人死亡，321 人受傷的事故，經濟部工業局 (2015) 指出由於石化廠的四項不足，包括巡檢人力不足、檢點人力不足、維修人力不足和現場監工人力不足，往往導致工安事件的發生，同時也造成下游產業的產能受損，因此如何監控石化產業的作業安全，尤其值此工業 4.0 時代，實可分別從人員素質和設備功能加以提升。

在過往的石化歷史中發生了多起的事故，其發生的頻率及後果嚴重性比其他行業來的大且事故連帶威脅人身安全及健康，更甚的帶給社會重大災難。例如 1984 年美國聯合碳化公司在印度波帕爾市農藥廠的毒氣事件，45 噸的甲基異氰酸酯洩漏，造成 2000 人立即死亡，4000 人中毒，17,000 人受傷。這個事件反應出石化業製程安全的諸多問題如安全管理(安全文化、標準作業程序書、物質資料、人員訓練、變更管理等)，安全技術(危害辨識、設備完整性、緊急應變等)，及環境監控等。也因此喚醒了美國政府對石化業的高度重視，訂定了製程安全管理的相關規定也入聯邦法(29CFR Part 1910.119 Process Safety Management of Hazardous Chemicals)成為至今各國製程安全的圭臬。

各國為避免製程事故的一再重覆發生造成勞工及社會的動盪，日本在 1976 年於勞動安全衛生法中訂定「化學工廠安全評估指針」，規定石化業在新建工廠期間應依法在設計、操作、管理等全面施實安全檢核，並針對潛在高危害事件實施危害風險評估。歐洲議會亦於 1982 年制定「重大意外事故危害控制法案」。我國也因應國際趨勢於 1993 年勞動檢查法第 26 條加入危險性工作場所須經檢查機構審查或檢查合格後才可以使勞工進入作業，又於 2013 年台塑麥寮事件後配

合職業安全衛生法的修訂，明訂高風險事業製程安全評估監督機制並推出五種定期安全製程安全評估要領指引。

近年來英國由於 BP 德州事件，於 2010 年頒布高階製程安全管理架構共廿個單元分為四大支柱為「製程安全領導、風險鑑別與評估、風險管理及審查與改善」，強調人、事、物依單元期望和執行達到製程操作完整的目標。

## 第二節 職業安全衛生與物聯網應用

近年來科技日新月異，物聯網應用也日漸普及，為掌握作業場所暴露危害情形，將發展創新作業環境監測技術，透過長期、連續之有害物監測，達到保障勞工職場健康之目的。本研究建置多種職場有害物質氣體感測裝置，以獲得廠區或作業現場勞工各化學物質之即時暴露濃度，另應用聯網技術收集監測資料，進行後續巨量資料之運算、分析之用。

目前全球石化業者在物聯網的應用，若從產業上中下游來看可區分為三大面向：首先為營運模式最適化，石化上游業者（如：油源勘探業者或原油的生產業者），主要專注於營運的最適化，通過分析物理、非物理和跨學科的數據獲得新的優化營運方法；石化輸儲業者（如：運輸業者，包括管道運輸業者與倉儲業者則聚焦從數位影像與監測感測器的數據整合，監控運輸狀態與意外災害的防治，同時也注重數據資料的高度整合所創造出來的新商業機會。再者是提高製程可靠性，石化中游業者（如：煉油廠商與油品零售商）則積極地從擴大對供應鏈與目標消費群的數位化數據監控，發掘主力消費客戶的商機。最後為創造新的附加價值，石化下游業者（如：石化產品生產廠商）則不斷提高生產製程的可靠性方向努力，將原先石化廠員工視為 **Know-how** 的操作程序細緻化與數位化，縮小不同操作者間的差異性，讓製程的可靠度大幅提升。

在職業安全衛生應用方面，聯網技術已逐漸用於廠區巡檢，僅少數廠商應

用於作業環境危害監測。目前國際上對於工業衛生的物聯網應用已逐漸發展，以下簡要介紹應用案例：

一、美國工業衛生協會(AIHA)於 2016 年 4 月提出運用感測元件技術(Sensor Technologies)保護勞工健康的策略，其中包含開發多種氣體感測元件及分析模組，減少傳統需大量儀器分析之成本，並透過 IoT 技術將監測結果蒐集為巨量資料(Big data)，以進行有效的資料探勘及資訊回饋。AIHA 亦於 2017 年 2 月發表運用職業安全衛生之 Big data 及感測元件監測技術，勞工職業危害暴露預測，以及進行快速有效之改善介入。透過 AIHA 的資訊可顯示，職業安全衛生結合物聯網技術將是國際新興趨勢，目前國際間已逐漸出現應用智慧科技進行勞工職業安全衛生保護的方法，特別是近年來穿戴式產品逐漸成熟，穿戴式具備了可以隨身人監測不干擾工作同時在嵌入感測器後，可進行環境監與員工生物機能偵測，以降低職安風險提高人身安全。[7]

二、IBM 的 Employee Wellness and Safety 解決方案以一個營造員工身上須裝置配備無線通訊的智慧頭盔上有三軸的加速度儀、溫度、光線、噪音、氧氣濃度以及二氧化碳等環境感測、智慧背心上配有心跳、體溫等生物感測以及 GPS 定位，一旦感測到危險狀況如不正常的高度提升、推進、疲勞、脫水、跌落以及未著裝安全設備，將立即發生訊息通知員工本身、安管人員、廣播周遭員工注意與協助等。另外，IBM 的 Employee Wellness and Safety 解決方案也將依照員工自身的身體狀況來調整警訊的發送，舉例而言，一名長期患有心血管疾病的員工在高壓環境下工作，可設定感測器不間斷地監測此員工的體溫、心跳與行動層級（行走、跑跳等）以及外部溫度與濕度，並個人化危險層級，在偵測異常數據後，馬上發送警訊通知相關人員前往救援。[8]

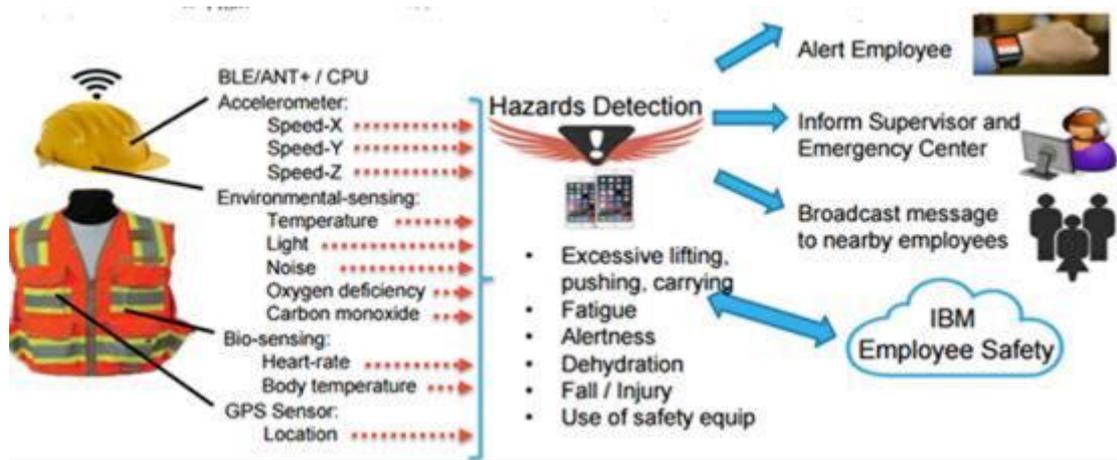


圖 1 IBM 的 Employee Wellness and Safety 解決方案示意

三、2011年 Sakura 等人在某特殊作業場所中建立了一種可用於人體位置追蹤及資料分析的自組式地圖物聯網，此物聯網是由許多的紅外線動作感測器所組成，鄰近感測器的類似動作的響應信號關係將會被進行比較與分析，以形成區域中的人體動作地圖(Self-organizing map,SOM)。此技術利用鄰近感測器節點的信號分析，輸入向量的差異也被用來進行檢視，形成一套可靠的人體位置追蹤與定位系統(圖 2)。[9]

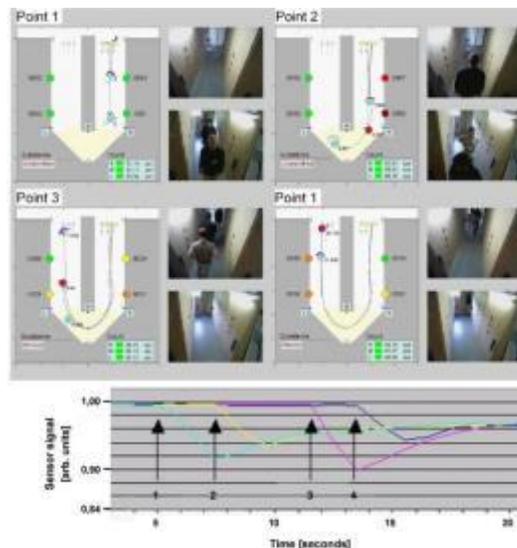


圖 2 人體位置追蹤與定位系統示意圖

四、Somov 等人發展運用在義大利某石化業作業場所中可以偵測爆炸性或燃燒性氣體的無線感測物聯網(WGSN)，此物聯網包含了感測器節點、繼電器節點、網路定址器及無線致動器。感測器節點使用了 2D 寬頻半導體

式氣體感測器，因為感測器長時間的持續使用會導致耗電的增加，因此此研究使用了一種突波加熱方式來進行節能；繼電器節點係用來接收並傳送不同位置感測器到網路定址器；當緊急事故被偵測到時，網路定址器將透過 GSM/GPRS 或乙太網路發出警報，並通知無線致動器自動關閉引發事故的氣體源頭[10]。

為建立安全健康的職場環境，運用智慧科技發展持續監控的創新思維有其必要性，我國職場安全衛生之策略應朝「零危險、零風險」思維方向開發，目前創新產業發展方案除著重於產業升級與應用人才培育，亦應結合國內 ICT 產業性有完整供應鏈之優勢和成熟之晶片研發能力，加速物聯網對勞工安全的發展，以減少我國職業病問題。

### 第三節 作業環境有害物暴露危害

石化廠作業過程易暴露多種揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs)，化學物質之廣泛使用會造成污染暴露情形最為嚴重，但污染暴露來源不僅僅是製程機台使用化學物質(原物料)逸散造成，非例行性作業使用之溶劑及製程中伴隨產生多種副產物也可能是污染來源，暴露原因可能包含作業過程逸散、管線洩漏、設備維修等。已經有研究證實部分 VOCs 在濃度 ppb 等級就會對人體造成不良健康效應，如刺激黏膜、造成呼吸系統損傷、產生生殖毒性。暴露於中低濃度下，會有頭痛、暈眩的現象[11]，相反的暴露在高濃度下，會造成心血管及呼吸系統的疾病，嚴重甚至死亡[12]。長期暴露下更有增加致突變及致癌的可能性，也會造成人體健康上慢性的影響，如損害呼吸系統、神經系統、免疫系統、生殖系統[13]及肝、腎與皮膚[14]。

諸多針對 VOCs 探討的相關研究都已證實 VOCs 會對人體健康及環境造成不良影響，但各個物質可能造成人體健康危害都不相同，依 ACGIH 訂定 TLV-TWA 基準，將各個物質對人體健康之影響制定適合之暴露標準，從內容可

以得知各個物質可能造成之負面健康效應及主要影響之標的器官。

然而由於石化業等關聯產業或其他產業使用的化學物質總類繁多且複雜，在進行健康危害風險評估時，不宜以單一物質之暴露判定對人體健康的影響。加上目前對於長期多重化學物質暴露對健康影響仍然有許多未知數，因此有必要長期監測多重化學物質暴露情況。

當前科技日新月異，高科技產業蓬勃發展，為掌握產業間或其他產業作業場所危害暴露情形，將發展創新作業環境監測技術，透過長期、連續之有害物監測，達到保障勞工職場健康之目的。本研究建置多種職場有害物質氣體感測裝置，以獲得廠區或作業現場勞工各化學物質之即時暴露濃度，另應用聯網技術收集監測資料，進行後續巨量資料之運算、分析之用。

# 第三章 研究方法

## 第一節 研究架構

本研究執行內容由感測系統規格優化、實際場域驗證、市場效益推廣、以及法規研討評估等四大執行面向，分別對包括感測裝置產品及雲端應用功能優化、實場驗證與標準方法平行比對、感測產品適用限制、產品效益與推廣、法規適切性評估等工作項目。

研究執行過程，邀集職業安全衛生領域、作業環境測定、資通訊、資通訊等不同領域專家，透過多場次專家會議提供不同面向之專業建議，協助本研究各項技術整合與實際場域測試運行，建立符合業界需求之職場有害物即時監測技術與後端監控平台。研究架構如圖 3。

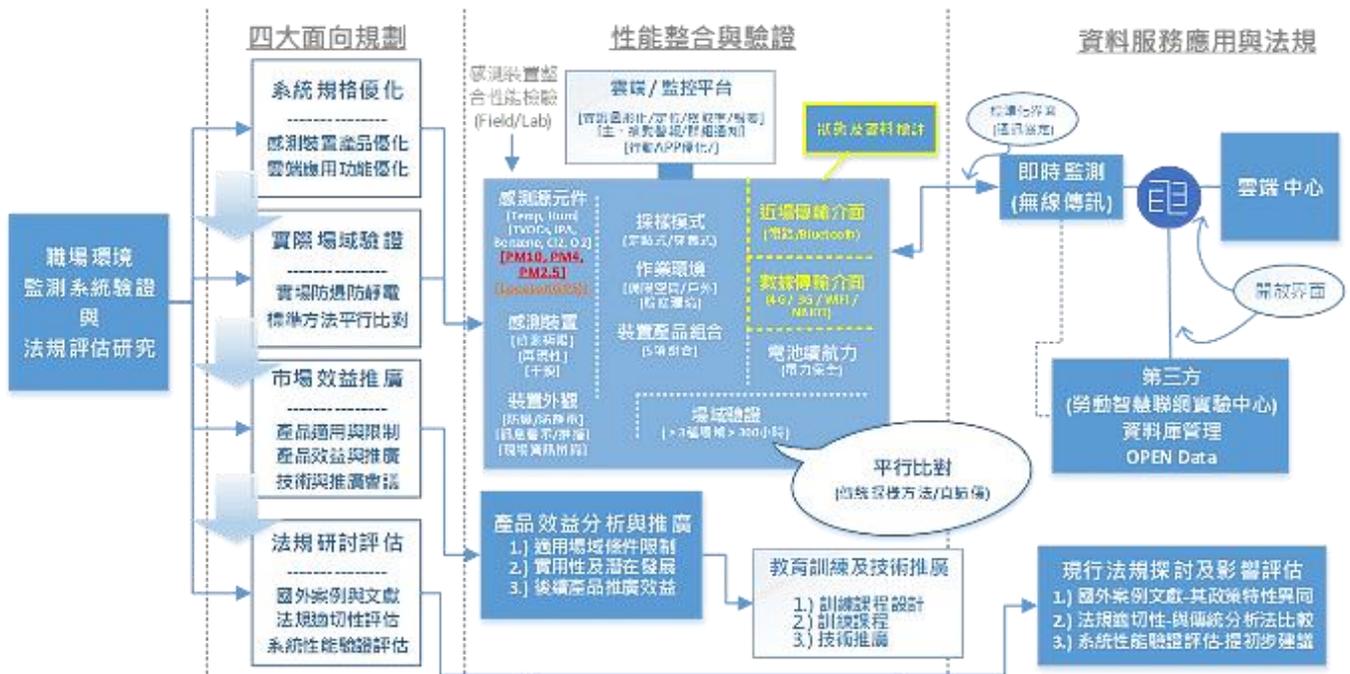


圖 3 研究執行架構圖

## 第二節 研究項目

石化廠於作業過程可能暴露之化學品種類繁複，為達到作業環境長期、連續有害物監測，以及掌握勞工暴露實態之目的，本研究已完成組合 TVOCs、氯氣、苯、異丙醇的監測晶片成為固定式及穿戴式監測設備，107 年度於實際場域進行長時間之運作驗證。另應用物聯網技術收集監測資料，並於雲端進行多種化學物質濃度推估分析，以及運用巨量監測資料，進行勞工暴露危害與健康風險評估分析。另依據分析結果提供危害預防預警機制，保障勞工作業現場安全。

感測系統規格優化、實際場域驗證、市場效益推廣、以及法規研討評估

### 一、感測系統規格優化

- (一) 環境感測裝置開發完成後，將規劃兩種應用方式，一為作業環境定點監測，即為將感測裝置裝置於固定位置，進行該作業環境之暴露濃度連續監測；另一方式為將感測裝置裝配在穿戴式裝置，並以不妨礙勞工作業與採樣準確性為原則進行開發，此方式可隨勞工作業型態，隨時監測勞工周邊作業環境之有害物暴露情形。
- (二) 氣體感測技術應用開發初步設計規劃包含穿戴或可攜式之氣體感測器與氣體感測系統 App。此 App 支援多種氣體感測裝置，雇主及現場勞安管理人員可使用智慧型手機以利群組管理，裝置之間的連線採用無線方式做資料傳輸。勞工可藉由氣體感測 App 所收集之數據了解環境中有害物濃度，雇主與現場勞安人員管理人員依據 App 內有害氣體動態數據、勞工活動紀錄與回饋建議等資訊，以評估作業現場改善方式。

### (二)實際場域驗證

- 1.分析結果可靠性：TVOCs 感測裝置之量測結果需與傳統分析結果進行相互驗證，並經過精密度及準確度之測試。

- 2.氣體感測元件傳輸方式:氣體感測元件與接收裝置間通訊採用 WiFi 等無線通訊傳輸為主，可將數據傳送至作業現場勞工、現場管理人員手機或上傳至雲端儲存運算分析。
- 3.本研究開發之氣體感測元件基於保護作業現場勞工安全，應有一定之準確度，準確範圍至少包含在法規暴露容許標準值內，確保裝置能準確偵測現場濃度，達到保護勞工之目的。

### (三)市場效益推廣

本研究針對所建置之感測裝置進行成本效益分析，並針對不同作業型態進行應用性評估，以利感測裝置及系統產業後續推廣及產業落實。

### (四)法規研討評估

因應現在科技之進步與監測技術之快速發展，將對於職業安全衛生相關法規中與作業環境監測技術相關之法規進行盤點，並進一步評估未來導人物聯網技術之可行性評估及現行法規檢討與修正評估建議。

## 第三節 驗證場域

本研究選取 4 種不同場域，分別為半導體業(黃光製程)、半導體業(蝕刻製程)、樹脂業、粉塵作業，本研究就上述場域進行感測裝置產品之實際場域測試，各場域之相關背景資料分述如下(表 3)：

#### 一、場域一：半導體業(黃光製程)

本場域主要以黃光區製程作為測試場域，黃光區所使用到之光阻液含有多種有機物質，如丙二醇單甲醚(propylene glycol monomethyl ether,PGME)、丙二醇單甲基醚醋酸酯(propylene glycol monomethyl ether acetate,PGMEA)、異丙醇、丙酮 (Acetone)、四甲基戊醇( 4-methyl-2-pentanol)等化學物質。  
目標污染物：總揮發性有機物、異丙醇、氯氣

#### 二、場域二：半導體業蝕刻製程)

蝕刻製程主要使用  $\text{Cl}_2$ (氯氣)、 $\text{BCl}_3$ (氯化硼)等氣體進行移除晶圓表面材料，有氯氣暴露之可能性。因此，本研究分別於黃光製程有機揮發物與蝕刻製程氯氣之評估。目標污染物：總揮發性有機物、異丙醇、氯氣

### 三、場域三：樹脂業(白膠製程)

樹脂製造業於白膠製程中，主要使用到苯乙烯、乙酸乙酯、甲醇、異丙醇、丙烯醯胺、二甲苯、甲苯等有機溶劑，其製程為取料、配料、進行乳化、反應槽反應、成品攪拌槽、成品包裝。目標污染物：總揮發性有機物、苯、異丙醇

### 四、場域四：粉塵作業(穀倉倉儲)

穀倉倉儲業設有多個穀倉以供遠洋穀物存放，而在遠洋穀物進入場區欲進行存放穀物時因下料作業造成粉塵揚起導致細懸浮微粒暴露，因此本研究針對該作業環境建設細懸浮微粒感測器之實場驗證規劃。目標污染物：粉塵、微粒。

表 3 感測裝置產品化建置種類一覽

項目	Type. A 黃光製程型	Type. B 蝕刻製程型	Type. C 樹脂製程	Type. D 倉儲下料
感測元件(溫溼度)	V	V	V	V
感測元件(氣體)TVOCs	V	V	V	V
感測元件(氣體)IPA	V			
感測元件(氣體)Benzene			V	
感測元件(氣體) $\text{Cl}_2$		V		
粉塵感測元件 PM				V
GPS 等定位元件(穿戴式)			V	V
3 軸加速元件感知(穿戴式)	V	V	V	V
MicroSD 記憶卡	V	V		
廠商額外需求	$\text{NH}_3$			

## 五、量測數據變化與數據獲取率

### (一)量測數據變化情形

以下定義各量測數據變化情形

#### 1.感測點監測資料有效性

(1)無效數據及有效測值：

A.儀器校正失敗(經研判影響測值)，至修復調整完成(校正正常)期間。

B.故障至修復並經測試正常期間。

(2)有效測值：監測數據通過有效性確認後該測值方屬有效測值。

美國環保署(US EPA)其規範，若該感測器作為個人暴露監測之目的，其對數據完整性之要求為至少 80%，另台灣環保署針對 PM 感測器佈點其數據獲取率標準為 90%。而根據研究先前針對 300 台感測器進行為期一個月之測試，該段時間數據獲取率皆可達 90% 以上，因此研究擬將各感測點數據獲取率以 90% 為目標，詳細說明如下：

各感測點每分鐘產出各污染物濃度或環境參數之有效平均監測數據，以資料串流方式，將即時數據發布至後端平臺。有效資料完整率係以每場實場驗證即時展示之有效測值筆數之比率(計算方式如下)：

$$\text{數據獲取率} = \text{有效測值筆數} / \text{應有測值筆數} \times 100\%$$

表 4 美國感測器指南（Air Sensor Guidebook）對感測器分級描述

分級	應用範圍	污染物	誤差範圍	數據完整度	描述
I	教育和資訊	一般	< 50%	≥ 50%	測量誤差範圍可容許較寬，證明污染物於某濃度範圍。
II	熱點監測	一般	< 30%	≥ 75%	需要正確數據質量，以確定污染物存在於區域上，其濃度需接近真實值。
III	補充監控網	標準、有毒	< 20%	≥ 80%	提供額外的空氣質量指數，補充傳統監測站數據測值，以互補不足、相互對照，數據必須具備足夠的質量，以幫助填寫監測站空白的地方。
IV	個人暴露監測	一般	< 30%	≥ 80%	人體暴露於空氣中的污染物因素眾多，對感測器要求相對穩定，以解釋及找出高風險的原因，進行公共衛生或科學相關研究與解釋。
V	監管監測	臭氣 CO,SO2 二氧化氮 PM2.5, PM10	< 7% < 10% < 15% < 10%	≥ 75%	量測質量需要精確品質，以確保數據得到空氣監測品質管制要求。

資料來源：Air Sensor Guidebook

## 第四節 平行比對規劃

### 一、採樣模式

本研究感測裝置產品依量測模式之不同，可分為區域定點式與穿戴式感測裝置。因此在實際場域之平行比對上，同步進行傳統個人採樣與區域採樣，此外，在區域定點式感測裝置設置點中，另選取一採樣點進行直讀式儀

器之平行比對。

## 二、個人採樣

各不同場域中，擬分別進行每天之傳統個人採樣與穿戴式感測裝置之監測，並將同時記錄個人活動時間內容，以更詳細掌握勞工作業實際暴露情形。圖 4 為個人採樣器配戴示意圖。

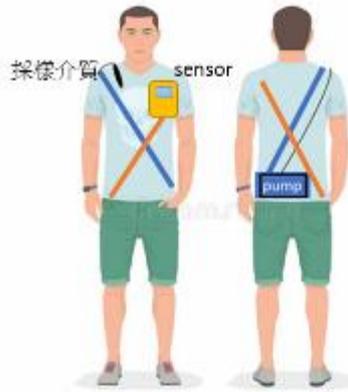


圖 4 個人採樣器配戴示意圖

## 三、區域定點採樣

各不同場域中，將以該場域中勞工之活動範圍內或高汙染物逸散源，規劃設置採樣點，以進行傳統區域採樣與區域定點式感測裝置之平行比對。而本研究亦利用一台直讀式儀器與一區域式感測裝置，以平行比對方式進行監測。

## 四、採樣時間

### (一) 感測裝置產品

實際場域驗證時，每一場域感測裝置連續測試時間至少 300 小時，以進行感測效能測試、場域特殊規格測試、數據傳輸測試及警示與推播測試，係於所選擇之場域中採用連續進行 24 小時/天\*7 天/週\*2 週=312 小時之連續測試。

## (二) 傳統採樣方法

無論是個人採樣或是區域採樣，傳統採樣方法於技術上及成本考量上難以進行連續 300 小時之監測。因此本研究規劃所有要進行驗證之場域，分別藉由進行連續一週工作天(正常班)之採樣評估，所需樣本數為 3 樣本/天\*5 天/週=15 樣本，以瞭解一週之暴露實態。

## (三) 直讀式儀器

本研究使用 ProRAE 公司生產之 PID 氣體偵測器 (ppbRAE 3000,RAE Systems, San Jose, USA)，儀器偵測範圍係 1 ppb-10,000ppm，在實際採樣前應進行儀器零點及全幅校正，使用氣體為甲苯標準氣體。直讀式儀器的採樣時間規畫上，考量儀器本身的儲存容量之限制，因此本研究規劃所有要進行驗證之場域，分別藉由進行連續一週工作天(正常班)之採樣評估，每天進行 6~8 小時之監測，以瞭解一週之暴露實態，並透過搭配感測裝置同步監測，進行評估直讀式儀器監測方法與感測裝置之相關性，以驗證感測裝置於實際場域使用之效能。

# 第四章 研究結果

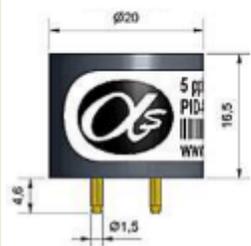
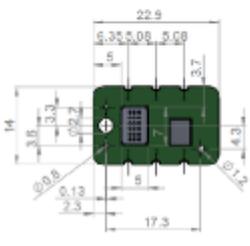
## 第一節 感測裝置產品化建置

### 一、感測裝置優化

本研究針對 TVOCs 之感測元件進行規格優化，依去年度研究成果，挑選 Alphasense 公司之高精度感測元件，作為執行本研究主要作業環境有害物智慧監測系統氣狀污染物之感測。然而在選擇感測器時必須考量其感測方式、易受干擾因素、線性準確度、靈敏度、偵測極限等重要因素，Alphasense 公司之感測元件雖然精準，但其在元件價格、元件體積兩個因素仍影響感測裝置的造價成本與外觀體積。由於感測器之體積為影響勞工使用意願很大之因素，因此本研究綜合市面上其他形式之感測元件進行比較，以建立適當大小兼具符合使用需求之感測裝置。

本研究綜合 Alphasense、MS1100 與 SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE 三種感測元件性能比較如表 5，比較體積大小 Alphasense 較 MS1100 為大(如圖 5)，另比較感度與分析時間，線性、感測範圍、精密度、精準度及價格等，MS1100 在分析效果及成本價格上及具優勢。

表 5 感測裝置分析性能比較

測項	廠牌	Alphasense PID-AH TVOC	SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE	MS 1100
TVOCs	樣式			
	規格	感測原理：PID 感測範圍：0-10 ppm 解析度：0.01 ppm 反應時間：90秒 工作溫度：-40-55 °C 工作濕度：0-75 % RH	感測原理：MOS 感測範圍：0-1,000 ppb 解析度：0.01 ppm 反應時間：小於5秒 工作溫度：0-50 °C； 工作濕度：0-95 % RH；	感測原理：MOS 感測範圍：0-100ppm 解析度：0.1 ppm 反應時間：小於10秒 工作溫度：-10-50 °C； 工作濕度：5-90 % RH；

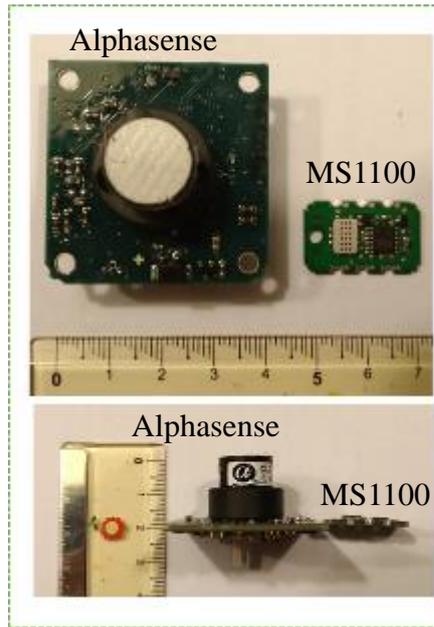


圖 5 Alphasense 與 MS1100 感測元件外觀比較

本研究以篩選兼具感測性能與體積之感測元件，盡量以體積微小化為目標。但實際廠域所暴露之 TVOCs 濃度存在極大差距，未來可因實際應用場所而提供不同型號之總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件的選用。

## 二、依採樣模式不同之不同形式裝置設計

本研究所建置之區域定點式及穿戴式感測裝置，可監測溫度、濕度、總揮發性有機物質(TVOCs)、異丙醇、苯、氯氣及氧氣等量測參數。

### (一) 區域定點式

區域定點式感測裝置，因無體積及電源供給上的限制，設計上分為外殼、內殼並考量維護及擴充之便利性，與外殼設計的四個角柱螺孔相固定，下層放置電源供應裝置，採用可抽換匣式電池箱體，上層設計空間以便容納電源線、其他感測元件，外觀尺寸為 13.4 x 7.5 x 3.1 cm。

區域定點式感測裝置設計上需規劃製作感測進樣孔位，內建渦流風扇，使氣體感測元件均勻取樣。各感測元件固定不易脫滑落或不易移位，並於外殼下方設計電源線孔，以便定點式電源供給裝置之電源供應器。亦考量

方便進行感測器及內容零件更換，置電源開關，並考量充電之便利性、LED 電量顯示及防滑設計可能性等。區域定點式感測器外觀如圖 6。

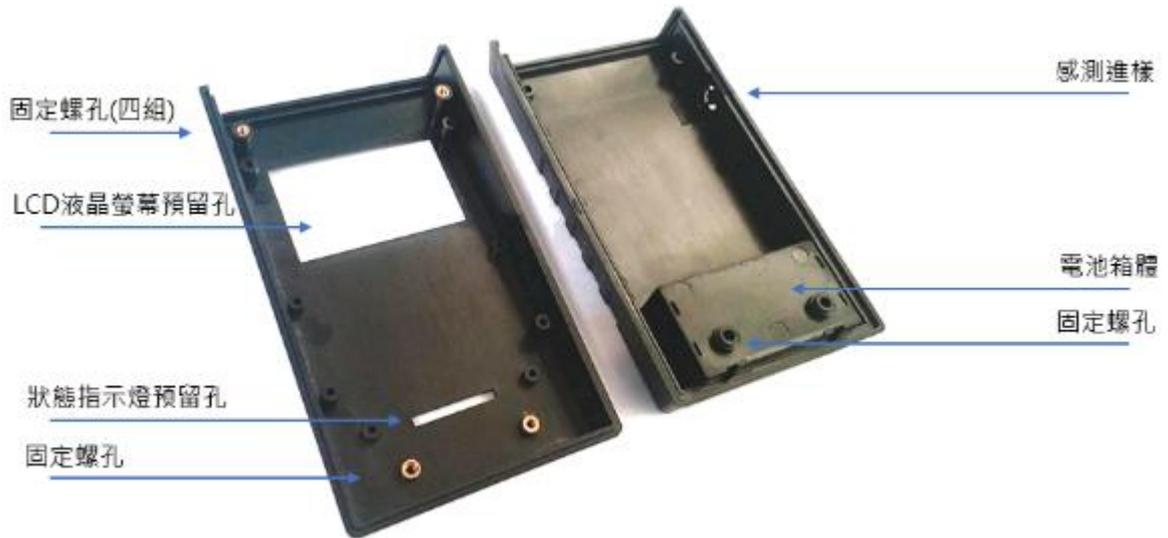


圖 6 區域定點式感測裝置外殼外觀

## (二) 穿戴式

考量人員平常配置穿戴式感測裝置進行感測時，盡可能的不影響其人員平時之作業方便，但可同時準確和連續的收集空氣中有害物濃度及相關參數(溫度、濕度及氧氣等)，目前設計之外殼，傾向單側項、體積小且重量輕便之設計，並在背殼加裝手臂綁帶以利感測器安裝於作業人員之手臂上，以利達到不影響作業人員之作業順暢度並提升配戴之舒適程度。如圖 7、圖 8 所示。



圖 7 穿戴式感測裝置及人員背帶

另發展單項感測元件功能裝置，雖體積小，但亦不減低整體性功能。

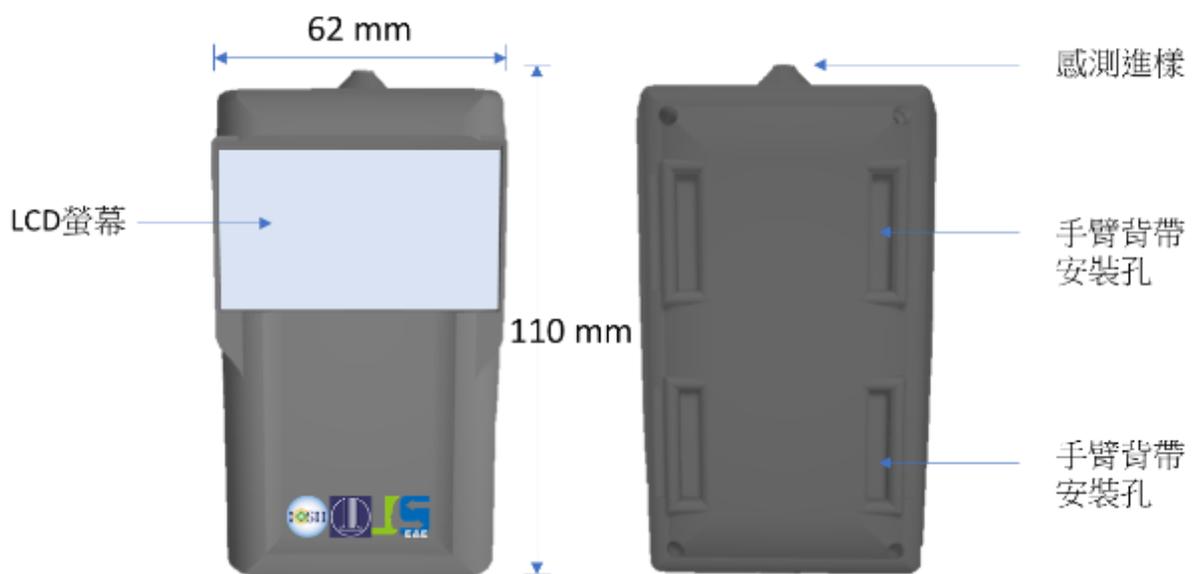


圖 8 穿戴式感測裝置外觀

### 三、 不同場域之電池續航設計

在於定點式感測裝置部分，因考量安裝現場電力不穩定或未能 24 小時供電環境，鋰電池則可扮演儲電式角色；可在裝置固定檢測點上裝置充電孔，當有連續電源供應無虞時可供給設備電源並幫電池充電，視情況或當環境無法供電給設備之使用時鋰電池則可暫時供電，電池供電時間可維持約 10 小時，避免監測數據漏失之狀況。穿戴式感測裝置可更換電池，續航力約 8 小時。如表 6 所示。

表 6 區域定點式與電源供應模組規格說明

感測裝置	定點式 (多項感測元件)	穿戴式(單項感測元件)
外觀	 <p>13.4 x 7.5 x 3.1 cm</p>	 <p>11.0 x 6.2 x 3.0 cm</p>
電池續航設計	18500 鋰電池 3.7V~4.2V, 容量 4,300mAh 續航力約 10 小時。	18500 鋰電池 3.7V~4.2V, 容量 2,500 mAh 續航力約 8 小時。
備註	內建：多組感測元件、通訊模組 (NB-IoT+GNSS <sup>1</sup> )、3 軸加速器小型、渦流風扇	內建：單組感測元件、通訊模組 (NB-IoT+GNSS)、3 軸加速器小型、渦流風扇

## 四、 不同場域之特殊規格設計

### (一) 禁用無線通訊場域考量

感測器可能因防爆、防靜電等特殊場域而禁用無線通訊，或因特定場域通訊不良或斷線之無線資料傳輸時受干擾而出現資料缺失，本研究將增設感測裝置之記憶卡(MicroSD)槽模組，具備儲存資料及讀取功能，記憶卡模組如圖 9 所示。根據本研究經驗，以平均分鐘值為資料解析度進行記錄，月資料量約 30 Mb，配備 8GB 容量記憶卡，可儲存 10 年或以上數據資料。

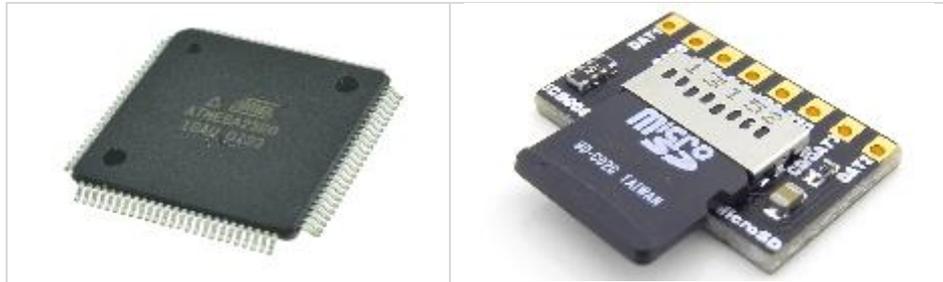


圖 9 記憶卡模組示意圖

### (二) 防爆防靜電考量

危險場所區域分級系指「出現爆炸性混合氣或預期可能出現之環境，而對電機設備構造以及安裝等必須採取特別的安全對策之場所，其中危險場所可區分為 0 區(zone 0)、1 區(zone 1)及 2 區(zone 2)等，各區域風險等級區分為 0 區代表可能連續存在或長時間存在爆炸性混合氣之場所；1 區為在正常狀態下，有可能存在爆炸性混合氣之場所；2 區為則是在正常狀態下不會存在爆炸性混合氣，即使會也只是很短的時間，但在異常狀態下有可能存在爆炸性混合氣之場所。本研究所設計之感測裝置主要目的為針對人員出入場域進行穿戴式及區域定點式感測設計，故其應用場所主要為危險場所 2 區。

防爆化的目的在於防止電氣火花或機具的高溫表面成為點火源，有防爆構造(type of protection)的電氣機具，是指對感測器在構造上加以特殊考

量，使其具有不為點火源的特性，故感測器設計可從「安全增防爆構造」及「本質安全防爆構造」著手；送檢項目包括：構造檢查、機械強度試驗、爆發試驗，共三項，詳細項目如表 7。

表 7 感測裝置防爆測試考量項目說明

防爆構造檢查項目	測試	測試說明
1.構造檢查	是	針對結構、防滑、耐撞擊及固定設計等項目進行強化
2.機械的強度試驗		
容器構造部的衝擊試驗	是	PLA 材質及設計可耐受一般衝擊強度
攜帶式落下試驗	是	PLA 材質及設計可耐受一般落下強度
3.1-c 爆發強度試驗(大)	是	PLA 材質及設計可耐受一般爆發強度
3.2-c 爆發引火試驗(大)	是	PLA 材質及設計可耐受一般引火強度

### (三) 快速辨識數據顯示考量

感測器依據場域需求，設計規畫清楚且快速之數據顯示方式，目前為使用平板搭配感測器，透過平板上 APP 即時顯示現場有害物濃度，如圖 10 所示。



圖 10 感測器數據顯示

## 五、濃度超標之警示提醒與訊息推播

本研究在設計感測系統濃度超標之警示提醒與訊息推播方式，並具下列特色(如圖 11、圖 12 所示)：

### (一) 警示值超標事件(Event ID:CA01S)

1. 使用者可自行設定警示值標準，但不得超過系統警示上限值。
2. 當感測得測項濃度值超過警示值(Event ID:CA01S)時，系統會進行包括①感測裝置蜂鳴器聲響警示；②感測裝置回傳雲端(後台)控制室，紀錄超標事件(Event)警示；③勞安監管單位之行動 APP 亦會同時提起警示。
3. 當感測得測項濃度值超標解除警示值(Event ID:CA01E)時，感測裝置回傳雲端(後台)控制室，紀錄超標事件(Event)警示解除。

### (二) 警示上限值超標事件(Event ID:CA02S)

1. 若現場感測得濃度大於系統警示上限值時(Event ID:CA02S)，則感測裝置會連續進行警示作動上述 2.之 Event ID:CA01A，不因使用者取消警示而停止。
2. 直至警示上限值解除(Event ID:CA02S)時，才停止連續警示作動。

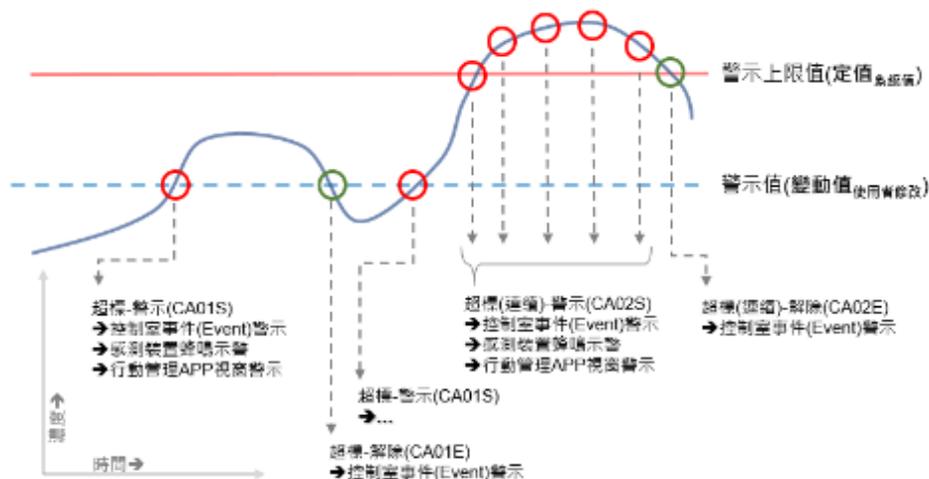


圖 11 警示與警示上限值超標事件示警處理邏輯示意圖

異常事件通報							
發生時間	測站編號	事件編號	事件	所在緯度	所在經度	處理時間	處理
2018-09-20 10:22	T18D03	CA01S	PM濃度超標	22.60746000	120.29643000	Null	處理
2018-09-19 11:00	T18D01	CA01E	TVOC濃度超標	22.60646000	22.60646000	2018-09-19 10:45	
2018-09-19 10:22	T18D02	CA01S	TVOC濃度超標	22.60746000	120.29643000	2018-09-18 20:35	

圖 12 警示與警示上限值超標事件示警處理介面圖示

## 六、戶外作業、粉塵作業環境等特殊場域需求之細懸浮微粒感測裝置規劃設計

考量粉塵作業場所之環境，本研究規劃設計可攜帶型及固定型細懸浮微粒感測器以應用於實廠，希藉此完整記錄勞工實際暴露情形，以保障其權利。透過無線通訊，將攜帶型或固定型感測器即時數據及警訊傳至雲端系統，當勞工進入工作區域(或開啟感測器運行功能)時，若發生緊急狀況(濃度超標)，系統發出警報，達到即時監控。另外亦可藉由完整資料數據，確認勞工實際暴露(八小時日時量暴露平均濃度、短時間時量暴露平均濃度、瞬時暴露濃度)是否均低於容許濃度，特別是短時距暴露在過去不易量測，難以確保其暴露是否符合法令，藉由攜帶型感測器將可突破過去勞工短時距暴露量測的困難。

此外上述粉塵作業中，礦坑作業或其他特殊場域因其作業及空間特性，不易裝設感測器接收訊號設備、考量爆炸危害而禁用無線通訊，或因特定場域通訊不良或斷線之無線資料傳輸時受干擾而出現資料缺失，因此本研究針對作業空間特殊場所，設置感測裝置之記憶卡(MicroSD)槽模組，具備儲存資料及讀取功能。NIOSH 0500 總粉塵分析方法中，說明可使用直讀式儀器進行監測，故本研究建置之細懸浮微粒感測系統應具有相當於直讀式儀器監測之效能，並即時提供警示與危害推播功能，協助勞工及事業單位掌握粉塵暴露實態及提供有效之防護措施。

## 第二節 實際場域驗證

### 一、資料獲取情形

經實廠驗證，因部分現場作業環境無法提供 Wi-Fi 訊號，但在現場通訊上無任何其他限制，且經過測試後發現現場作業環境 4G 收訊佳，在通訊模組的選用上可使用 NB-IoT 模組架構進行數據之即時回傳，以利提供使用監測平台進行數據監測。

另探討感測器在數據回傳率，同步架設 5 台感測器中，以每分鐘回傳一筆數據之前提，一天 24 小時須回傳 1440 筆數據資料，以實際一天當中回傳之數據筆數為分子除去 1440 筆數據資料即可得到每日感測器之資料獲取率。除去因現場環境 4G 收訊中斷造成數據回傳失敗與人為因素造成斷電此類不可抗之因素，大致上每台感測器在實場驗證期間之資料獲取率均可達到 95% 以上，如圖 13 所示。

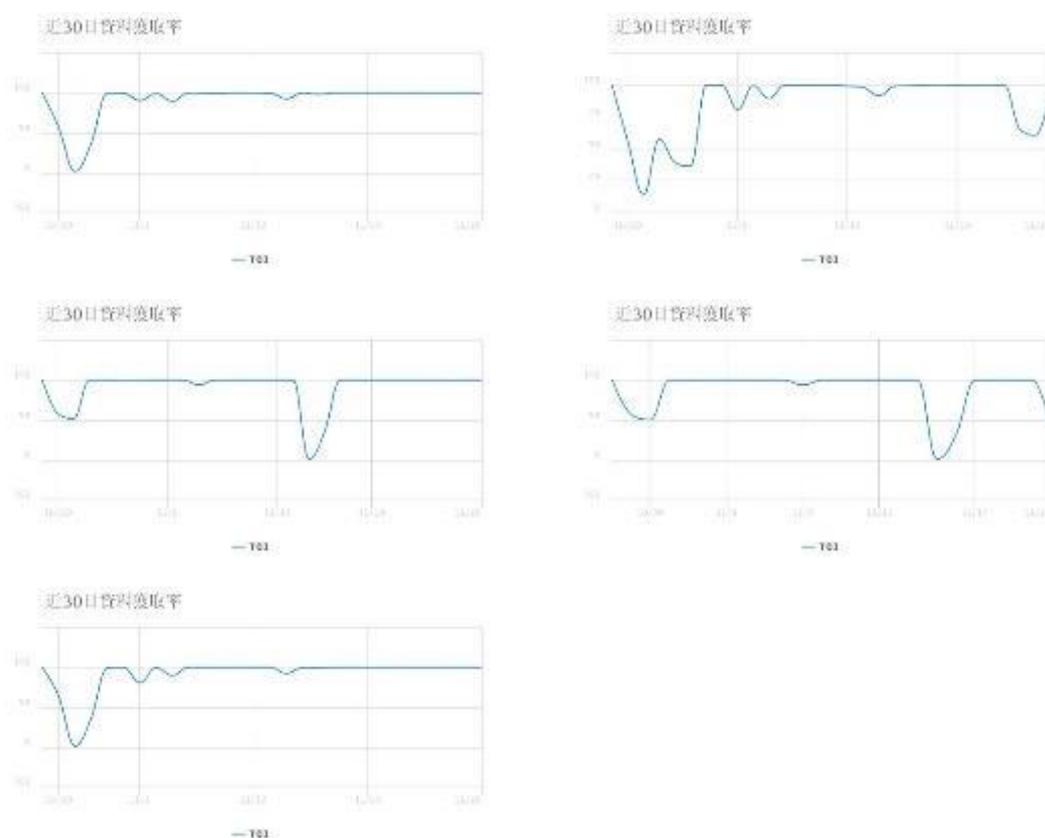


圖 13 感測器資料獲取率示意圖

## 二、感測效能測試

### (一)感測裝置與直讀式儀器之相關性

本研究以本所開發之 TVOCs 感測裝置進行濃度監測，直讀式儀器 PID 與感測裝置監測濃度分佈之相關性，顯示每天所監測到之濃度分佈間有很好之相關性( $R^2=0.9428$ )，如圖 14 所示。另本研究進一步以簡單線性迴歸分析 TVOCs 感測裝置與傳統採樣相關性，兩者之間有良好之相關性存在( $R^2 = 0.972$ )，如圖 15 所示。

因此感測模組在此類型之場域中(低濃度作業場所)，將可輔助解決現行認證實驗室之分析方法，所分析結果皆低於所使用之分析方法之偵測下限之困擾，而導致無法確認勞工之暴露實態。

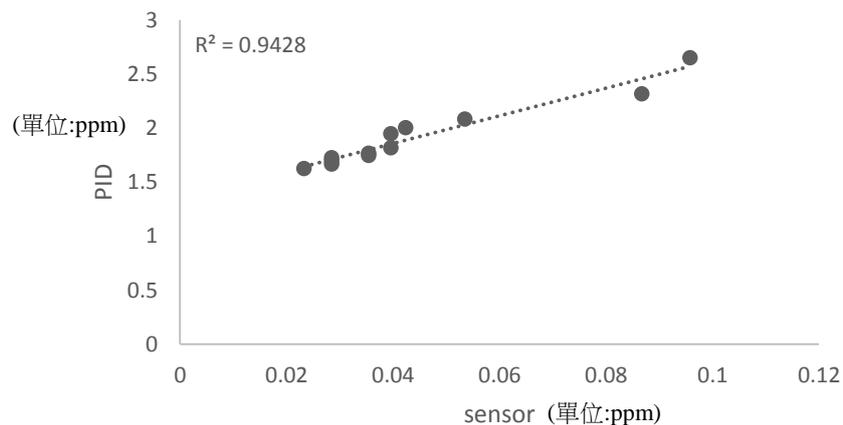


圖 14 TVOCs 感測裝置與 PID 之相關性

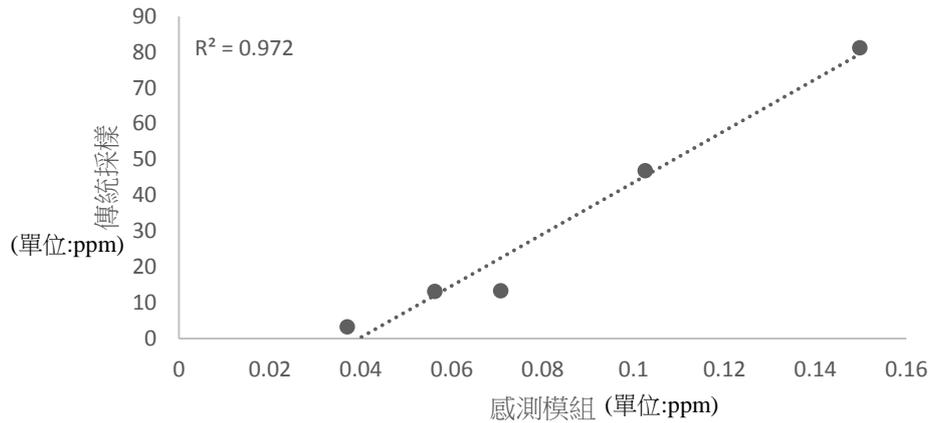


圖 15 TVOCs 感測裝置與傳統採樣之相關性

## (二) 感測模組與傳統採樣分析之結果

圖 16~圖 18 分別為 TVOCs、異丙醇與苯之個人配戴式感測器與個人傳統採樣結果之相關性，圖 19~圖 21 分別為 TVOCs、異丙醇與苯之定點式感測器與區域傳統採樣結果之相關性，可發現無論是個人採樣或是區域採樣，兩者方法所監測到之濃度分佈間有一致性，且其不同百分位濃度有極佳之相關性。但圖 14-圖 21 中 X 軸與 Y 軸之濃度差異主要不同監測方法，包括：直讀式儀器、傳統採樣方法、感測器偵測方法，甚至不同感測器型態，其個別在濃度監測上均有不同之結果，其中可能原因為不同監測方式所採取之偵測原理均不同，對傳統採樣分析數據而言，感測器與直讀式儀器之濃度皆屬於相對濃度。

未來於進行實場測試前，內部感測元件均須透過標準氣體進行比對校正，例如本研究所使用感測元件與標準氣體兩者濃度相關性皆能達到  $R^2$  大於 0.95 以上。而後實際進行實場測試時，進行傳統採樣分析數據與感測器數據之相關性分析，並求得兩種數據之相關性關係式。未來若以感測器進行實場長期監測時，即可以此相關性關係式將感測器相對濃度數據轉為絕對濃度數據。此時，X 軸與 Y 軸之濃度差異就會大幅縮小。

藉由上述結果，本研究可確認感測模組於長時間定量監測之評估，可有

效連續進行勞工個人長時間之時量平均濃度之監測，進而建立勞工個人長期暴露資料庫，以協助進行長期暴露風險評估，並協助提供降低長期暴露風險之管理方案之決策。

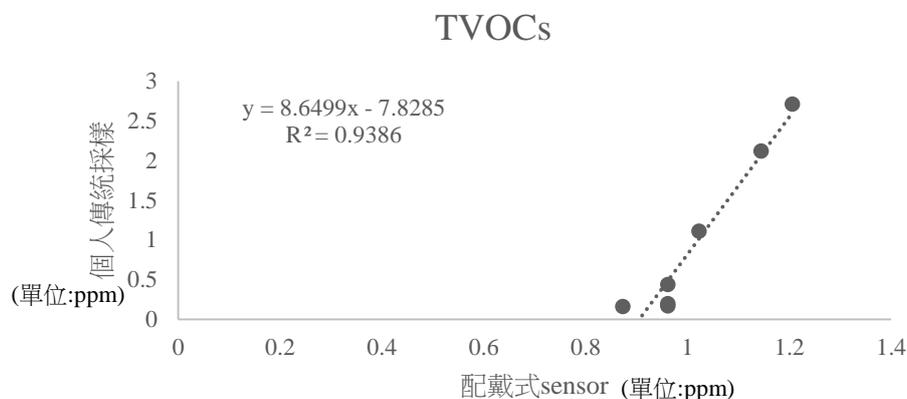


圖 16 配戴式感測器與個人傳統採樣 TVOCs(ppm)之相關

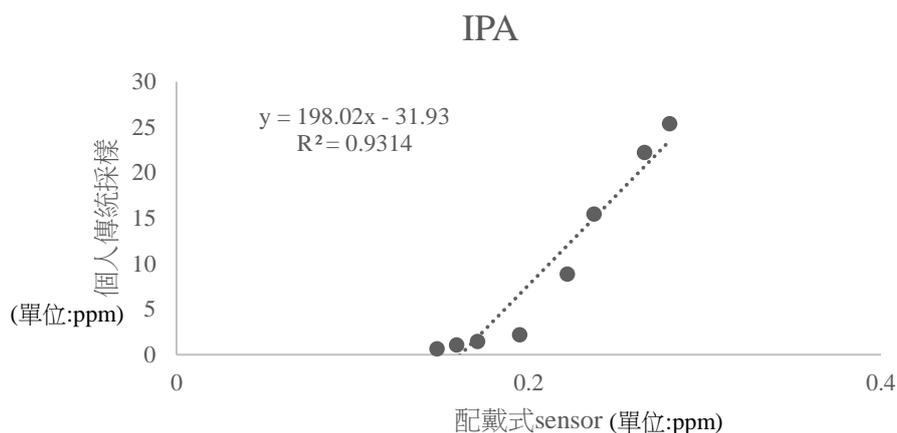


圖 17 配戴式感測器與個人傳統採樣異丙醇(IPA)(ppm)之相關

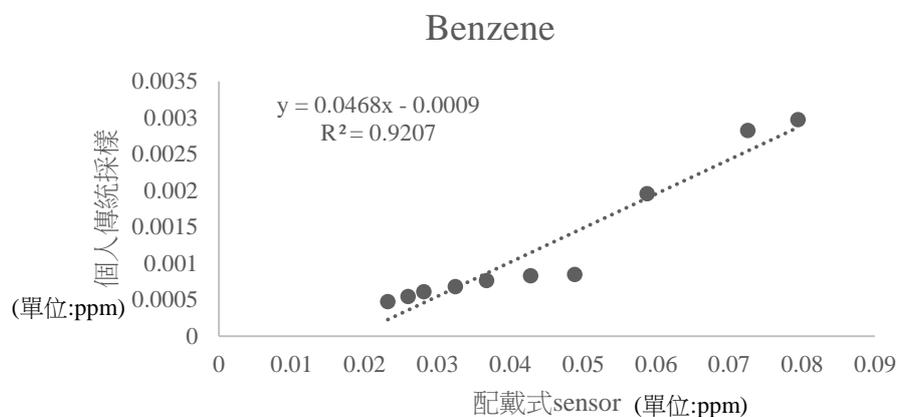


圖 18 配戴式感測器與個人傳統採樣苯(Benzene)(ppm)之相關

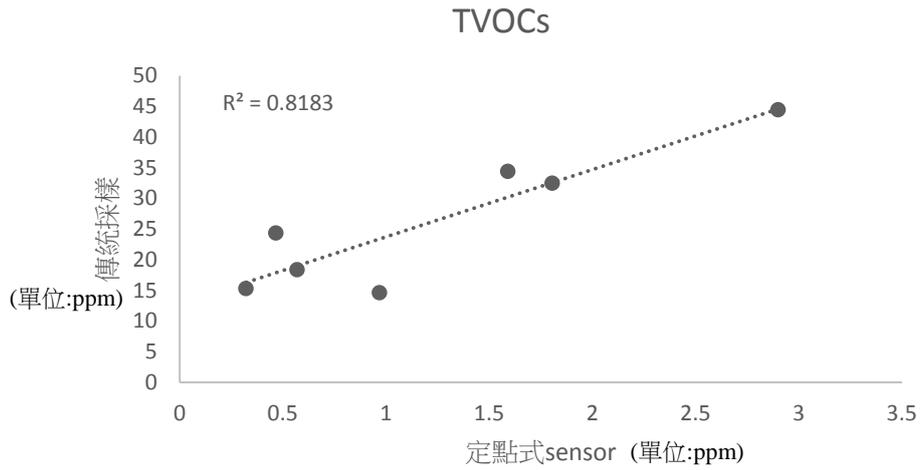


圖 19 定點式感測器與區域傳統採樣 TVOCs(ppm)之相關

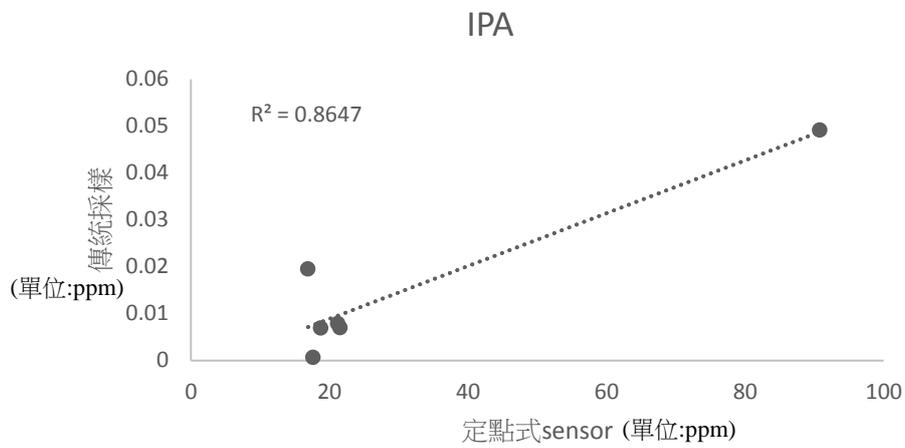


圖 20 定點式感測器與區域傳統採樣異丙醇(IPA) (ppm)之相關

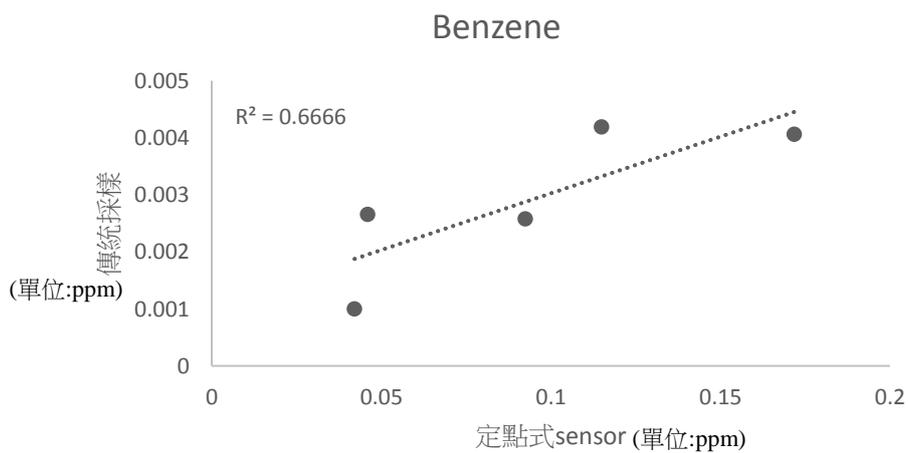


圖 21 定點式感測器與區域傳統採樣苯(Benzene)(ppm)之相關

### (三)細懸浮微粒監測

圖 22 為感測器連續 7 天監測之濃度分佈圖，可發現透過感測器進行懸浮微粒濃度之監測，在該實場作業環境中各樓層具有相似的濃度分布情形，但若透過時間與濃度分佈圖之分析，可發現其濃度分佈趨勢雖相近，但其不同樓層之間暴露濃度與瞬間高峯值仍有極大之差異，若僅以傳統採樣方法進行 8 小時平均濃度之量測，無法得知現場作業人員之暴露實態。



圖 22 各樓層  $PM_{2.5}$  以感測器連續七天監測之濃度分佈圖

### (四)氧氣濃度監測

以感測器連續 7 天監測現場作業環境中氧氣濃度，透過時間與濃度分佈圖之分析顯示(如圖 23)，現場作業環境中氧氣濃度約落在 21.1% 至 21.8% 之間。此項感測技術未來亦可應用於局限空間等缺氧作業場所，以確保勞工進入場域前之安全確認。



圖 23 不同採樣點以感測器連續七天監測氧氣之濃度分佈圖

#### (五)低濃度有害物監測

以往透過傳統採樣分析結果多為低於偵測極限而無法掌握確切暴露濃度，本研究以感測模組於蝕刻區進行氯氣濃度監測，傳統採樣個人與區域及感測模組監測結果，可發現僅第二天於個人與區域採樣之濃度分別為 0.00896 ppm 與 0.00737 ppm，其餘皆低於方法之偵測下限。以本研究研發之個人穿戴式感測器與傳統採樣方法進行 5 天之氯濃度監測，透過圖 24 顯示縱使作業環境中氯氣濃度甚低或是瞬間濃度產生，透過即時感測裝置仍可偵測到，但若透過傳統採樣方法即可能無法測得。然而由於氯氣之容許濃度標準之規範為 PEL-Ceiling，因此當作業環境中若突然發生違反法規濃度之氣體洩漏時，本研究所研發之感測器亦能即時監測到該濃度值。

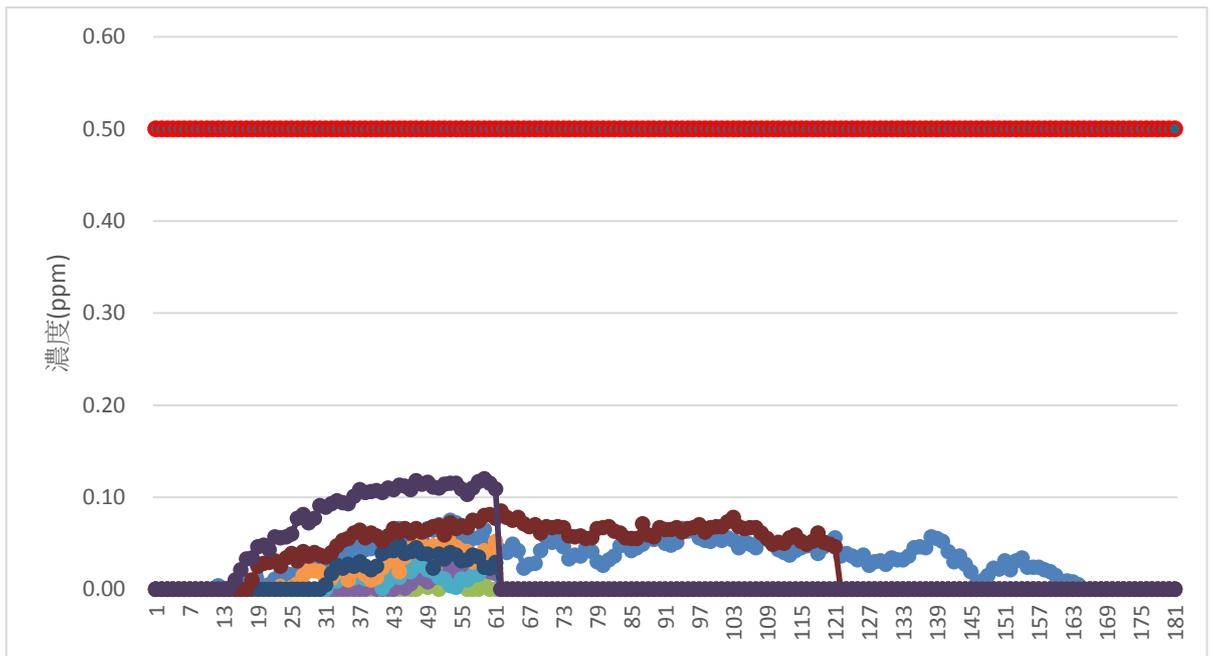
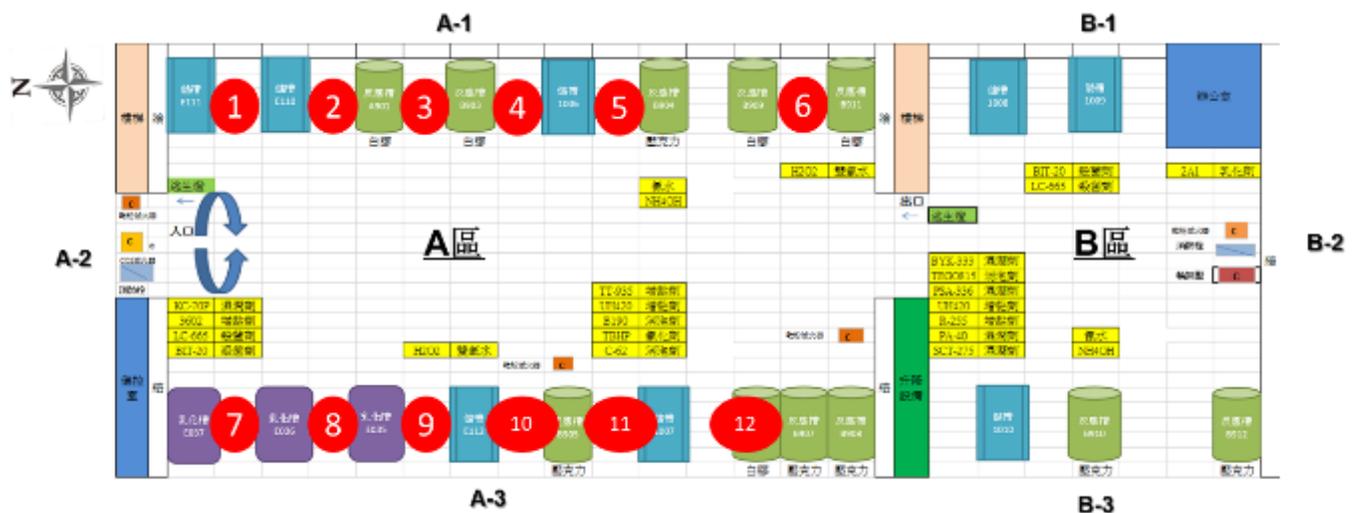


圖 24 運用感測模組監測不同天氣氣濃度變化

### 三、實場連續採樣測試

#### (一)揮發性有機物連續採樣分析

本研究以樹脂廠之白膠製程進行為期兩周 TVOCs 與苯之連續監測，採樣點擺放位置如圖 25。



分析感測裝置於不同天監測之濃度變化情形，在採樣點 11 與採樣點 12 亦監測到相對其他點位有較高之濃度，這與移動式直讀式儀器之結果呈現一致性。另一方面，感測模組於採樣點 1 至採樣點 3 相較於移動式直讀式儀器有較高之濃度分佈，係因移動式直讀式儀器之監測為非連續性監測，只進行上午和下午各一個小時於該場域不同位置之測定結果，因此無法掌握全程之濃度變化。而感測模組細微連續監測，因此可以掌握全程作業期間之濃度變化情形，由於採樣點 1 至採樣點 3 於上午時段會進行開槽加料之操作，若移動式直讀式儀器之測定時間不是落在該時段，亦疏忽了此開槽作業之濃度，而採樣點 11 與採樣點 12 係屬於風向導致污染物蓄積於該處，因此於不同時間點進行測定，皆可掌握其濃度。綜合上述，本研究亦由相關儀器之評估，可確認感測模組可有效協助掌握作業場所污染物於時間與空間之變化情形，圖 26 為利用直讀式儀器與定點式感測模組平行比對結果之相關性，可發現兩者監測方法之濃度分佈結果有很好的相關性。

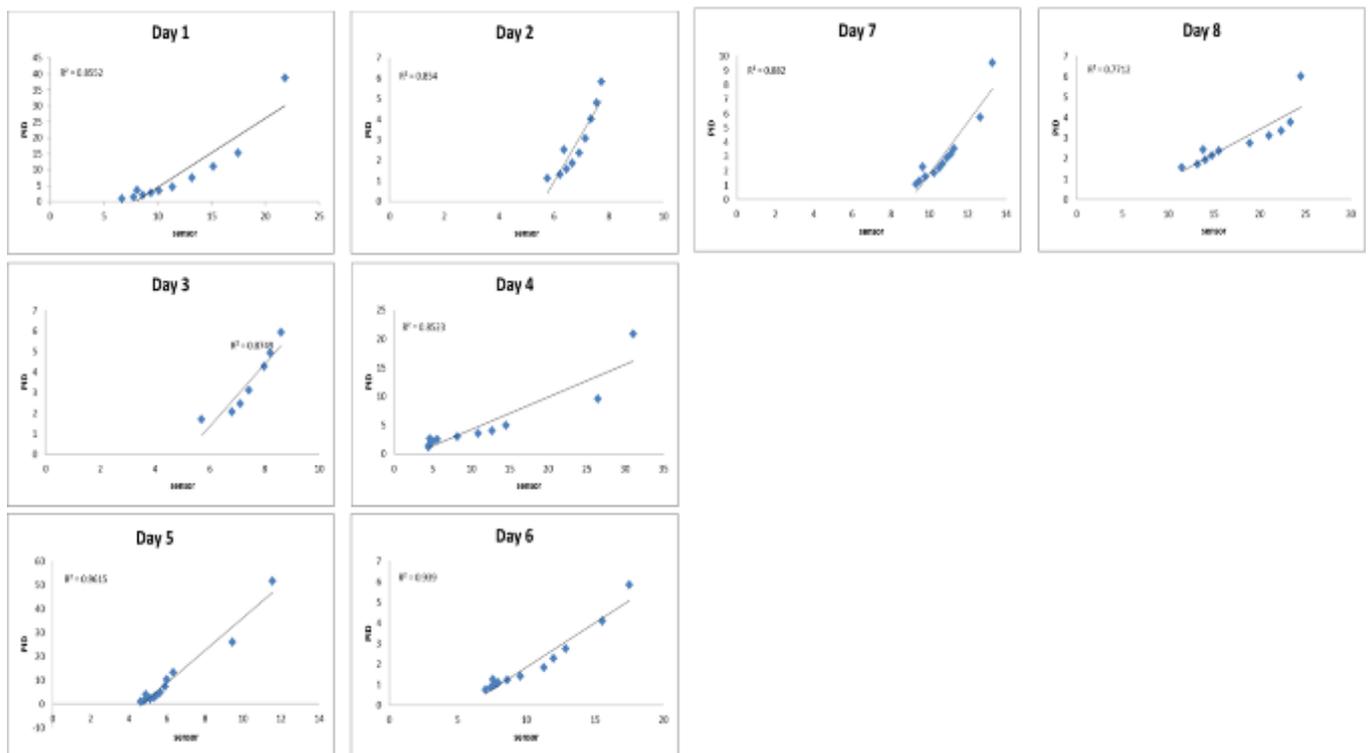


圖 26 感測器及直讀式儀器連續性採樣結果相關性

另比較感測模組於不同位置監測一日 TVOCs 之時間濃度變化情形，可發現現場濃度存在極大之變化，不同位置亦有不同濃度之變化，因此若事業單位僅執行是否符合 PEL-TWA 之評估，無法得知勞工作業期間是否符合 PEL-STEL/PEL-Ceiling 之結果。若作業環境監測可搭配感測模組，將可協助提出更符合作業場所現況之採樣策略。

## (二)細懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)連續採樣分析

進行為期 5 天之連續監測及濃度比對，第一天直讀式儀器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度落在 9~32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而感測器所監測之值落在 10~28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。進一步以散佈圖作為分析依據，透過圖 27 可發現，直讀式儀器與感測器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度非常相近，且  $R^2$  可達 0.81。

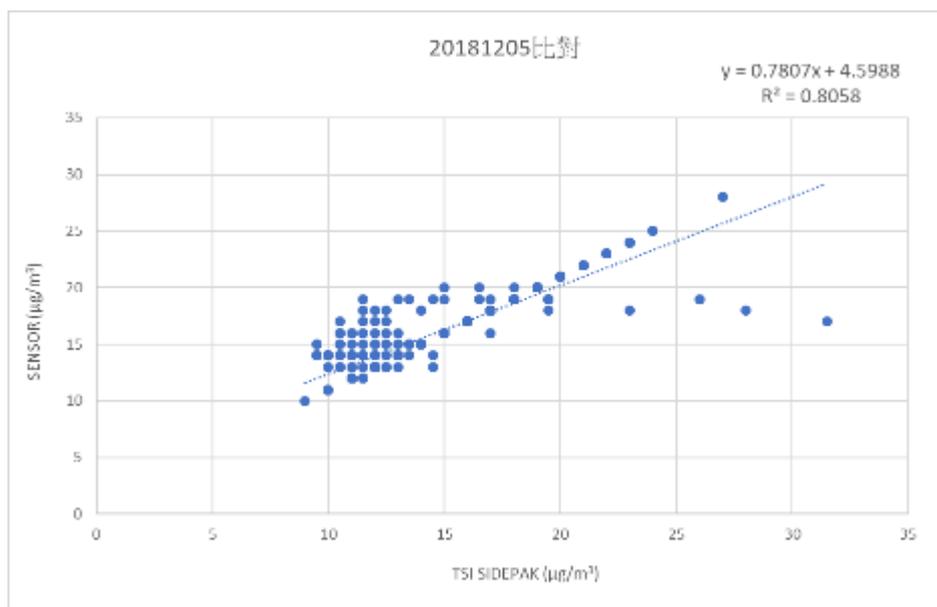


圖 27 Day 1 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖

第二天直讀式儀器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度落在 13~41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而感測器所監測之值落在 16~45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。進一步以散佈圖作為分析依據，透過圖 28 可發現，直讀式儀器與感測器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度非常相近，且  $R^2$  可達 0.95。

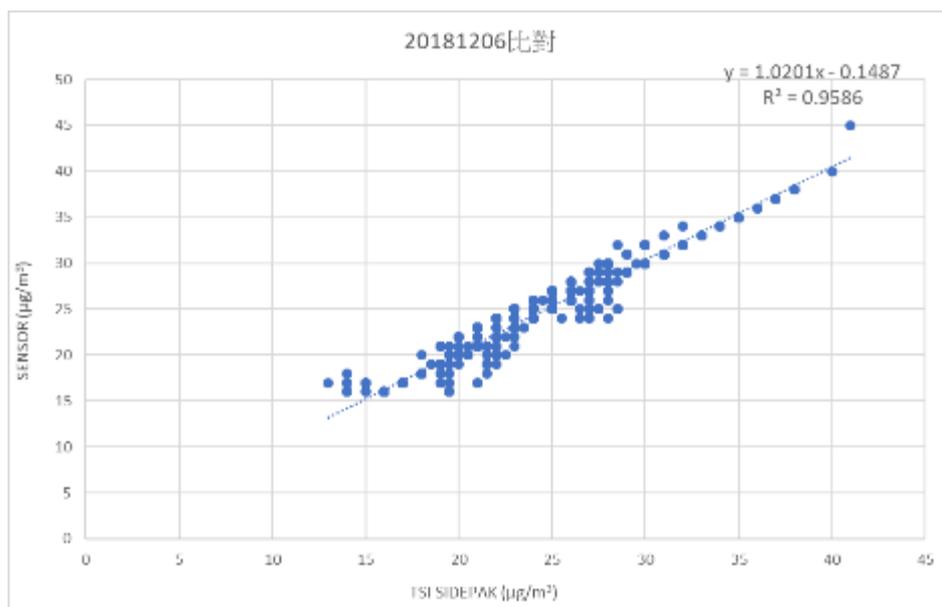


圖 28 Day 2 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖

第三天直讀式儀器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度落在 8~72 µg/m<sup>3</sup>，而感測器所監測之值落在 7~71 µg/m<sup>3</sup>。進一步以散佈圖作為分析依據，透過圖 29 可發現，直讀式儀器與感測器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度非常相近，且 R<sup>2</sup> 可達 0.98。

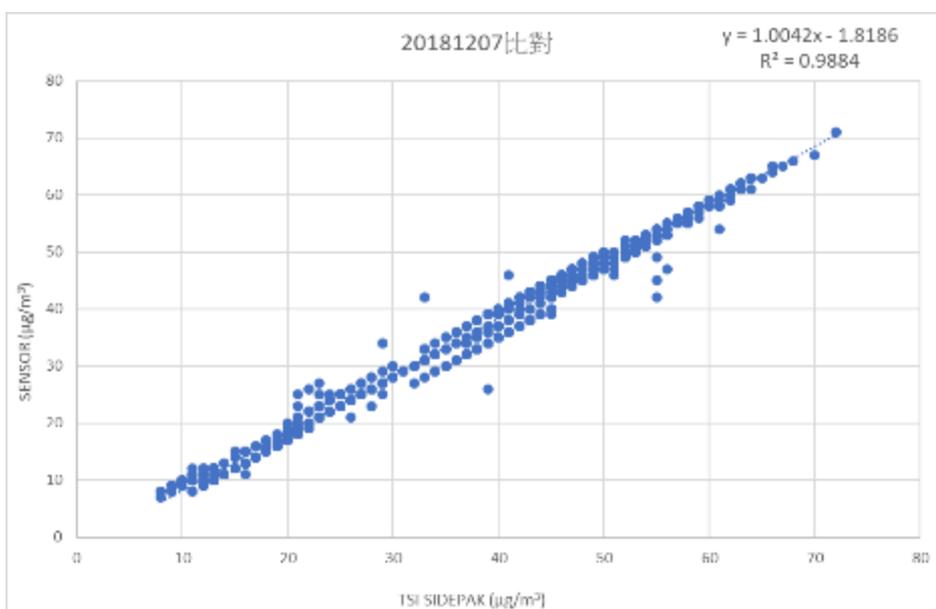


圖 29 Day 3 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖

第四天直讀式儀器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度落在 7~29 µg/m<sup>3</sup>，而感測器所監測之值落在 6~25 µg/m<sup>3</sup>。進一步以散佈圖作為分析依據，透過圖 30 可發現，直讀式儀器與感測器所量測之 PM<sub>2.5</sub> 濃度非常相近，且 R<sup>2</sup> 可達 0.89。

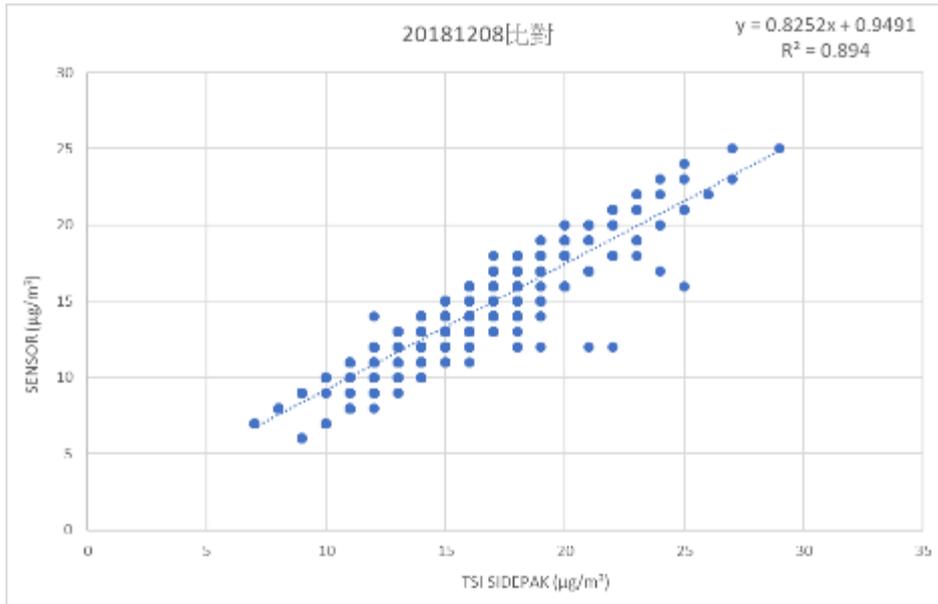


圖 30 Day 4 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖

第五天直讀式儀器所量測之  $\text{PM}_{2.5}$  濃度落在  $7\sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而感測器所監測之值落在  $7\sim 23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。進一步以散佈圖作為分析依據，透過圖 31 可發現，直讀式儀器與感測器所量測之  $\text{PM}_{2.5}$  濃度非常相近，且  $R^2$  可達 0.88。

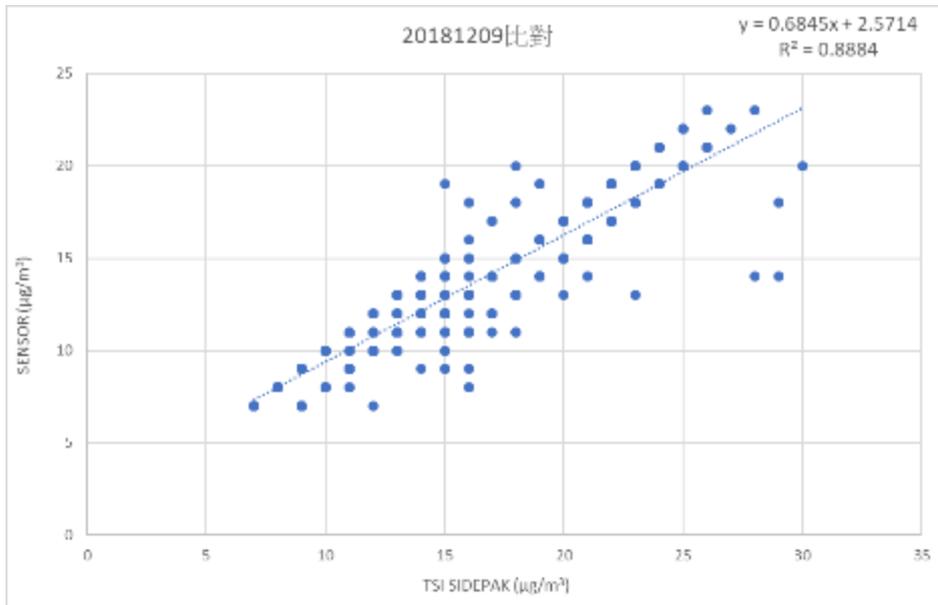


圖 31 Day 5 直讀式儀器與感測器量測濃度比對散佈圖

### 第三節 職場環境監測系統模組建置

#### 一、有害物即時感測雲端系統

研究經由無網傳輸設計開發後，將其蒐集之監測數據上傳至雲端系統，除可進行資料備份外，更可進行相關資訊展示，其在雲端系統建置部分，由於著眼未來的應用多元且情境不一，並不侷限於特定物種或特定場域，以「瀑布式」階段法，先以數據蒐集獲取率、穩定度、進行數據蒐集測試。在數據蒐集獲取率部分，以僅有 5 台同時進行數據蒐集測試，其 24 小時分鐘均値之數據蒐集獲取率為 100%。

由於本研究之雲端系統開發包含資料庫與前端 WebBase 瀏覽介面，實際運行 300 組 IoT(定點式)感測器之資料上傳，並未有數據獲取率降低或通訊干擾問題，其資料傳輸及雲端系統設計如圖 32 所示。

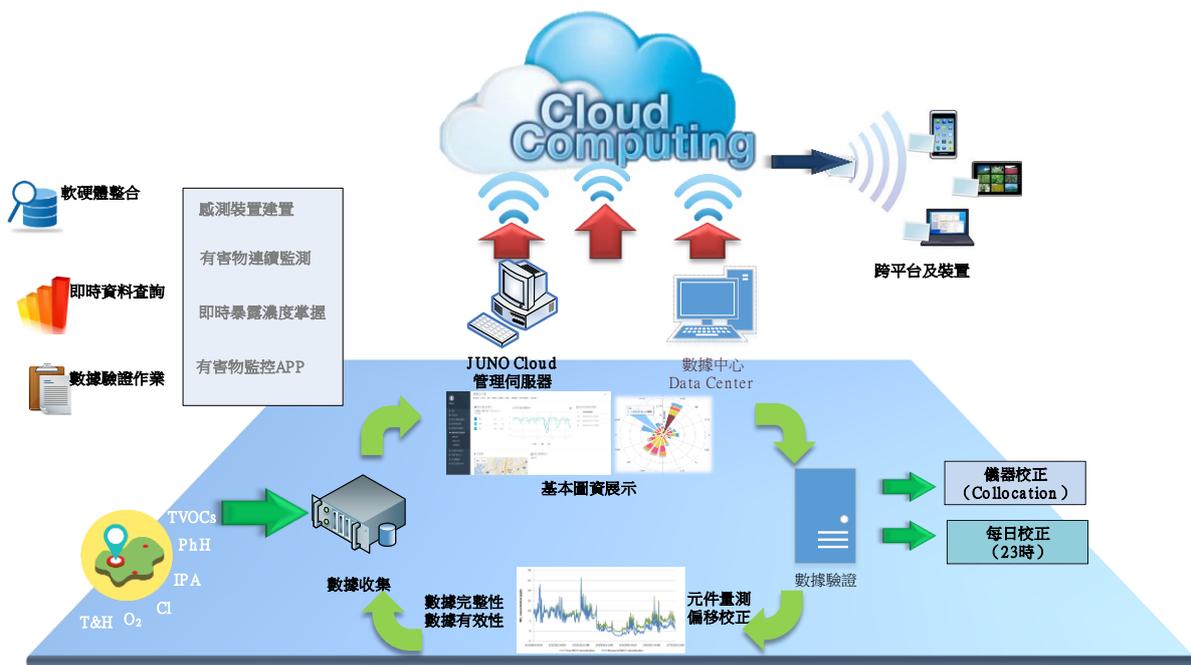


圖 32 感測資料傳輸及雲端系統設計架構

#### (一) 使用者操作介面

1. 以中文語系為主，可依需求調整或擴充其他語言。
2. 首頁可依需求建置消息、感測點(站)連線狀態、氣象、登入紀錄或時間...

等多種功能可擴充。

3. 網頁系統支援跨平台及裝置，提供手持裝置簡易操作介面。支援系統：Windows、MAC OS、Android、iOS...等符合視窗操作並提供瀏覽器功能之系統。
4. 自適應網頁視窗大小調整可視畫面。
5. 列表使用者可讀取之感測點(站)及感測點(站)存取到期日。
6. 使用者自訂帳戶名稱、信箱、電話及照片。
7. 信箱及電話可配合警報系統自訂擴充功能。

## (二) 資料獲取情形

1. 感測點(站)資料更新狀態，列表感測點(站)並檢視每一時間資料表的更新時間及狀態，以四種顏色提示每一資料表更新狀態。
2. 圖表顯示感測點(站)各時間表之資料獲取率，示意圖如圖 33 所示。
3. 感測點(站)地理位置圖。

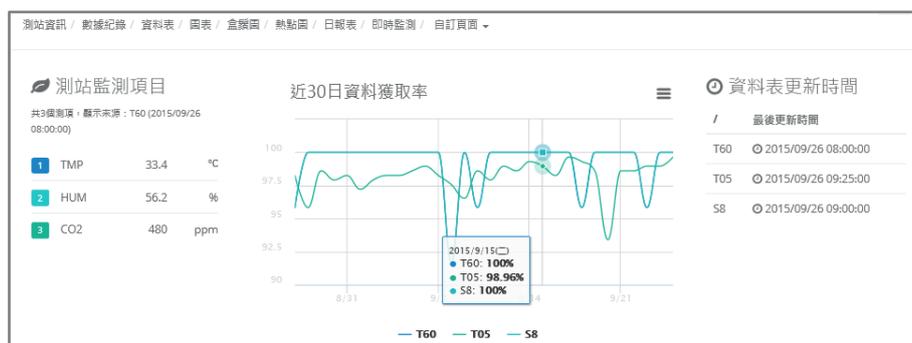


圖 33 感測點(站)各時間表之資料獲取率例圖

## (三) 歷史資料檢視

1. 依數據監測系統所提供之時間類別可選擇分鐘均值、五分鐘均值、小時均值和一日均值等瀏覽資料表。
2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供選取方框選擇欲顯示之測項欄位。
4. 每一欄位可遞增或遞減排序。
5. 數據帶有標記(Flag)欄位，則以高亮度顏色提示。

6. 提供 Excel 格式下載資料表功能。

7. 歷史資料檢視示意如圖 34 所示。

Date/Time	TMP °C	F	HUM %	F	CO2 ppm	F
1 2015/09/26 00:00	30.3		61.2		478.0	
2 2015/09/26 00:05	30.4		60.8		477.0	
3 2015/09/26 00:10	30.6		60.1		481.0	
4 2015/09/26 00:15	30.7		59.7		485.0	
5 2015/09/26 00:20	30.7		59.8		477.0	
6 2015/09/26 00:25	30.7		59.4		479.0	
7 2015/09/26 00:30	30.8		59.4		477.0	
8 2015/09/26 00:35	30.7		59.4		478.0	
9 2015/09/26 00:40	30.8		59.4		478.0	
10 2015/09/26 00:45	30.7		59.4		477.0	
11 2015/09/26 00:50	30.7		59.4		480.0	
12 2015/09/26 00:55	30.7		59.4		482.0	
13 2015/09/26 01:00	30.7		59.4		482.0	
14 2015/09/26 01:05	30.6		60.1		477.0	

圖 34 感測點(站)歷史資料檢視示意表圖

(四) 日報表資料檢視

1. 顯示單一測項之每日二十四小時資料。
2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供下拉選單選擇欲顯示之測項。
4. 每一欄位可遞增或遞減排序。
5. 自動計算查詢區間之資料獲取率。

Date/Time	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	Excel CSV
1 2015/06/28	3.69	3.92	3.59	3.75	3.77	3.71	3.86	3.88	3.66	3.54	3.70	3.81	3.81	3.67	線上列印
2 2015/06/29	3.90	3.85	3.76	3.62	3.94	4.02	3.95	3.79	3.77	3.79	3.67	3.74	3.86	4.17	
3 2015/06/30														3.87	4.11
4 2015/07/01	3.58	3.61	4.06	4.63	4.26	3.98	4.19	4.13	3.93	3.84	3.85	3.82	3.69	3.63	3.78
5 2015/07/02	3.72	3.91	3.74	4.10	4.14	3.84	3.98	4.16	3.81	3.77	3.84	3.96	4.09	3.83	3.87
6 2015/07/03	3.65	3.65	4.29	4.70	4.32	4.35	4.38	5.17	4.68	4.56	3.84	3.81	3.80	4.08	4.47
7 2015/07/04	4.02	4.36	3.81	3.77	4.01	4.15	3.93	5.17	5.76	5.95	4.53	4.40	4.52	7.09	14.45
8 2015/07/05	16.71	20.11	16.52	17.62	16.87	16.23	16.56	16.25	16.59	17.30	15.93	15.77	15.17	13.81	12.08
9 2015/07/06	17.90	18.02	17.83	14.62	13.75	18.25	19.76	16.03	9.72	7.42	10.40	7.09	13.51	9.95	7.00
10 2015/07/07	22.84	23.95	22.66	12.87	18.91	19.60	19.82	8.20	7.99		16.54	18.94	19.91	16.16	15.32
11 2015/07/08	9.03	4.56	4.62	4.95	5.02	5.43	11.59	13.99	10.15	14.28	6.82	6.64	12.71	14.55	18.66
12 2015/07/09	3.91		4.16	4.02	4.38	4.20		4.68	5.45	7.48		14.92	13.84		
13 2015/07/10		9.09	8.66	13.35	15.80	14.72	12.75	17.10	19.44	9.53	11.92	17.74	9.47	5.27	6.23

圖 35 日報表資料檢視示意表圖

(五) 趨勢圖表檢視

1. 依數據監測系統所提供之時間類別可選擇一分鐘、五分鐘、一小時和一日

資料繪製趨勢圖。

2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供選取方框選擇欲顯示之測項欄位。
4. 三種顯示模式：正常模式、多重座標軸模式、座標軸分行模式。
5. 可顯示或屏蔽測項的趨勢線(圖)。
6. 每一測項可設定趨勢線種類：折線圖、曲線圖、折線區域圖、曲線區域圖、柱狀圖、點圖(圓形、方形、菱形、正三角、倒三角)。
7. 提供 PNG、JPEG、PDF、SVG 等四種下載格式。



圖 36 趨勢圖表資料檢視示意圖

## (六) 即時監測數據展示

1. 顯示各感測點（站）及測項之即時測值。
2. 紅色警示即時測值未更新或離線。

測站更新狀態	測站即時監測	測站地理位置
測站代碼	測站名稱	資料表最後更新時間
TNSPWW	南科汙水廠	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:00 T1440: 09/25
TNSPSD	南科員工宿舍	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:01 T1440: 09/25
TNSPIW	南科群創門口	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:01 T1440: 09/25
TNSPRC	南科資源中心	T60: 08/24 T05: 08/24 T01: 08/24
TNSPUMC	南科聯電	T60: 20:00 T01: 21:01 T05: 20:55 T1440: 09/25
TNSPIP	群創水質站	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 00:01 T1440: 09/25
LJSPSD	隆科員工宿舍	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 09/08 T1440: 09/25
TNDYL	蓮爺埕	T05: 07/01

圖 37 即時監測數據展示示意圖

## (七) 監控平台緊急應變訊息

監控平台可針對感測器所監測到之有害物濃度進行緊急應變訊息之發布。

## (八) 監(感)測點地理位置顯示

以圖資方式顯示各感測點（站）地理位置；規劃於建物樓層平面圖顯示目前各監（感）測點之相關位置資訊。

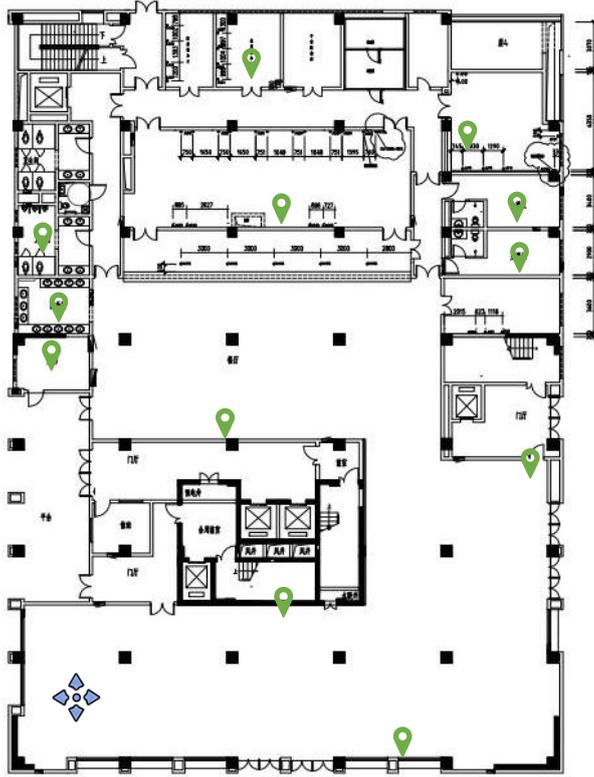


圖 38 感測點建物樓層平面圖顯示

## 二、職場有害物即時監測系統建置與更新

本研究提供系統行動應用服務(APP)，為查看各項監測數據、有害物質及相關統計資訊。透過無線通訊，將攜帶型或固定型感測器所傳送的數據及警訊回傳至中控室的雲端系統。當勞工進入工作區域(或開啟感測器運行功能)時，一旦發生有緊急狀況(濃度超標)，系統發出警報，同時在後端的監控中心，可以讓管理員透過網頁以及系統行動應用服務(APP)查詢顯示人員環境的濃度、後端管理與分析系統以方便觀看配帶感測器狀態。

目前已開發 Android 系統所使用的行動 APP，可透過智慧型手機連結現場感測裝置，經由手機螢幕呈現污染物即時監測數值，具有即時、快速及便利等優點，本節針對行動 APP 設計、介面介紹為主，以下提出設計說明。

### (一) 職場有害物即時監控系統-介面說明

1. 進入畫面首頁，功能：設備連結、智慧感測及系統設定。
2. 智慧感測：所有上線中的感測器即時讀值之顯示。
3. 風險評估：根據感測器各測項之即時數據推估現場作業風險等級。



圖 39 職場有害物即時監控系統首頁

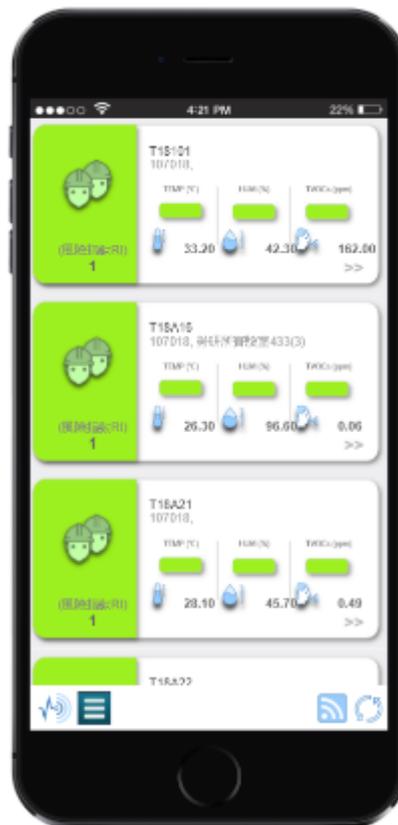


圖 40 職場有害物即時監控系統智慧感測數據顯示

- 現場監測資訊與監測項目：可從手機 APP 中觀察目標汙染物之即時濃度值，測項包括：溫度、濕度、總揮發性有機物 TVOCs、異丙醇 IPA、氯與細懸浮微粒 PM<sub>2.5</sub> 等。
- 風險評估：根據感測器各測項之即時數據推估現場作業環境有害物暴露風險等級。

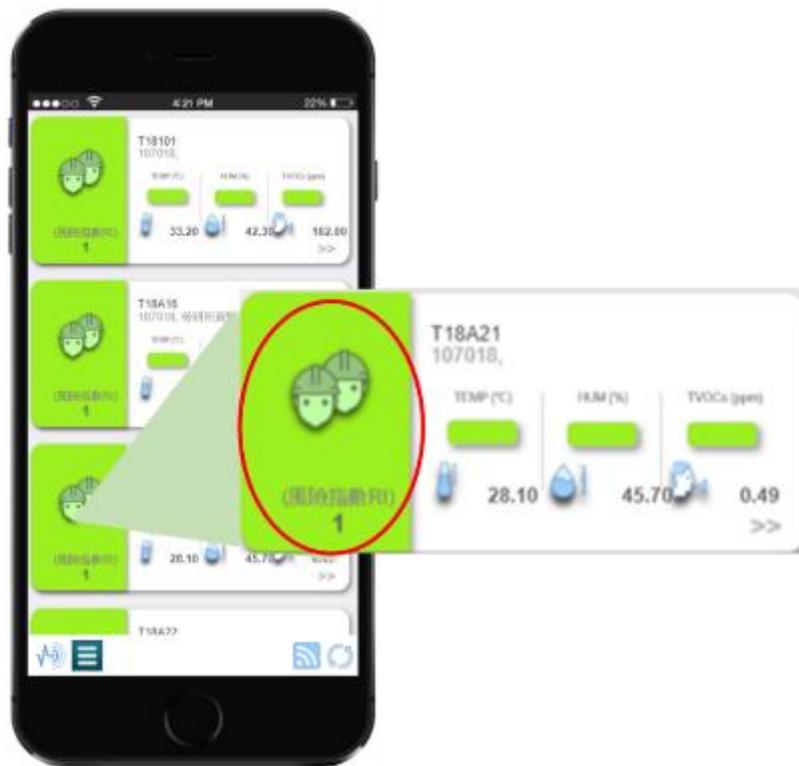


圖 41 職場有害物即時監控系統監測資訊

- 數據手動更新鍵：點選後監測數據將會更新，點選各感測器即時數值亦會同時更新最新數據。



圖 42 職場有害物即時監控系統顯示頁面

7. 警報功能：根據法規濃度限制，當超標時發出警報警訊，並以圖示與顏色區分風險暴露等級之不同。
8. 即時測值會依據現場監測數值，持續更新最新數據。



圖 43 職場有害物即時監控系統警報功能操作說明

9. 場域客製化感測器分布圖：依據感測器佈點場域現場平面圖客製化感測器分布圖並配有即時測值之顯示。



圖 44 根據不同場域客製化感測器分布圖

10. 勞研所最新消息公布：提供使用者關於勞研所最新訊息之公布。



圖 45 勞研所最新消息公布欄

## 第四節 產品效益分析與初步推廣

本研究透過多場次專家會議，邀集職業安全衛生、作業環境測定、資通訊及物聯網應用等不同領域專家參與，進行本研究發展之職場有害物即時監測系統之產品效益分析與未來推廣規畫，進行感測裝置之組合規劃及市場發展分析。本研究整合感測及通訊模組，設計不同偵測項目之感測產品:IOS-P5CD、IOS-P5AM、IOS-P5BM、IOS-P5BM2、IOS-P5AM，以下針對可應用之場域進行應用說明。

### 一、高濃度粉塵監測及預防粉塵爆炸之感測裝置產品

粉塵作業場所係指「粉塵危害預防標準」中表列之作業場所，一般而言可依其產生機制分為物理性、化學性及生物性產生，物理性多為機械力產生，如採掘礦物、研磨材料等，化學性多為燃燒反應，生物性則是其本身是生物或是生物體所衍生之粉塵，粉塵危害可能影響勞工的健康及安全。以下以倉儲作業場域為例加以說明。

#### (一) 作業場域之危害

##### 1. 健康危害

倉儲下料作業工人在糧食進出糧倉、平堆作業、扒溝作業、加工等過程中會接觸到大量的混合粉塵，其成分主要包括糧食穀物的殼、皮、毛刺等，糧食中混雜的泥砂亦同時夾雜一些砷、鉛、錳等金屬。穀物粉塵在職業健康監護技術規範中將其歸為有機粉塵中的植物性粉塵，其可對人體引起刺激、纖維化作用，勞工若經長期暴露，最後將發展為職業性哮喘或者職業性急性變應性肺泡炎。

##### 2. 工安危害

糧食倉儲作業通常在高溫季節進行糧食入庫，糧倉內溫度可接近 35-40°C，現場作業人員將會暴露在高溫之下。且植物性粉塵包括：木粉、麵粉、玉米粉等皆為常見會引起爆炸之可燃性懸浮粉塵，而除去環境中粉塵濃度，氧氣含量亦會影響。空氣中雖然氮氣佔了近八成，氧氣已經被稀釋到只剩下兩成，但當粉塵與空氣的混合比率

達到其爆炸上下限之間時，不需要很大的火，只需要夠高的「溫度」—諸如火柴、煙蒂、甚至是靜電，就會引發爆炸發生。

## (二) 作業場域之限制條件

在粉塵作業場域中(以倉儲作業為例)，要以感測裝置產品來監測高濃度粉塵及預防粉塵爆炸之條件包含以下幾點：

### 1. 通訊限制

倉儲下料通常因現場作業環境無法提供 Wi-Fi 訊號，但在通訊上無任何限制，如現場作業環境 4G 收訊佳，在通訊模組的選用上可使用 NB-IoT 模組架構進行數據之即時回傳，以利提供使用監測平台進行數據監測。

### 2. 濃度水準

粉塵作業場域中粉塵濃度較一般作業場域濃度高出許多，故可使用 ONEAIR A5 感測元件，其 PM 偵測極限可達  $6,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。一般粉塵作業場域之最高濃度應仍大致低於感測元件之偵測極限。

### 3. 防爆

粉末狀之可燃性固體在空氣中以分散懸浮狀態存在並結合空氣中的氧氣，其危險程度已與混合爆炸氣體相同，當有火源且達到最小引火能量時，則會引起粉塵爆炸，而造成財產損失甚至是人員傷亡。因此，在粉塵製程中，對於火災爆炸的預防不容忽視，應減少現場任何發火源以降低危害，有鑑於此，所使用之感測器應送防爆測試進行驗證。

### 4. 氧氣含量

作業環境中存有可燃性粉塵，並在特定空氣含量時，則僅需微小火源即可造成粉塵爆炸，因此現場作業環境中氧氣含量亦非常值得去關注，若現場氧氣濃度超過限氧濃度時，則存有潛在的火災和爆炸危害，故所使用之感測裝置產品需有氧氣之感測元件。有相關研究指出，除金屬、有機粉塵外大部分粉塵環境，限氧濃度低於 12-13%，較不可能發生火災爆炸

## 5. 人員作動與救援定位

粉塵於作業場域中可能因散射，影響人員於作業場域的能見度，可能影響產能。另外若發生意外執行緊急應變等救援活動時，提供即時的場域人員定位，將可以極大程度的提高救援效率。

### (三) 設計考量及應用技術

#### 1. 防爆、防靜電

- (1) 低電壓電路設計，最高電壓不超過 5.2V。
- (2) 外殼採 PC(聚碳酸酯)與 ABS 合成之阻燃級材料，強度高(抗拉伸、抗彎曲強度大於 56MPa)，短期使用溫度可耐 100°C，但長期使用仍建議不超過 70°C。
- (3) 裝置設置有靜電接地中和電荷點。
- (4) 預防粉塵爆炸。

#### 2. 數據顯示

- (1) 裝置(區域定點式)設計有清楚與快速辨識之數據顯示。
- (2) 此場域應用可搭配外接式之平板電腦做為現場感測數據顯示。

#### 3. 裝置選用

針對此類作業環境，考慮現場粉塵主要來源為倉儲之製程機台設備，選用 IOS-P5CD 此一型號的固定式感測器，其配備感測模組如下表 8。

表 8 裝置 IOS-P5CD 規格型號表型式與對應模組規格

型號	類別	規格內容
IOS-P5CD	物理感測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 溫度感測元件</li> <li>● 濕度感測元件</li> <li>● 三軸加速感測元件</li> <li>● GPS 定位元件</li> </ul>
	場域感測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 懸浮微粒(PM)感測元件(ONEAIR A5)</li> <li>● 氧氣(O<sub>2</sub>)感測元件(AlphaSense)</li> <li>● 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件(MS1100)</li> </ul>
	通訊技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NB.IoT 通訊模組(數據蒐集)</li> <li>● 藍芽通訊(近場資訊顯示)</li> </ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 防爆、防靜電等級</li> </ul>

## 二、化學品逸散監測與具濃度超標警訊推播之感測產品

### (一) 作業場域之危害

#### 1. 人體危害

化學實驗室潛在危害種類繁多，包括生物性、化學性、物理性、人因及廢棄物等。這類潛在危害因子，諸如破玻璃、切割工具、粉塵、不平滑地面、接地絕緣不良、電擊及其他危害物包括易燃物、腐蝕物、毒性化學物質、放射性物質等均有機會造成不同程度的危害。其中化學實驗室內常見之藥品逸散等化學性危害可細分為毒性及危害性，因人體吸入、食入、皮膚噴濺或經由其他途徑與化學物質接觸，而導致的中毒或腐蝕等類型的傷害，此類即為毒性。因此，在化學實驗室中藥品櫃是否無任何藥品之逸散是非常值得注意之議題。

## 2. 工安危害

由於使用化學物質時，因化學變化中放出的能量，所引起的災害，例如：火災與爆炸意外此類為危害性，因此在化學實驗室中常見之鋼瓶是否發生洩漏，其濃度是否引發爆炸亦為非常值得關注之議題。

### (二) 現場場域之限制條件

在化學品逸散預警作業場域中(以化學實驗室作業為例)，要以感測裝置產品來監測高濃度化學品及預防儲放逸散洩漏風險之條件包含以下幾點。

#### 1. 濃度水準

化學品作業場域中主要分有機溶劑作業與無機溶劑作業，及其儲放場域洩漏風險。一般雖配有有固定通風(Vent)裝置避免高濃度累積，單因分析實驗等相關作業及人為對於實驗 SOP 熟練度，可能造成局部區域高濃度累積。有別於商購工安警示檢知點，因其偵測極限(MDL)關係，其在正常作業環境對有機溶劑或無機溶劑之感測值多為 0，以致在正常作業環境中，未能有效辨識其環境中濃度變動之趨勢。本研究研發之感測裝置因偵測極限(MDL)較低，故可隨時感知環境中濃度水準變動情勢。

#### 2. 防爆

化學品作業場域中，對爆炸與火災之預防為重要之防範對策之一，因此所使用之感測器須為防爆等級。

#### 3. 作業場域中之人員管制

化學品作業場域設有人員刷卡進出門禁管制。結合區域定點式與場域人員進出狀況，一旦發生危急情況，於作業場域之人員急需救援時，場域人員數量為救援情勢之所需資訊。

### (三) 設計考量及應用技術

## 1. 數據顯示

- (1) 裝置(區域定點式)設計有清楚與快速辨識之數據顯示。
- (2) 此場域應用可搭配外接式之平板電腦做為現場感測數據顯示。
- (3) 配合超標之警訊推播功能。

## 2. 裝置選用

針對此類作業環境，考慮實廠化學實驗室作業，選用 IOS-P5AM 此一型號的固定式感測器，其配備感測模組如表 9。

表 9 裝置 IOS-P5AM 規格型號表型式與對應模組規格

型號	類別	規格內容
IOS-P5AM	物理感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 溫度感測元件</li><li>● 濕度感測元件</li><li>● 三軸加速感測元件</li><li>● GPS 定位元件</li></ul>
	場域感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件 (MS1100)</li><li>● 異丙醇(IPA)/苯(Benzene)感測元件擇一 (AlphaSense)</li><li>● 氯氣(Cl<sub>2</sub>)/氧氣(O<sub>2</sub>)感測元件擇一 (AlphaSense)</li></ul>
	通訊技術	<ul style="list-style-type: none"><li>● WiFi 通訊模組(數據蒐集)</li><li>● 藍芽通訊(近場資訊顯示)</li></ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"><li>● 防爆、防靜電等級</li><li>● 結合場域門禁管制系統</li></ul>

## 三、低濃度揮發性有機化合物監測與提高生產良率之感測產品

### (一) 作業場域之危害

## 1. 人體危害

一般而言，半導體製造業作業場域空氣中有害物濃度可能遠低於職業暴露限值，但製程中會使用複雜的化學物質，伴隨多種副產物的產生，其多重化學暴露之健康危害仍值得重視。特別是黃光區廣泛使用多種揮發性有機化合物，其中部分已經被證實會對人體造成不良的健康效應。黃光製程的部份則主要是使用光阻液、去光阻劑等有機溶劑所衍生的可能危害，另外由於機台過於密集，一旦操作程序出問題或處於維修保養時，可能造成作業環境現場揮發性有機化合物暴露濃度較高。

## 2. 工安危害與製程良率

另隨著產業進步，對作業場域的環境要求也隨之增加，以半導體產業為例，潔淨度要求愈加嚴謹，相關偵測技術也變得更加重要，因此，如何監控環境微量揮發性有機氣體，將成為下一代製程的重要檢測要點。以黃光製程為例，黃光區進行晶圓(wafer)的沖洗動作時，主要是利用化學藥劑包括：丙酮(Acetone)、異丙醇(IPA)將晶圓(wafer)表面的有機物或無機物清除，避免晶圓(wafer)表面的雜質影響後續的微影製程。此外，環境監測與管控所蒐集的相關參數，如能提供長期監測數據，透過大數據演算後回饋到控制生產製程，進一步優化生產流程，並控制產品品質，藉此達到提升產品良率效益。

有害物監測參數：總揮發性有機化合物(TVOCs)、異丙醇(IPA)

## (二) 現場場域之限制條件

### 1. 通訊限制

大部分的無塵室廠房因為電子及機械設備較多，加上建築物本身設計會有很多金屬性的管線，會干擾無線電的傳送造成無線資料傳輸時受到干擾而出現資料缺失。另外多數高科技廠，因商業機密考量不

開放外部網路傳輸資料，因此此類場域大多禁用無線通訊功能。

## 2. 濃度分布

透過於某高科技產業(黃光製程)中所進行的長期監測，由數據結果可得知勞工於作業場域中總揮發性有機化合物(TVOCs)暴露濃度均相當低，平均濃度約落在 0.03~0.19 ppm 之間。故所使用之有害物感測元件應有較低之偵測極限及較短之反應時間。

## 3. 警訊推播

當操作程序出問題或處於維修保養，以致作業環境現場揮發性有機化合物暴露濃度較高時，應能發出警報通知，提醒該作業場域之作業人員即時做出應變措施，以降低污染物影響後續生產製程，藉此達到提升產品良率效益。

### (三) 設計考量及應用技術

因此針對此類作業環境，考量通訊限制及待偵測之有害物濃度分布，因此選用 IOS-P5BM 此一型號的固定式感測器，其詳細規格內容如下表 10。

表 10 裝置 IOS-P5BM 規格型號表型式與對應模組規格

型號	類別	規格內容
IOS-P5BM	物理感測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 溫度感測元件</li> <li>● 濕度感測元件</li> <li>● 三軸加速感測元件</li> <li>● GPS 定位元件</li> </ul>
	場域感測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件 (MS1100)</li> <li>● 異丙醇(IPA)感測元件(AlphaSense)</li> </ul>
	通訊技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● WiFi 通訊模組(數據蒐集)</li> <li>● 藍芽通訊(近場資訊顯示)</li> </ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 防爆、防靜電等級</li> <li>● MicroSD 記憶卡槽</li> </ul>

#### 四、具高濃度揮發性有機化合物監測與預防揮發性氣體爆炸之防爆型感測產品

##### (一) 作業場域之危害

##### 1. 人體危害

黏著劑製程產生的有機溶劑容易形成逸散，加深對人體的危害，其成份包括：苯、丙酮、二甲苯、乙醇、甲醇、甲醛、乙烯、甲苯等等。根據物質安全資料表（SDS），此類化學物質危害人體健康的狀況效應包含：急性吸入所造成之呼吸困難，嚴重鼻、咽及氣管灼熱感與咳嗽。而製程中所產生許多的 VOCs 具有極高的揮發性，當達一定的條件（如溫度、濃度等）時就有可能產生爆炸；許多的 VOCs 也有極低的氣味低限，又加上製程上常有加熱過程，所以更加速了臭味

的產生並增加作業環境發生爆炸之風險。

## 2. 工安危害

黏著劑製程為有許多產業大量使用有機溶劑於其製程中，如化工廠、高科技廠、印刷業、塗裝業及樹脂製造業等，其中又以傳統產業，因其製程需求及環境條件，可能在使用化學品時，亦有較高的濃度(大面積製程、高溫、控制設備不佳等)，可能帶來安全與健康上的疑慮，尤其有機溶劑多為可燃性液體，其可能帶來火災及爆炸之危害性亦不容忽視，此外對於勞工暴露濃度所帶來的健康影響亦須關注，因此若能提供長期監控數據，結合物聯網，提供預警防止火災爆炸危害，亦能協助廠方日常管理。

有害物監測參數：總揮發性有機化合物(TVOCs)、異丙醇(IPA)、苯(Benzene)。

### (二) 現場場域之限制條件

#### 1. 通訊限制

此類有機溶劑作業場域大多禁用無線通訊功能。

#### 2. 濃度分布

由於其操作程序，會頻繁開啟反應槽進行加料、取料及觀察等動作，故現場濃度變異性極大，且濃度可能高於法定值數倍，故選用之感測器濃度上限高較合適此場域。

#### 3. 氧氣含量

作業環境中存有可燃性氣體，並在特定空氣含量時，則僅需微小火源即可造成火災爆炸，因此現場作業環境中除了可燃氣氣體濃度及引火源外，氧氣含量亦非常值得去關注。過去已有相關研究，針對可燃性氣體發生燃燒反應所需氧氣含量實驗(如下表所示)，若現場氧氣濃度超過限氧濃度時，則存有潛在的火災和爆炸危害，故所使用之感測裝置產品需有氧氣之感測元件。

#### 4. 防爆

有機溶劑作業場域中一旦發生揮發性氣體爆炸進而引起火災，可因其處置量，不但使成品燒毀，甚至可使設備遭受毀滅性之破壞或造成人身事故。因此，在大量使用有機溶劑之黏著劑製程中，對爆炸與火災之預防為重要之防範對策之一。

#### (三) 設計考量及應用技術

此針對此類作業環境，考量通訊限制及待偵測之有害物濃度分布，因此選用 IOS-P5BM2 此一型號的固定式感測器，其詳細規格內容如下表

11。

表 11 裝置 IOS-P5BM2 規格型號表型式與對應模組規格

型號	類別	規格內容
IOS-P5BM	物理感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 溫度感測元件</li><li>● 濕度感測元件</li><li>● 三軸加速感測元件</li><li>● GPS 定位元件</li></ul>
	場域感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件 (MS1100)</li><li>● 異丙醇(IPA)/苯(Benzene)感測元件擇一 (AlphaSense)</li></ul>
	通訊技術	<ul style="list-style-type: none"><li>● WiFi 通訊模組(數據蒐集)</li><li>● 藍芽通訊(近場資訊顯示)</li></ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"><li>● 防爆、防靜電等級</li><li>● MicroSD 記憶卡槽</li></ul>

根據勞工作業環境監測實施辦法中規範有機溶劑作業場域，每半年進行一次作業環境監測。而每半年一次委託勞動部認可之作業環境監測機構執行

監測，其監測結果僅能得知監測期間內(6 到 8 小時)有機溶劑的平均濃度，甚至導致所得結果低於偵測極限。此外傳統採樣分析方法之結果為採樣期間之平均濃度，並無法得知因工作量不同、反應槽運作數量不同、維修保養期間及突發狀況所帶來的瞬間濃度波動。

未來此項產品可運用於高濃度總揮發性有機物的作業場域進行長期監測，對於需嚴格要求其濃度分布情況之防爆區域，其能提供逐時監測結果，以利廠方日常管理及勞工健康管理。且本項產品同時具有量測溫度、濕度功能，針對廠方需求搭載不同元件，可針對不同場域類型進行不同揮發性有機物監測。

## 五、具有害物監測及風險分級之感測產品

### (一) 作業場域之危害

#### 1. 人體危害

半導體金屬蝕刻製程中主要使用氯氣( $\text{Cl}_2$ )、氯化硼 ( $\text{BCl}_3$ )等氣體，以高能電漿(plasma)離子化產生自由基後使其與晶圓表面之鋁反應將多餘鋁蝕刻而產生溝槽。為維持晶圓生產良率須定期進行機台腔體的預防維修保養，主要清除機台反應腔壁所附著製程副產物。在打開密閉反應腔及擦拭腔壁時會產生及刺鼻味道且含有  $\text{HCl}$ 、 $\text{HCN}$ 、 $\text{CNCl}$  等毒性氣體逸散至清潔室，進而影響勞工健康危害。

#### 2. 工安危害

半導體生產製程包含精密的微機電和積體電路，對於生產環境之潔淨度的要求特別嚴格，因此整個製造過程都必須在嚴格控制的環境條件下進行。隨著製程特徵尺寸 (feature size) 快速縮小，潔淨室環境空氣品質的要求也更為嚴苛。潔淨室環境之可能 VOC 污染源，包括了潔淨室外之汙染氣體、製程反應逸散、設備材料本身揮發產生

及設備維護過程氣體揮發等。雖然半導體製程中所使用到化學品的儲存量與使用量皆小於化學或石化工業所處理使用量，但是由於製程中所使用之化學品具有著火性、可中毒、缺氧等潛在危害，製程單元一旦發生洩漏，除了導致人員傷亡外，甚至可能造成影響生產良率之重大財產損失。

由上可知蝕刻製程作業場所中要有之監測參數包括：製程化學品逸散與洩漏、總揮發性有機化合物(TVOCs)、氯氣(Cl<sub>2</sub>)。

## (二) 現場場域之限制條件

感測裝置產品來監測蝕刻製程作業場所有害物並具風險分級功能之條件分述如下。

### 1. 通訊限制

大部分的無塵室廠房因為電子及機械設備較多，加上建築物本身設計會有很多金屬性的管線，會干擾無線電的傳送造成無線資料傳輸時受到干擾而出現資料缺失。另外多數高科技廠，因商業機密考量不開放外部網路傳輸資料，因此此類場域大多禁用無線通訊功能。

### 2. 濃度分布

透過於某高科技產業蝕刻製程中所進行的長期監測，由數據結果可得知勞工於作業場所中氯氣暴露濃度均相當低，平均濃度約落在0~0.08 ppm 之間。雖然整體濃度均相當低，但在監測過程中仍有相對較高之濃度值出現。

### 3. 短時間時量濃度及風險等級

職業安全衛生法第十一條中指出雇主對於具有危害性之化學品，應依其健康危害、散布狀況及使用量等情形，評估風險等級，並採取分級管理措施。另勞工作業場所容許暴露標準第八條亦提到勞工作業環境空氣中有害物之濃度應符合下列規定：

- (1) 全程工作日之時量平均濃度不得超過相當八小時日時量平均容許濃度。
- (2) 任何一次連續十五分鐘內之時量平均濃度不得超過短時間時量平均容許濃度。
- (3) 任何時間均不得超過最高容許濃度。

因此，若進行現場勞工之暴露評估時，僅依賴樣本數少且採樣頻率不高的傳統採樣進行分析，要掌握勞工之暴露實態有其難度，更難以構建長期暴露資料庫分析勞工之長期暴露風險，而無法評估暴露風險則難以評估風險等級以進行風險管理。另傳統採樣分析為進行監測期間內(6 到 8 小時)有害物之平均濃度，亦無法獲得短時間時量平均容許濃度及最高瞬時濃度。

### (三) 設計考量及應用技術

透過上述敘述我們可以得知，在高科技產業(蝕刻製程)中預期會暴露之危害為在製程中使用的化學品包括：總揮發性化合物(TVOCs)、氯氣(Cl<sub>2</sub>)之逸散與洩漏。因此針對此一作業環境類型，考慮現場作業人員需要在不同機台之間移動，且製程設備中機台外的化學品逸散濃度亦會造成污染並降低產品良率。因此本研究選用 IOS-P5AM 此一型號的個人背戴式感測器版本用以監測勞工作業時間內暴露情形。

#### 1. 通訊限制

大部分的無塵室廠房因為電子及機械設備較多，加上建築物本身設計會有很多金屬性的管線，會干擾無線電的傳送造成無線資料傳輸時受到干擾而出現資料缺失。因此此類場域大多禁用無線通訊功能。本研究亦針對此一困境做出努力，於感測器中增設記憶卡(MicroSD)槽模組，具備儲存資料及讀取功能，可以平均分鐘值為資料解析度進行數據紀錄，月資料量約 30Mb，並搭配 8GB 容量記憶卡，可儲存

10 年或以上數據資料。

## 2. 警訊推播

在配戴本研究所開發之個人背戴式感測器後，若在進行腔體清潔時勞工所暴露之氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度高於 0.5 ppm 時或在進行機台操作時總揮發性有機化合物(TVOCs)每小時平均濃度高於 0.56 ppm 時會發出警報通知，提醒該作業場域之作業人員即時做出應變措施，可大幅降低勞工於作業環境中氯氣(Cl<sub>2</sub>)與總揮發性有機化合物(TVOCs)的暴露危害風險。

因此針對此類作業環境，考量通訊限制及待偵測之有害物濃度分布，因此選用 IOS-P5AM 此一型號的固定式感測器，其詳細規格內容如下表 12。

表 12 裝置 IOS-P5AM 規格型號表型式與對應模組規格

型號	類別	規格內容
IOS-P5BM	物理感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 溫度感測元件</li><li>● 濕度感測元件</li><li>● 三軸加速感測元件</li><li>● GPS 定位元件</li></ul>
	場域感測	<ul style="list-style-type: none"><li>● 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件 (MS1100)</li><li>● 氯氣(Cl<sub>2</sub>)感測元件(AlphaSense)</li></ul>
	通訊技術	<ul style="list-style-type: none"><li>● WiFi 通訊模組(數據蒐集)</li><li>● 藍芽通訊(近場資訊顯示)</li></ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"><li>● 防爆、防靜電等級</li><li>● MicroSD 記憶卡槽</li></ul>

依據職業安全衛生法第十一條中指出雇主對於具有危害性之化學品，應依其健康危害、散布狀況及使用量等情形，評估風險等級，並採取分級管理措施。而傳統採樣方法為每半年一次委託檢測，且其監測結果僅能得知監測期間內(6 到 8 小時)有害物的平均濃度，對於勞工實際暴露情況之代表性不足。此外傳統採樣分析方法之結果為採樣期間之平均濃度，並無法得知因工作量不同、反應槽運作數量不同、維修保養期間及突發狀況所帶來的瞬間濃度波動。依前述法規之規範，本研究所開發之作業環境有害物智慧監測系統所進行之定量環境監測，依測定結果與推估結果，進行與容許濃度比較，以進行分級管理。

- (1) 第一步參考「危害性化學品評估及分級管理技術指引」，雇主對各相似暴露族群，應依其暴露實態之第 95 百分位值 ( $X_{95}$ )，對照該化學品之容許暴露標準(PEL)，依表 13 進行作業場所評估結果分級。
- (2) 第二步進行各危害物之毒性分級。危害物的毒性效應是造成健康風險的重要參數，各相似暴露群所接觸的危害物可以依表 14 的方式或其他標準區分危害等級。
- (3) 第三步將上述暴露及危害物毒性分級綜合計算，以進行整體健康風險分級。健康風險是個人暴露量與危害物毒性相互作用綜合而成的結果，因此利用健康風險等級(Health Risk Rating)=暴露等級(Exposure Rating)×危害物毒性等級(Health Effect Rating)之關係式推論各暴露群之整體健康風險等級(見表 15)。

表 13 相似暴露族群暴露實態等級劃分

範圍	評估結果分級
$X_{95} < 0.5 \text{ PEL}$	第一級
$0.5 \text{ PEL} \leq X_{95} < \text{PEL}$	第二級
$X_{95} > \text{PEL}$	第三級

表 14 危害物毒性分級（AIHA 之分級標準）

分級	危害效應
4	威脅生命，產生嚴重的傷害或疾病
3	具有不可逆的健康效應
2	具嚴重的可逆的健康效應
1	具一般的可逆健康效應
0	輕微且可逆的健康效應或不致嚴重影響健康

表 15 潛在健康風險矩陣示意

危害物 毒性 等級	4	4	8	12
	3	3	6	9
	2	2	4	6
	1	1	2	3
	0	0	0	0
		1	2	3

## (一) APP 風險評估之計算

### 1. 暴露實態之第 95 百分位值之計算 ( $X_{95}$ )

感測器設定為一分鐘可得一筆有害物濃度監測數據，開始監測後第二分鐘開始計算暴露實態之第 95 百分位值，將所監測之數據由小排至大得出第 95 百分位值。以此類推，持續累積數據量直至收集滿 480 筆資料 (8 小時時量平均濃度為 8 小時之平均值，固感測器每分鐘一筆數據，8 小時後可得到 480 筆資料)。第 481 分鐘時以第 2 分鐘至第 481 分鐘之監測數據計算暴露實態之第 95 百分位值，現場作業人員每日作業結束後，將感測器進行關機後不繼續進行暴露實態之第 95 百分位值之計算，待另一工作日開始，感測器開機後重新收集數據並計算暴露實態之第 95 百分位值。

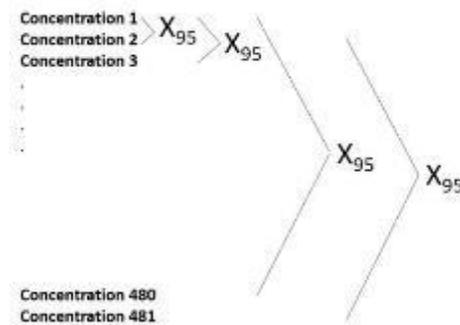


圖 46 風險評估 APP 計算示意圖

### 2. 危害物毒性分級

依照現有物質安全資料表將目前本研究所開發出感測器所內建之感測元件，包括：總揮發性有機化合物(TVOCs)、苯(Benzene)、異丙醇(IPA)、氯氣( $\text{Cl}_2$ )、懸浮微粒與氧氣( $\text{O}_2$ )進行急毒性危害級別分級。

表 16 危害物毒性分級

危害物	TVOCs	Benzene	IPA	$\text{Cl}_2$	PM	$\text{O}_2$
分級	1	2	1	4	1	1

## 六、後續推廣產品之效益可行性說明

### (一) 產品強弱危機(SWOT)分析

物聯網(IoT)議題持續發燒，在技術、應用及商業模式快速發展的情況下，越來越多聯網設備進入日常生活中，為生活帶來更多便利性，同時也造就龐大的市場商機。根據美國消費科技協會(Consumer Technology Association; CTA)報告，物聯網設備是 2016 年消費性電子產業的重點產品，預估將為市場創造 2,870 億美元的商機，而調研機構 IDC 則認為，物聯網市場將於 2020 年達到 8.9 兆美元，摩根史坦利更預測，物聯網將在未來 10 年內創造 14.4 兆美元的營收。本研究所開發之監測系統與後端平台，結合了物聯網與雲端數據之整合，更針對不同產業結構進行感測器客製化，以下便針對感測裝置進行強弱危機分析(SWOT)，如表 17。

表 17 感測裝置(SWOT)分析

SWOT		
感測裝置 (VS 傳統 分析)	優勢 (S)	劣勢 (W)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 線上即時感測分析、數據蒐集、顯示、警示</li> <li>● 雲端數據分析與警示通訊</li> <li>● 時間、樣品數量成本優勢</li> <li>● 結合製程需求 (原本企業在某種程度上即有製程感測裝置之設置)之客製化構建</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 需重新訂定參考法規，並推廣宣導與構建新分析方法系統</li> <li>● 感測裝置偵測值與濃度水準之系統驗證追朔</li> <li>● 部分感測元件對分析物種(或同分異構,或類分子結構)之選擇性低</li> <li>● 推廣與營銷經驗重建</li> </ul>
市場環境	機會 (O)	威脅 (T)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 市場需求強勁</li> <li>● 政策導向</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 其他市場如中國大陸等技術型態與應用之可能發展</li> </ul>
推廣發展	SO-成長	ST-多元
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 透過於實場上進行的驗證結果，有效說服產業界接受本項產品。因產品具有一機多用且能客製化之特色，能針對各家場域進行不同型號之產品設計。在未來更針對現有產品型號進行顯示上之改良，促使產品具有明顯之顯示，方便使用人員隨時監看。並且目前許多廠房均外移至東南亞國家，亦可放眼國際將本土經驗運用到國外，將感測產品推廣至其他國家之作業環境中。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 保持現有的經營領域，針對先前感測器於實場驗證之經驗，著眼於高科技產業與傳統產業。針對先前實場驗證中各家場域代表所給予之建議進行產品之改善，如：需明顯之顯示，將現有之產品加裝 LCD 螢幕顯示感測之數值，或將感測裝置與外接螢幕進行連接使之能明顯、明確之顯示。</li> <li>● 拓展其他領域，因目前感測產品之設計為針對作業環境，其感測元件之偵測濃度之範圍亦在室內空氣中各有害物濃度之範圍內，有鑑於目前本研究所開發之感測器其感測元件亦包含多項室內空氣品質監測之污染物，在未來亦可將產品推廣至室內空氣品質之監測。</li> </ul>
	WO-替代	WT-防禦
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 須培養核心競爭力</li> </ul>

## (二) 市場分析

本研究所開發之感測器在未來是否能投入市場進行推廣，首先要進行的便是市場分析，透過釐清目前市面上同質產品之規格及售價，進一步進行比較後得知本研究所開發之感測器優勢及劣勢。綜觀前節所述內容可發現本研究所開發之感測器針對職場作業環境進行設計，且較作業場域中常使用之直讀數儀器單價要來的低。且在設計上各有害物的偵測範圍均比市售的空氣品質偵測器要來的廣，本研究所開發之感測器更能針對不同作業環境進行感測器內部感測元件進行客製化，透過比直讀式儀器來的親民之單價，逐漸打入作業環境監測之市場。

## 七、感測裝置及監控平台應用教育訓練及技術初步推廣

### (一) 訓練課程設計

#### 1. 課程介紹

在產品推廣中教育訓練是很重要一環，唯有透過完整的課程設計與詳細的產品介紹，才能確保參與人員可以充分獲得相關資訊並引起他們對產品的關注。因此本次教育訓練課程著重於教導參與人員關於物聯網之未來發展，並透過實際操作本研究開發之感測器，學習如何有效地將微感測器融入作業環境中，並分析其與傳統分析方法、直讀式儀器監測之利弊，以達到微感佈設，事半功倍之效果。宣導做好作業環境中有害物濃度監測之重要，降低現場作業人員暴露之風險。

#### 2. 課程大綱

##### (1) 研究緣起介紹

##### (2) 感測器之應用

###### a. 法規面

###### b. 執行面

- c. 代表性
- d. 成本分析
- e. 行政措施

- (3) 感測器功能、APP 與後端平台簡介
- (4) 感測器展示與操作教學
- (5) 問題討論

3. 感測器產品宣導單張

設計簡易明瞭之宣傳單張，確保參與教育訓練的人員可經由宣傳單張獲得最基本之知識並順利吸引其對本研究研發之感測器的興趣與關注。



圖 47 教育訓練課程用感測產品宣傳單張

## (二) 教育訓練

### 1. 新市樹谷職訓中心場次

(1) 時間：107年11月01日 15:00~16:00

(2) 地點：新市樹谷職訓中心

(3) 參與人數：40人



圖 48 樹谷職訓中心教育訓練現場狀況-1



圖 49 樹谷職訓中心教育訓練現場狀況-2

## 2. 中正高雄職訓中心場次

- (1) 時間：107 年 11 月 08 日 15：00~16：00
- (2) 地點：中正高雄職訓中心
- (3) 參與人數：40 人



圖 50 中正高雄職訓中心教育訓練現場狀況

## (三) 技術推廣說明會

### 3. 楠梓加工出口區場次

- (1) 時間：107 年 10 月 30 日 08：50~09：10
- (2) 地點：經濟部楠梓加工出口區管理處第 2 會議室
- (3) 參與人數：58 人



圖 51 楠梓加工出口區技術推廣說明會現場狀況

#### 4. 新市樹谷職訓中心場次

- (1) 時間：107 年 11 月 15 日 15：00~16：00
- (2) 地點：新市樹谷職訓中心（台南市新市區中心路 6 號）
- (3) 參與人數：48 人



圖 52 新市樹谷職訓中心技術推廣說明會現場狀況

## 第五節 成本效益分析

### 一、感測裝置成本

若使用市場商購之直讀式儀器以進行環境粉塵濃度之感測，比較本研究研發之感測器之分析如表 18。市場商購之直讀式儀器要價不斐，雖然直讀式儀器偵測範圍較廣，但透過於實場倉儲作業(粉塵作業場域)所進行的實廠驗證結果得知，該類型場域 PM<sub>10</sub> 平均濃度最高為 460 µg/m<sup>3</sup>，此一濃度亦在本研究所開發之感測器之測範圍內。傳統上所使用的直讀式儀器單價較高，無法同時購入多台進行場區內粉塵濃度的長期監測，相較 1 台市場商購之直讀式儀器單價約為 17 台本研究研發之粉塵感測裝置價格。

表 18 研發感測裝置與粉塵直讀式儀器比較表

廠牌/型號	感測裝置	TSI DustTrak 8533	TSI AM520
售價	NT\$ 23,278	NT\$ 400,000	NT\$ 120,000
偵測原理	雷射-光散射	雷射-光散射	雷射-光散射
偵測範圍	0.001-6 mg/m <sup>3</sup>	0.001-150 mg/m <sup>3</sup>	0.001 ~ 100 mg/m <sup>3</sup>
粒徑範圍	0.3-10 µm	0.1-15 µm	0.1 ~ 10 µm
備註	內建：溫度、濕度、氧氣、懸浮微粒、三軸加速感測元件 (Alphaseonsor/MS1100/Oneair A5)、GPS 定位元件與通訊模組 (NB IoT)		

## 二、執行作業成本

以針對場區進行多點監測以劃分污染物暴露濃度之熱區與冷區；或以實廠作業場域面積。(如 100~200 平方公尺裝設研發感測裝置)；亦或以針對作業製程、儀器機台區域為原則以裝設研發感測裝置。本研究執行本次於倉儲作業場域所進行的實廠驗證，共架設 5 台感測裝置，相關執行成本分析如下表 19。

表 19 粉塵作業場域執實廠驗證執行成本比較表

計價項目	研發感測裝置 (5 台)	商購直讀式 儀器	法規檢測(作業環 境監測機構)	備註
裝/拆設費用	3,000 (1 人.日)	3,000 (1 人. 日)		
運行維護(含 電費、雜支， 以 2 年計)	24,000 (8 人. 日)	30,000 (10 人. 日)	半年一次 (委案檢測均價以 點數及物質種類 計)	研發感測裝置於架設 後，僅需於發現異常 時再進行維護或故障 排除。 商購直讀式儀器需定 期至現場確認儀器運 行狀態。
數據蒐集整 理	0 (雲端系統)	3,000 (1 人.日)		商購直讀式儀器需人 力介入
小計	<b>NT\$ 27,000</b>	<b>NT\$ 36,000</b>		

直讀式儀器監測與感測器監測之比較：在實驗室場域中目前雖沒有法規規範半年便必須進行一次環測，環測價格以不同化學物質與採樣點數多寡進行計價，但因採樣頻率僅半年一次，可能因此無法掌握場域之暴露實態。

直讀式儀器為目前快速方便之職場危害監測工具，但直讀式儀器若須個別化學物質量測，透過表 20 顯示，按目前市售各類污染物之直讀

式儀器單價將會造成極大的成本支出，且此類型直讀式儀器僅供有害物濃度值監測，並無人員潛在暴露風險之推估計算。取而代之，若使用本研究所研發之感測器不僅能減少成本開銷，並同時達到有害物即時監測與風險等級劃分的功能。

表 20 各類型直讀式儀器與感測器比較表

目標污染物	TVOCs	PM	Cl <sub>2</sub>	TVOCs/ PM/ Cl <sub>2</sub>
廠牌/型號	ppbRAE 3000	TSI DustTrak 8533	Drager Xam 3000	本研究研發之感測器
售價	約台幣 150,000 元	約台幣 400,000 元	約台幣 30,000 元	約台幣 12,000 元
偵測原理	PID	雷射 光散射	電化學	PID/雷射 光散射/電化學
偵測下限或 範圍	1 ppb	0.001-150 mg/m <sup>3</sup>	0.01 ppm	TVOCs : 0.01 ppm PM : 0.001-6 mg/m <sup>3</sup> Cl <sub>2</sub> : 0.01 ppm

### 三、感測裝置場域應用及產品化

本研究所建置之區域定點式及穿戴式感測裝置，可監測溫度、濕度、總揮發性有機物質(TVOCs)、異丙醇、苯、氯氣及氧氣等量測參數。穿戴式為背帶設計配戴於人員身上，除規劃防滑設計避免掉落外，並加強其穿戴偵測區域離人員呼吸區域 30 公分距離內，並針對不同作業場所，依據不同作業場所危害特性進行底下 5 種產品組合規劃。

表 21 感測裝置產品表-1

項目	數量	說明
標準配備		
主機板	1(式)	MCU 控制晶片
三軸加速感測元件	1(組)	做動監測
Bluetooth	1(模組)	藍芽連結
Wi-Fi	1(模組)	Wi-Fi 連結
溫度/濕度感測元件	1(組)	
TVOCs 感測元件	1(組)	MS1100 模組
選擇配備-通訊模組與數據儲存		
NB-IoT+ GPS	1(模組)	無線傳輸與室外定位
記憶卡 MicroSD 槽	1(模組)	數據儲存
選擇配備-感測元件		
IPA 感測元件	1(組)	英國 AlphaSense 模組
Benzene 感測元件	1(組)	英國 AlphaSense 模組
Cl <sub>2</sub> 感測元件	1(組)	英國 AlphaSense 模組
O <sub>2</sub> 感測元件	1(組)	英國 AlphaSense 模組
PM 感測元件	1(組)	

表 22 感測裝置產品表-2

型號	IOS-P5CD	IOS-P5AM	IOS-P5AM2
配備	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ NBIoT+ GPS</li> <li>➤ O<sub>2</sub> 感測元件 (AlphaSense)</li> <li>➤ PM 感測元件 (OneAir A5)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ TVOCs (MS1100)</li> <li>➤ 記憶卡 MicroSD 槽</li> <li>➤ IPA/Benzene 擇一 (AlphaSense)</li> <li>➤ 警訊推播</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ TVOCs (MS1100)</li> <li>➤ 記憶卡 MicroSD 槽</li> <li>➤ Cl<sub>2</sub> 感測元件 (AlphaSense)</li> <li>➤ 警訊推播</li> </ul>
型式	區域式	區域式/穿戴式	區域式/穿戴式
適用場域	粉塵作業場所	晶片廠-黃光區	化學品實驗室
型號	IOS-P5BM	IOS-P5BM2	
配備	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ TVOCs (MS1100)</li> <li>➤ 記憶卡 MicroSD 槽</li> <li>➤ Cl<sub>2</sub> 感測元件 (AlphaSense)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ TVOCs (MS1100)</li> <li>➤ 記憶卡 MicroSD 槽</li> <li>➤ IPA/Benzene 擇一 (AlphaSense)</li> </ul>	
型式	區域式	區域式/穿戴式	
適用場域	晶片廠-蝕刻區	樹脂廠-白膠製程	

## 第六節 現行法規探討及影響評估

### 一、瞭解各國應用感測裝置於場域之特性與相關政策措施

考量目前各國尚未將即時感測裝置納入相關法規進行規範，僅於規範中說明相關作業場所可或需利用直讀式儀器進行評估，如局限空間、隧道作業、或礦場等特殊作業場所之毒性氣體或氧氣為主，另亦可利用直讀式儀器進行作業環境暴露危害物之偵測，本研究將直讀式儀器可用於偵測作業環境危害物之相關規範，整理於後面章節。

然而，針對即時感測裝置之相關規範中，目前皆針對感測裝置之性能要求進行規範，其中 BS EN 50271:2002-Electrical apparatus for the detection and

measurement of combustible gases, toxic gases or oxygen- Requirements and tests for apparatus using software and/or digital technologies[15]，針對可燃性氣體、毒性氣體或氧氣，多數以感測裝置的設計、設置需求、測試方法與內容進行規範之，相關參考標準如表 23 所示[16-30]。此標準針對感測裝置之規範係需包括:設計原則 (General design requirements, Analogue/digital interface, Numerical errors, Measuring operation, Special state indication, Digital indication, Digital reading)、軟體(需符合 IEC 61508-3 safety integrity levels 1 and 2)、硬體、資料傳輸、測試程序等內容。

表 23 與感測裝置之設計、設置、與測試相關之標準

標準號碼	標準名稱
EN 954-1	Safety of machinery. Safety related parts of control systems- Part 1: General principles for design [16]
EN 45544-1	Workplace atmospheres-Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Part 1: General requirements and test methods [17]
EN 45544-2	Part 2: Performance requirements for apparatus used for measuring concentrations in the region of limit values [18]
EN 45544-3	Part 3: Performance requirements for apparatus used for measuring concentrations well above limit values [19]
EN 45544-4	Part 4: Guide for selection, installation, use and maintenance [20]
EN 50104	Electrical apparatus for the detection and measurement of oxygen-Performance requirements and test methods [21]
EN 50194	Electrical apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises-Test methods and performance requirements [22]
EN 50291	Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises-Test methods and performance requirements [23]
EN 61779-1	Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. Part 1: General requirements and test methods [24]
EN 61779-2	Part 2: Performance requirements for group I apparatus indicating a volume fraction up to 5% methane in air [25]
EN 61779-3	Part 3: Performance requirements for group I apparatus indicating a volume fraction up to 100% methane in air [26]
EN 61779-4	Part 4: Performance requirements for group II apparatus indicating a volume fraction up to 100% lower explosive limit [27]
EN 61779-5	Part 5: Performance requirements for group II apparatus indicating a volume fraction up to 100% gas [28]
IEC 61508-1	Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems –Part 1: General requirements [29]
IEC 61508-3	Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems –Part 3: Software requirements [30]

其中歐洲氣體監測器標準（BS EN 45544-Workplace atmospheres-Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. 第 1-4 部分）即考量相關氣體監測器可幫助降低因暴露於有毒氣體和蒸氣而導致的健康不良和死亡風險，可在工作場所發揮重要作用[31-34]。然而其使用中的一個重要考慮因素是氣體檢監測器標準的可用性，因此以設定最低標準指導文件，以便事業單位可以選擇適合目的且可靠的監測器，並在其整個

使用壽命期間有效地使用。這系列標準，最近已全面修訂，說明如下。

EN 45544-1 工作場所環境，用於直接檢測和直接濃度測量有毒氣體和蒸汽的感測設備[21]。第 1 部分：一般要求和試驗方法。(評估個人，攜帶式，可移動和固定感測器的性能)；第 2 部分：用於暴露測量的設備之性能要求；第 3 部分：一般氣體檢測設備的性能要求；第 4 部分：選擇，安裝，使用和維護指南。以下針對這些更新標準如何釐清和修訂測量任務與其相關性能要求之間的關係(第 1-3 部分)，以及如何根據新知識更新“使用指引”(第 4 部分)。

有毒氣體檢測器可以通過各種方式降低風險，具體取決於檢測器的類型及其使用方式。但是，可以確定兩個基本的測量任務，包括(1)一般氣體檢測:如安全警告，洩漏檢測，這是有毒氣體檢測器，最普遍使用之規範，與(2)暴露量測，作為工作場所暴露評估的一部分，如根據“BS EN 482:2012 –Workplace exposure-General requirements for the performance of procedures for the measurement of chemical agents”，對於使用化學物質測量程序的一般要求[35]。依此兩測量任務，而構成了此新標準的框架。兩測量主要內容包括:

(一) 一般氣體檢測：

1. 提供視覺和聽覺警報，以警告勞工可能有害的有毒氣體濃度;
2. 提供報警輸出信號，以啟動通風操作，關閉過程，安全疏散等;
3. 區域監測，提供有關場地有毒氣體濃度的連續信息;
4. 監測保護系統有效性的測量;
5. 現場讀數測量，例如獲得無氣體工作許可證;
6. 工業和商業環境中的洩漏檢測。

(二) 工作場所暴露測量程序

工作場所暴露測量為暴露評估過程的重要部分，暴露評估測量程序需要根據相關法規進行。而這些程序的一般要求，在歐洲標準 EN 482 中

規定，包括最小規定測量範圍的不模糊性，選擇性，平均時間和擴展不確定度。用於此類測量的程序應提供可靠和有效的結果，以便與職業接觸限值相比，可以做出正確的決定，例如暴露水平是否可接受或控制措施（例如通風控制，呼吸防護保護）之應用。EN 482 中引用了與各種類型的化學物質（包括直讀式儀器）（EN 45544）使用各種類型的測量程序和測量裝置有關的具體要求，而 EN 482 確定了三種類型的暴露測量，說明如下：

1. 時量平均濃度之掃描量測(Screening measurements of time weighted average concentration)，以獲得暴露濃度的半定量資訊，以鑑別潛在的健康危害，估計健康風險並確定暴露是否明顯低於或高於職業暴露標準。
2. 時間和/或空間濃度變化的掃描量測(Screening measurements of variation of concentration in time and/or space)，以提供有關空氣中有害物濃度的可能散播模式的訊息，以確定暴露濃度升高的位置和時間，得提供有關排放源的位置和強度的資料，並可隨時確認控制措施的有效性，例如通風。
3. 與職業暴露標準和定期量測進行比較的測量(Measurements for comparison with (occupational exposure) limit values and periodic measurements)，進行比較測量以獲得勞工呼吸區空氣中危害物已知平均濃度的不確定性結果；另一方面，進行定期測量以確定暴露條件是否已經改變或控制措施是否仍然有效。

暴露掃描測量的要求，通常不如用於與極限值和定期測量進行比較的暴露測量的要求嚴格，因為後兩種類型具有監管之影響。

### (三) 性能要求（第 1-3 部分）

氣體檢測器的性能要求取決於它們的使用目的，這亦反映在有毒氣體檢測器標準的最新版本中，該標準修訂並闡明了一般氣體檢測（迄今

為止最常見的氣體檢測器)和暴露測量(更專業和要求更高的使用,需計算其不確定性)。需注意的是,相同的檢測器可用於一般氣體檢測應用(EN 45544-3) [33]和暴露測量(EN 45544-2) [32]。此外,用於一般氣體檢測的檢測器可以根據 EN 45544-2 的更嚴格要求進行認證。

另一方面,用於一般氣體檢測的檢測器,需符合與可燃氣體檢測器相當的各種測試的性能要求(請參考 EN 60779-29-1[36]),即每個測試的參考值偏差必須小於某個值。此外,它們的測量範圍由製造商定義。用於暴露測量的有毒氣體探測器具有更嚴格的要求,它們不僅必須經與一般氣體監測器相當的測試和要求,而且還必須具有相對擴展的不確定性,即與測試的不確定性(偏差)之和,以百分比表示,必須符合 EN 482 規定的範圍內。對於與極限值和定期測量進行比較的測量,相對擴展的不確定度必須 $\leq 50\%$ 或 $\leq 30\%$ ,具體取決於測量範圍和參考週期(短期,例如 15 分鐘或長期)。雖然這些容忍度,似乎不嚴謹,但(a)必須是 13 次試驗得出的不確定性的總和,與(b)由於工作場所暴露的時間和空間變化,工作場所接觸化學物質的變化可能遠遠大於根據 EN 482 計算的單一測量的不確定性所敘述的變化。

#### (四) 使用指引(第 4 部分)

上面的討論主要涉及性能要求(EN 45544 的第 1-3 部分),因此與製造商(和測試實驗室)有相關。在監測器的工作壽命期間,保持足夠性能的關鍵部分是使用者定期測試和維護。EN 45544-4 提供了檢查和功能檢查的指導:“強烈建議在每天使用前進行這些檢查”[34]。但是,對於某些應用,例如緊急應變,這可能是不可行,因為在使用前可能沒有足夠的時間進行檢查和功能檢查。在這些情況下,應實施檢查和功能檢查的替代計劃,以提供同等的安全水準。例行檢查和功能檢查應包括確保以下內容的檢查:

1. 檢測器處於校準期內;
2. 通過目視檢查,監測器和相關設備似乎令人滿意;

3. 吸氣（例如泵送）監測器的採樣系統沒有洩漏;
4. 電池電量足夠;
5. 清潔空氣中的零讀數是準確的;
6. 設備對氣體的反應正確，可以使用帶有目標氣體或替代氣體的現場校準套件進行;
7. 顯示器和聲音和/或視覺警報正常運作。

無論是個人，可攜式，可移動式還是固定式監測器，提供警報可能是一般氣體探測器最重要的安全功能。警報設定點和警報反應時應採取的措施，應由雇主針對風險評估產生的每種危險情境明確定義。氣體探測器通常具有至少兩個獨立的瞬時警報，這些警報通常用作預警和主警報。預警允許在氣體濃度達到主要警報設定點之前採取早期干預選項，例如檢查區域，啟動通風系統。主警報的反應可以啟動進一步的人員撤離動作。

除瞬時警報外，個人和可攜式監測器通常還具有時間加權平均值（STEL 和 TWA）警報。通常，瞬時警報用於警告短期（急性）暴露於危險濃度的有毒氣體（即安全相關），而 STEL 和 TWA 警報可用於警告長期（慢性）影響（即健康相關）。監測器的警報設定點，應根據其應用進行專門設置。設定點應足夠低，以便相關的保護措施可以有效，同時盡可能高，以避免誤報。頻繁的誤報可導致警報被忽略，以至於導致有毒氣體釋放的潛在危險之提升。因此，在修訂後的標準中，建議最低報警設定點不應低於符合 EN 45544-2 的探測器測量下限的兩倍或低於符合 EN 45544-3 的探測器測量範圍的 10%。在確定警報設定點時，應考慮所有延誤（例如由於氣體擴散，監測器響應時間，採取的保護措施）。

OSHA 的技術報告，”SAMPLING, MEASUREMENTS, METHODS and INSTRUMENTS”亦針對作業現場量測之相關技術設備，給予建議[37]。直讀式儀器或監測器能在採樣時提供相關資料，從而協助進行決策，除可以提供確定現

場人員是否暴露於空氣中濃度的能力，該濃度超過特定危險空氣污染物的瞬時（上限或峰值）暴露限值、用於識別對生命或健康有直接危害的缺氧或富氧環境（IDLH）條件，空氣污染物濃度升高，易燃氣體和放射性危害、進行篩檢調查，以確定是否需要進行額外之評估。從直讀式監測器，獲得的數據可用於評估現有的健康和/或安全計劃，並確保正確選擇個人防護設備（PPE）和工程控制。相關使用儀器類型與場所之建議，如下表 24 所示。

表 24 可參考使用之直讀式儀器與其可測量之物質及場域之應用

儀器類型	測量物質	應用
多氣表	可燃氣體（LEL），氧氣（O <sub>2</sub> ），以及特定的有毒氣體傳感器	密閉空間，地下建築，下水道
有毒氣體傳感器，硫化氫	H <sub>2</sub> S	農場，下水道，地下建築
有毒氣體傳感器，氰化氫	HCN	工業設施，電鍍業務
有毒氣體傳感器，二氧化硫	SO <sub>2</sub>	造紙廠，漂白業務
有毒氣體傳感器，一氧化氮和二氧化氮	NO 和 NO <sub>2</sub>	燃燒源，特別是丙烷燃料
有毒氣體傳感器，氯氣和二氧化氯	Cl <sub>2</sub> 和 ClO <sub>2</sub>	漂白和消毒操作，塑料製造，化學合成，其他工業操作
有毒氣體傳感器，氨	NH <sub>3</sub>	工業製冷，化肥，動物飼料批
有毒氣體傳感器，磷化氫	PH <sub>3</sub>	半導體製造，農業殺蟲劑
一氧化碳監測儀	CO	車庫，倉庫，其他燃燒源，室內空氣質量
二氧化碳監測儀	CO <sub>2</sub>	室內空氣質量，作為其他室內源污染物的替代品
紅外分析儀	CO，CO <sub>2</sub> ，有機物質	區域調查，以確定最高濃度的位置，廢麻醉氣體，熏蒸劑，室內空氣，洩漏，溢出

而感測裝置於應用作業場所之實際案例，目前已有許多測量 VOC 商業化的感測器及直讀式儀器，可以有效地追蹤洩漏或排放源，但尚未納入實際量測可使用感測裝置的規範，目前大多使用於特殊作業場所，如局限空間、隧道作業、缺氧作業等，亦針對這些所使用之及感測裝置規範其設置需求、性能測試、及警示標準等進行要求。另外，在歐盟之規範，已提出除了上述各國皆已規範之安全監測外，亦需針對健康監測，包括時量平均濃度之掃描量測、時間和/或空間

濃度變化的掃描量測、及與職業暴露標準和定期量測進行比較的測量，然並非針對所有物質，而是階段性的以提出具”指示性職業接觸限值”（indicative occupational exposure limit values , IOELVs）[38]為優先規範進行感測裝置監測之要求，亦提出這一類感測裝置需具備之性能、與測試方法之規範。而 OSHA 提出直讀式儀器或感測器可搭配目前現行相關法規於作業場所濃度評估時之輔助工具，未強制取代原設定之評估方法。因此，本研究在進一步盤點分析職業安全衛生法與即時感測裝置之相關規定後，可提供未來國內在擬定相關法規或規範之參考。

## 二、 即時感測裝置納入法規之可適性評估

我國「職業安全衛生法」以及其附屬相關法規「職業安全衛生施行細則」、「粉塵危害預防標準」、「職業安全衛生設施規則」、「高壓氣體勞工安全規則」、「危害性化學品評估及分級管理辦法」、「勞工作業場所容許暴露標準」、「勞工作業環境監測實施辦法」、「有機溶劑中毒預防規則」、「特定化學物質危害預防標準」、「粉塵危害預防標準」、「缺氧症預防規則」、及「高溫作業勞工作息時間標準」等必要安全衛生措施，能將即時感測裝置納入目前相關規範之法條。

依據上述所盤點之法規內容，可歸納成兩個面向，一為作業場所環境濃度之監測，二為作業場所勞工健康危害之評估。在環境濃度之監測，係以即時、隨時及連續監測之規範與確認工程控制正常運轉等為目的，包括有機溶劑中毒預防規則、特定化學物質危害預防標準、粉塵危害預防標準、缺氧症預防規則、與高壓氣體勞工安全規則；在勞工健康危害之評估，係以作業環境濃度須符合容許濃度標準為主，包括危害性化學品評估及分級管理辦法、勞工作業場所容許暴露標準、與勞工作業環境監測實施辦法。

在環境濃度監測之規範中，係針對相關環境、氣體洩漏與設備運轉有效性等需進行危害物濃度之評估，對於實施監測或是測定所需之相關儀器、設備或是檢

測方法尚未有明確之規範，如表 25 所示。而在勞工健康危害之評估，於危害性化學品評估及分級管理辦法中，有規範得以其他定量工具實施之，如表 26 所示。在上述相關法規中，事業單位在進行辦理相關業務時，可有效利用感測模組之監測，進行評估危害物於作業環境之濃度與作業人員之暴露情形。如化學品評估及分級管理辦法第九條，針對化學品之暴露評估，必要時並得輔以其他半定量、定量之評估模式或工具實施之，意即目前事業單位在有限之作業環境監測經費下，針對單一相似暴露族群，定期進行作業環境監測之樣本數皆小於 3，受限於少量樣本數之現況下，實難以確認該相似暴露族群之暴露實態，若搭配感測模組除可進行大樣本數之收集，亦可進行長期監測，隨時掌握暴露實態，將更容易找出該相似暴露族群之第 95 百分位濃度，進而進一步與容許濃度相較，而進行分級管理，將可解決事業單位在執行此一辦法的困境。

表 25 職業安全衛生相關辦法針對環境濃度監測與測定之相關規範

<b>高壓氣體勞工安全規則</b>	
第三十七條之一	一、設置於防液堤內側者： (五)氣體漏洩檢知警報設備之感應部分。 二、設置於防液堤外側者： (六)氣體漏洩檢知警報設備。
第六十條	可燃性氣體或毒性氣體之製造設備中， <u>有氣體漏洩致積滯之虞之場所</u> ，應設可探測該漏洩氣體，且自動發出警報之氣體漏洩檢知警報設備。
<b>有機溶劑中毒預防規則</b>	
第二十一條	雇主使勞工於儲槽之內部從事有機溶劑作業時，應依下列規定： 八、應以測定方法確認儲槽之內部之有機溶劑濃度未超過容許濃度。
<b>特定化學物質危害預防標準</b>	
第十七條	雇主依本標準規定設置之局部排氣裝置，依下列規定： 五、於製造或處置特定化學物質之作業時間內有效運轉，降低空氣中有害物濃度。
<b>粉塵危害預防標準</b>	
第十九條	雇主使勞工從事粉塵作業時，應依下列規定辦理： 一、對粉塵作業場所實施通風設備運轉狀況、勞工作業情形、空氣流通效果及粉塵狀況等隨時確認，並採取必要措施。
<b>缺氧症預防規則</b>	
第四條	雇主使勞工從事缺氧危險作業時，應置備測定空氣中氧氣濃度之必要測定儀器，並採取隨時可確認空氣中氧氣濃度、硫化氫等其他有害氣體濃度之措施。
第五條	雇主使勞工從事缺氧危險作業時，應予適當換氣，以保持該作業場所空氣中氧氣濃度在百分之十八以上。
第十六條	雇主使勞工從事缺氧危險作業時，於當日作業開始前、所有勞工離開作業場所後再次開始作業前及勞工身體或換氣裝置等有異常時，應確認該作業場所空氣中氧氣濃度、硫化氫等其他有害氣體濃度。

表 26 職業安全衛生相關辦法針對勞工健康危害之評估之相關規範

危害性化學品評估及分級管理辦法	
第九條	雇主應依勞工作業環境監測實施辦法所定之監測及期程，實施前條化學品之暴露評估，必要時並得輔以其他半定量、定量之評估模式或工具實施之。

另一方面，職業安全衛生法第 12 條第 1 項 雇主對於中央主管機關訂有容許暴露標準之作業場所，應確保勞工之危害暴露低於標準值。其中容許暴露標準中 PEL-TWA 無法得知與掌握勞工作業期間 PEL-STEL/PEL-Ceiling，因此需在符合此法規之前提下，搭配感測模組之運用，可立即確認濃度與時間之變化情形，以即刻介入適當之防護措施，避免作業人員有高濃度暴露之虞。

唯勞工作業環境監測實施辦法「第六條 作業環境監測之採樣、分析及儀器測量之方法，應參照中央主管機關公告之建議方法辦理」，對於相關之採樣、分析及儀器，有相關之規範。然而，考量事業單位執行作業環境監測於採樣前需擬定含採樣策略之作業環境監測研究書此一規範，在採樣策略之擬定，建議可搭配感測模組之配合，以協助擬定能有效評估作業勞工暴露情形之採樣策略，特別是針對 PEL-SETL 與有 PEL-Ceiling 規範之危害物。

另一方面，目前中央主機關所建議之採樣分析方法，受限於目前所使用分析儀器或方法規範之限制，因此本研究在實際採樣後，委託職業衛生認證實驗室分析之結果，皆為低於分析方法之偵測下限，在符法性之評估(容許濃度之規範單位，以 ppm 為主)雖符合，但對於勞工實際之暴露情形，實難以進行相關之暴露實態分析，針對此一目前之困境，若欲確切掌握勞工之暴露實態，可建議事業單位可初步規劃以有較低之分析方法偵測下限之傳統分析，並搭配感測模組監測，藉由建立兩者之相關性，以利建置勞工長期暴露資料庫，進而掌握勞工長期之暴露實態，亦才能符合職業安全衛生法之精神。

綜上所述，在本研究評估感測模組於實場可有效運作之前提下，進行評估即時感測裝置納入法規之可適性，如表 27 所示。依目前法規對於相關監測儀器或設備之規範下，對於尚無規範之法規，建議可將即時感測裝置納入法規中，如有機溶劑中毒預防規則(確保低於 PEL)、特定化學物質危害預防標準(確保控制裝置正常運作)、粉塵危害預防標準(粉塵狀況等隨時確認)、缺氧症預防規則(確保低於 PEL)、與高壓氣體勞工安全規則(洩漏警報)。而危害性化學品評估及分級管理辦法，針對無容許濃度之化學品，尚無法利用感測模組進行評估之，因此僅可針對目前 492 種具有容許濃度標準之化學物質，給予建議搭配使用感測模組，進行分級管理之評估；針對勞工作業環境監測實施辦法，感測模組可有效輔助採樣策略之擬定，包括可先評估出高風險之相似暴露族群與高風險時段或時間，另可使用直讀式儀器之危害物，亦可利用感測模組輔助或替代進行長期監測與評估。

表 27 即時感測裝置納入法規之可適性

相關法規(子法)	職業安全衛生法(母法)	目標	可用感測模組介入之可適性
危害性化學品評估及分級管理辦法	第 11 條	分級管理	可，部分(無容許濃度之化學品無法搭配感測模組進行評估)
勞工作業場所容許暴露標準	第 12 條之 1	確保低於 PEL	可，全部
勞工作業環境監測實施辦法	第 12 條之 3	PEL-TWA	可，部分(採樣策略擬定，先評估出高風險之相似暴露族群)
		PEL-STEL	可，部分(採樣策略擬定，先評估出高風險時段或時間)
		PEL-Ceiling	可，全部
	第 12 條之 3	使用直讀式儀器量測者，確保低於 PEL	可，全部
有機溶劑中毒預防規則	第 6 條之 3	確保低於 PEL	可，全部
特定化學物質危害預防標準	第 6 條之 3	確保控制裝置正常運作	可，全部
粉塵危害預防標準	第 6 條之 3	粉塵狀況等隨時確認	可，全部
缺氧症預防規則	第 6 條之 3	確保空氣中氧氣濃度未滿百分之十八之狀態	可，全部
高壓氣體勞工安全規則	第 6 條之 3	洩漏警報	可，全部
高溫作業勞工作息時間標準	第 19 條之 1	溫度監控	可，全部

### 三、實驗室驗證方法建立

職場感測系統，以 IoT 方式經常地將資料收集、分析和使用，以採取行動並提供豐富智慧型的規劃、管理和決策，未來發展潛勢不可限量。然而相關法規與主管機關之配套措施，特別是相關認證及品保體系須提早因應。

本研究建議未來可成立認證實驗中心，針對不同感測項目，訂定基本規格後，接受認證申請作業。由品保品管制度及作業流程訂定，進行 QA/QC 管理。



圖 53 裝置認證及品保體系示意流程

根據 2014 年所出版的 Air Sensor Guidebook 裡所提及，感測器需針對以下各層面進行考量，其包括：

(一) 考慮量測項目範圍與限制

由於個別感測器所適用之作業場域均不同，即使是具有相同有害物暴露情形之場域亦會因為其內部污染物濃度不同而需要不同量測範圍的感測器。因此，在進行感測器研發與未來認證時，須明確劃分感測器之目標污染物與其所適用之場域以利後續進行量測範圍與偵測極限的判斷，避免出現大材小用或完全不適用之情形。

(二) 考慮感測器本身之精密度與誤差

為確保感測器所量測到之有害物濃度為真值，感測器本身的精密度非常重要。根據 Air Sensor Guidebook 中針對個人有害物暴露感測器進行污染物濃度量測之建議，其認為有許多的因子均會影響個人空氣污染物之暴露情形，當感測器量測誤差非常大時，其量測之結果根本無法透過量測結果推估作業人員暴露情形，因此其針對感測器之精密度與誤差值進行限制，在未來亦可效法此一準則進行各類感測器之認證。

表 28 感測裝置精密度與誤差建議

適用場域	汙染物	允許誤差	數據完整性
個人暴露之量測	全部	< 30 %	≥ 80 %

除此之外，數據完整性亦是感測器功能一大須經測試之項目，如上述 Air Sensor Guidebook 中提及數據的完整性需 ≥ 80 才是合格之感測器產品，而無論今天感測器數據的傳輸或儲存是運用網路亦或是記憶卡進行傳輸與儲存，其都需受到測試，以下便針對數據傳輸之計算進行討論：

數據接收傳輸率：計算感測裝置在測試期間，有效的數據占所有數據的百分比(例如：以一分鐘為量測間隔，量測 10 小時之測試結果，預期可得到 600 筆數據。)

$$\text{Data Recovery (R)} = \frac{N1}{N2} \times 100 \%$$

N1：感測裝置之有效數據點

N2：所有數據點

### (三) 校正需求之頻率

感測器的量測表現會隨著時間而有所改變，因此感測器的校正為非常重要之環節。建議若為氣狀有害物感測器，其內部感測元件均須透過標準氣體之校正，其餘感測元件亦須與標準辦法進行比對校正，建議感測器校正每季均需進行一次，而進行實際場域量測前後均需進行一次校正以確認感測器量測表現無太大之差別。

### (四) 反應時間之確認

感測器量測空氣中有害物濃度的反應時間因受其內部感測元件差異而有截然不同之表現，反應時間較快之感測器適用於手持式監測來判定極快速的濃度變化，而反應時間較慢的感測元件則適用安裝於固定點之長期監測，此類環境濃度較無非常快速的變化。透過 Air Sensor Guidebook 內文建

議反應時間低於一分鐘之感測元件可同時適用於手持式監測與固定式監測。

#### (五) 產品結構與耐久度

根據感測器未來產品化後所適用場域而須有不同結構耐久度之測試，如做為人暴露濃度監測之個人背戴式感測裝置則需考量產品因搖動、晃動或跌落對產品結構造成之損害。若其產品目標為針對戶外場所進行監測則須考慮到天氣對於結構上之影響。

#### (六) 感測器外殼包裝

針對測器所適用之場域，其外殼包裝之材質亦須進行不同之測試與驗證，以確保感測器能順利在該場域中使用並不引發其他意外事件之發生。

#### (七) 成本之考量

感測器成本受到其目標污染物不同、感測元件的精準度與誤差不同而有所差異，而根據 Air Sensor Guidebook 內文提及，以顧客為導向之感測器定價約落在 **3,100 至 77,500** 之間。

針對上述感測器認證需考量之項目進行一連串項目認證之設計，其包括：

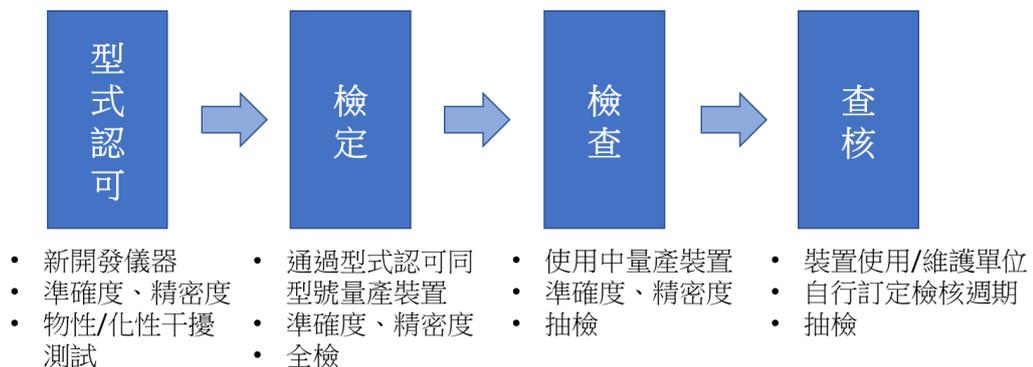


圖 54 感測裝置認證制度流程設計

#### 1. 型式驗證

針對新開發或市售產品，依物、化特性建立評估參數，進行與量測準確度及精密度相關之性能驗證，執行方式包含實地場域測試

(field testing)與實驗室評估 (laboratory evaluation)，藉此確認同廠牌型號產品所宣告規格之可信度。

## 2. 測試

指以參考方法(儀器)為標準，進以比較待測感測裝置性能之行為。主要針對新開發或市售產品，在特定環境條件下進行與量測準確度及精密度相關之性能測試。

未來透過智慧感測裝置進行職場有害物監測，對於感測裝置之性能測試與驗證更為重要，廠商可能針對職場有害物自行研發(客製化)合適之感測裝置，因此建立感測裝置之實驗室驗證及場域測試機制及流程，確保產品效能，以提供事業單位運用具公信力之感測裝置來改善職場環境。

# 第五章 結論與建議

## 第一節 結論

- 一、本研究完成之感測裝置產品組合並進行實際場域驗證，驗證結果顯示，本研究感測裝置可有效協助掌握作業場所污染物於時間與空間之變化情形。依照現行職業安全衛生法規定，事業單位若僅依循作業環境監測實施辦法之測定頻率，及每半年進行一次之測定，實難掌握勞工個體之間的暴露差異與長期之暴露實態。而實際場域驗證結果顯示，直讀式儀器可能因偵測原理及感度與感測裝置不盡相同，所得數據之相關性不佳，但若以有害物於場域濃度分佈之特性評估，則直讀式儀器 PID 與區域感測裝置每天所監測到之濃度分佈間有很好的相關性，且可確認感測裝置可有效協助掌握作業場所污染物於時間與空間之變化情形。因此若事業單位使用感測裝置，除可評估是否符合 PEL-TWA，亦可得知勞工作業期間是否符合 PEL-STEL/PEL-Ceiling 之結果。
- 二、本研究完成 5 項感測裝置產品組合並於 5 種不同場域進行實際場域驗證，驗證結果顯示，感測裝置與傳統採樣分析結果，無論是定點式或是個人穿戴式，兩者之間有極佳之相關性存在。另本研究亦發現相同場域不同個體間有濃度差異存在，其原因為本研究於樹脂廠進行實場測試中發現，該工廠在上午時段會進行開槽加料之操作，造成該點位在相同監測時間中所監測到之濃度較其他點位高，而風向亦會影響濃度之差異，部分點位因處於下風處導致污染物蓄積於該處，因此於相同時間點但不同點位進行測定，濃度皆不同。
- 三、本研究提出五種具不同功能取向之感測器產品組合，並以場域驗證成果進行產品效益分析與初步推廣，產品評估範圍包含其適用場域、限制、成本等。本研究亦從法規層面、執行場域監測之難易與成效、監

測之代表性、監測成本分析及行政措施等五大面向，提出感測裝置較傳統採樣分析為佳之優點，其包括：作業場所中有害物濃度之即時監測、作業場所中勞工有害物暴露之風險評估與有害物濃度超標時之警訊推播等。作為未來進行廠商推廣之說帖，並期待未來可藉由法令鼓勵、落實環境監測及補助費用等誘因，增加廠商配合意願。

四、在法規評估盤點方面，在歐盟之規範，已提出除了各國皆已規範之安全監測外，亦需針對健康監測，包括時量平均濃度之掃描量測、時間和/或空間濃度變化的掃描量測、及與職業暴露標準和定期量測進行比較的測量。而 OSHA 則提出直讀式儀器或感測器可搭配目前現行相關法規於作業場所濃度評估時之輔助工具，未強制取代原設定之評估方法。

五、在多場實際場域驗證中，於高科技廠房中所進行之驗證中面臨其為內網環境，無法提供有效供給感測器進行數據回傳之 WiFi 環境，本研究另行開發具 MicrSD 記憶卡之感測器並定時讀取 MicrSD 記憶卡中感測器所監測之有害物濃度數據。針對部分勞工在配戴個人背戴式感測器後反應其體積與重量對作業順暢度造成困擾此一問題，本研究另行開發新一代更輕便且能安裝於作業人員手臂上之個人背戴式感測器版本，以利減輕作業人員之負擔並提升作業順暢度。針對感測器專屬 App 使用上面臨僅能與單一台感測器進行連線並監控即時有害物濃度此一困境，本研究後續另行研發新一版本感測器專屬 App，在此一版本中，使用者可同時監測所有上線中任一台感測器之即時監測數據，請針對不同場域客製化感測器安置分布圖。

本研究透過實際場域測試顯示，感測裝置可做為監測作業環境有害物暴露濃度趨勢變化，以即早進行適當危害控制措施，降低職業傷病之發生。而我國在環境濃度監測之規範中，係針對相關環境、氣體洩漏與設備運轉有效

性等需進行危害物濃度之評估，對於實施監測或是測定所需之相關儀器、設備或是檢測方法尚未有明確之規範。在勞工健康危害之評估，有規範得以其他定量工具實施之，事業單位在進行辦理相關業務時，可有效利用感測裝置之監測，進行分級管理。針對勞工作業環境監測實施辦法，感測裝置可有效輔助採樣策略之擬定，包括可先評估出高風險之相似暴露族群與高風險時段或時間，另可使用直讀式儀器之危害物，亦可利用感測裝置輔助或替代進行長期監測與評估。

## 第二節 建議

- 一、事業單位在進行定期作業環境監測時，建議若作業環境監測可搭配感測裝置，將可協助提出更符合作業場所現況之採樣策略與提出更合適之控制建議，每半年一次之定期做又環境監測之結果僅能代表採樣期間暴露情形，透過感測模組的監測進行長期之評估，進行長時間作業環境有害物濃度之監測，不但可建立勞工個人有害物濃度長期暴露資料庫，亦可協助進行長期暴露風險評估，並協助提供降低長期暴露風險之管理方案之決策。
- 二、依驗證之結果，感測模組具有協助事業單位解決掌握勞工之暴露實態、可構建長期暴露資料庫分析勞工之長期暴露風險、可掌握作業場所污染物於時間與空間之變化情形協助擬定合適之採樣策略等優點，本研究建議行政主管機關能將感測裝置推廣至事業單位應用，以解決以往監測數據是否有代表性、樣本數不足及傳統採樣分析費用等問題。本研究今年度評估 TVOCs、苯、異丙醇、氧、與粉塵感測裝置於實場應用之效能，發現皆有很好的長期監測效果，唯上述測定物質僅苯、異丙醇、與氧具有容許濃度標準之規範，考量需掌握職場勞工之暴露程度，建議後續於相關規劃時，能將監測項目以職業安全衛生法為基準，進行規劃與驗證。在推廣策略上，可結合勞動檢查單位，

以輔導取代監督檢查，搭配技術宣導，提昇廠商配合之意願。

- 三、高科技廠房中為避免其他產品訊號影響機台操作，甚至影響生產良率而禁用 WiFi、NB-IoT。本研究針對此一困境設計了具備 MicrSD 記憶卡之產品，進行感測器架設前經由申請即可架設此一型號之產品。另外，若無法架設具 MicrSD 記憶卡之感測裝置，可以於場域中以內部網路進行網路線拉線，透過內網網路進行有害物濃度即時監測數據之回傳。
- 四、本研究進行多場實際場域驗證結果顯示，高科技廠房因其對製程要求極高，因此廠房內有害物濃度偏低，感測器僅能進行長期程有害物濃度監測而其他應用層面較少。反之；在傳統產業中所進行多場實際場域驗證中可發現現場有害物濃度在部分時間偏高。相較之下，感測器所能提供之功能，包括：現場有害物濃度對勞工暴露所造成的風險推估以及感測器在現場有害物濃度超過法定標準時所進行提醒勞工採取應變措施之警訊推播便能派上用場，因此未來可傾向針對此類傳統產業進行後續推廣。
- 五、事業單位每半年所進行之定期作業環境監測，其監測結果僅能代表該段時間有害物濃度，無法得知該作業環境中勞工長期有害物濃度暴露情形。建議政府可針對相關法令進行修改，建議作業場所在進行每半年一次之定期作業環境監測之餘，亦同時於作業環境中安裝感測器進行長期程不間斷之有害物濃度監測，以利更妥善的收集現場作業環境之勞工有害物濃度暴露情形與建立長期暴露資料庫，若事業單位能妥善配合此一措施，政府便提供部分感測器安裝之補助，以利感測器安裝於事業場所中一事推行的更為順暢。
- 六、本研究進行實場測試前，內部感測元件均須透過標準氣體進行比對校正。其中總揮發性有機化何物標準氣體之選擇，以異丁烯作為標準氣體。本研究所使用感測元件與標準氣體兩者濃度相關性皆能達到  $R^2$  大於 0.95 以上。爾後實際進行實場測試時，在場域進行至少 300 小時之測試，並同時進行傳統採樣分析。感測器監測數據為傳統採樣分析數據之相對濃度，後續將可透過運

算模式將產測器數據轉化為絕對濃度，以利與容許濃度標準進行比較。此外，可利用進行法規職場環境有害物濃度監測時，同時進行感測裝置同步監測及數據比對，以作為感測裝置之定期校驗機制。

七、為強化本研究之數據應用與後端平台，未來可考慮導入模式或機器學習等人工智慧方式，將監測數據轉化為危害預測資訊，讓事業單位及勞工即時掌握危害訊息及趨勢，以提早進行危害預防措施，降低職業傷病之發生。

八、結合國際做法與驗證之結果，本研究提出三期程，將感測模組納入職業安全衛生法之法規修訂建議，短程可優先以具有執行指引之相關辦法，建議納入指引修正，提供協助事業單位可利用即時感測裝置輔助執行；中程以無確切相關連續監測設備或設施要求之相關辦法與國外針對可使用直讀式儀器監測之物質，建議在即時感測裝置之相關要求與認證規範等皆完備之後，可納入相關法規之修正；長程係針對需監測之物質，在長期連續 3 年之作業環境監測結果皆屬可接受之風險的危害物，建議可以配套措施皆完善之即時感測裝置取代傳統作業環境監測，以降低事業單位之負擔。

九、透過本研究執行經驗，未來可考慮結合相關部會進行技術成果交流，加速推動本研究之技術提升、產業推廣應用及相關人才培訓等。如環保署所推動之環境品質物聯網智慧化環境監測，與本研究在感測器系統驗證、校正機制、污染源追蹤、大數據解析等方面，有經驗交流及共同技術發展以建立更準確之感測器監測系統，並建立更完善之作業環境中有害污染物濃度數據收集之大數據資料庫；另本研究之實廠監測經驗，包含感測器之開發、感測元件之測試、後端監測平台建構、感測器即時顯示 APP 之開發、風險評估與危害預防等，可透過經濟部工業局之產業推廣模式，將成果推廣至產業界，亦可考量物聯網整案輸出之形式，將本研究之成果推廣至其他國家；此外透過科技部之研究計畫補助模式，鼓勵學界應用人工智慧及物聯網技術，建立作業環境危害預測模式及利用長時間監測數據評估作業環境中之勞工暴露風險，且可鼓勵學界開發可適用於職場環境中高粉塵及高有害物濃度之

感測元件。在職場安全衛生與物聯網跨域應用之理念灌輸及推廣，可與教育部合作，例如可於職業安全衛生相關科系之課程增加利用感測器與物聯網進行職場作業環境智慧監測之教案或內容。

## 誌謝

本案研究計畫參與人員除本所周瑞淑組長、鄭乃云副研究員、鄭柏鑫助理研究員，另包括正修科技大學王琳麒教授、中山醫學大學王櫻芳助理教授、成功大學林明彥副教授及捷思環能有限公司陳均衡副總等人，另感謝協助本研究實際場域驗證之事業單位，僅此敬表謝忱。

## 參考文獻

- [1] 經濟部技術處產業技術知識服務計畫 (ITIS), 2017 石化業年鑑
- [2] 林禎中、王鵬堯, 職場安全智慧防護技術研究(ILOSH106-S314), 2017, 勞動部勞動及職業安全衛生研究所
- [3] U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration ,OSHA, Process Safety Management, Available from <https://www.osha.gov/Publications/osha3132.pdf>
- [4] The European Commission, The Seveso Directive-Prevention, preparedness and response, Available from <http://ec.europa.eu/environment/seveso/>
- [5] Health and Safety Executive, The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015, Available from [www.hse.gov.uk/pubs/priced/l111.pdf](http://www.hse.gov.uk/pubs/priced/l111.pdf)
- [6] Ministry of Economy, Trade and Industry, 高压ガス保安法&液化石油ガス保安規則, Available from [http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/law8.html](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/law8.html)
- [7] <https://synergist.aiha.org/201702-aiha-role-in-big-data-and-sensor-tech>
- [8] Dr. Asaf Adi. Wearables in the Enterprise IBM Research Day. Feb 2016; 7-18.
- [9] A. Sakurai et al., “Self-organizing map analysis of sensor networks for human movement tracking,” *Sensors and Actuators A* 110 (2005) 304-311.
- [10] A. Somov et al., “Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring,” *Sensors and Actuators A* 171 (2011) 398-405.
- [11] Organic, D. O. V., & Canisters, S.-P. (1999). *Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air Second Edition*.
- [12] Moen, B. E., & Hollund, B. E. (2000). Exposure to organic solvents among car painters in Bergen, Norway. *The Annals of Occupational Hygiene*, 44(3), 185-189. doi:10.1093/annhyg/44.3.185
- [13] Weschler, C. J., & Shields, H. C. (1997). Potential reactions among indoor pollutants. *Atmospheric Environment*, 31(21), 3487-3495.
- [14] Kaukiainen, A., Vehmas, T., Rantala, K., Nurminen, M., Martikainen, R., & Taskinen, H. (2004). Results of common laboratory tests in solvent-exposed workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77(1), 39-46. doi:10.1007/s00420-003-0476-z
- [15] BS EN 50271:2002, Electrical apparatus for the detection and measurement of combustible gases, toxic gases or oxygen. Requirements and tests for apparatus using software and/or digital technologies.
- [16] BS EN 954-1:1997, Safety of machinery. Safety related parts of control systems. General principles for design.
- [17] BS EN 45544-1:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the

- direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. General requirements and test methods.
- [18] BS EN 45544-2:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Performance requirements for apparatus used for exposure measurement.
- [19] BS EN 45544-3:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Performance requirements for apparatus used for general gas detection.
- [20] BS EN 45544-4:2016, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Guide for selection, installation, use and maintenance.
- [21] BS EN 50104:2010, Electrical apparatus for the detection and measurement of oxygen. Performance requirements and test methods.
- [22] BS EN 50194-1:2009, Electrical apparatus for the detection of combustible gases in domestic premises. Test methods and performance requirements.
- [23] BS EN 50291-1:2018, Gas detectors. Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises. Test methods and performance requirements.
- [24] BS EN 61779-1:2000, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. General requirements and test methods.
- [25] BS EN 61779-2:2000, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. Performance requirements for group I apparatus indicating a volume fraction up to 5% methane in the air.
- [26] BS EN 61779-3:2000, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. Performance requirements for group I apparatus indicating a volume fraction up to 100% methane in air.
- [27] BS EN 61779-4:2000, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. Performance requirements for group II apparatus indicating a volume fraction up to 100% lower explosive limit.
- [28] BS EN 61779-5:2000, Electrical apparatus for the detection and measurement of flammable gases. Performance requirements for group II apparatus indicating a volume fraction up to 100% gas.
- [29] IEC 61508-1:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements.
- [30] IEC 61508-3:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.
- [31] BS EN 45544-1:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours.

General requirements and test methods.

- [32] BS EN 45544-2:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Performance requirements for apparatus used for exposure measurement.
- [33] BS EN 45544-3:2015, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Performance requirements for apparatus used for general gas detection.
- [34] BS EN 45544-4:2016, Workplace atmospheres. Electrical apparatus used for the direct detection and direct concentration measurement of toxic gases and vapours. Guide for selection, installation, use and maintenance.
- [35] BS EN 482:2012+A1:2015, Workplace exposure. General requirements for the performance of procedures for the measurement of chemical agents.
- [36] BS EN 60079-29-2:2015, Explosive atmospheres. Gas detectors. Selection, installation, use and maintenance of detectors for flammable gases and oxygen.
- [37] Oregon OSHA's Technical Manual, SAMPLING, MEASUREMENTS, METHODS and INSTRUMENTS.
- [38] <https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-2017164eu-indicative-occupational-exposure-limit-values>.

## 附錄 1 感測器優化及驗證方法

### 一、感測裝置偵測極限、量測穩定度與干擾之確認

(一)總揮發性有機化合物(TVOCs)元件：Alphasense PID-AH TVOCs

#### 1.感測元件特性及外觀：

- (1) Alphasense PID-AH TVOCs 可測量低濃度揮發性有機物 (ppb Level)，利用感測器上的特定波長 LED (Ultraviolet light)，使感測器具有精確、小型、節能的特點，適用於智慧物聯網設備之空氣品質監測應用，使用 PID 原理 (Photo Ionization Detectors)，可以測量 0-50 ppm 的 VOC 和其它有毒氣體。

表 1 Alphasense PID-AH TVOCs 感測元件特性及外觀

特性	外觀
重量：8 g； 感測原理：PID 感測範圍：0-50 ppm 解析度：0.01 ppm 反應時間：90 秒 工作溫度：-40 ~ 55 °C； 工作濕度：0-75 % RH； 平均使用年限：> 2 年；	

#### 2.總揮發性有機化合物(TVOCs)元件測試

驗證總揮發性有機化合物(TVOCs)元件時，使用海昌(Haich)測試暴露艙進行溫濕度控制。但試驗中勿開啟其暴露艙中之照明燈，以免干擾 PID 感測訊號。

##### (1) 干擾性

##### A. 溫度干擾

- a.測試暴露艙濕度固定為：60 % RH ± 0.5 %RH；

b.測試暴露艙溫度範圍為：10°C~40°C，分別以 5°C 作為溫度增加梯度進行測試；

c.測試氣體濃度：0 ppm；

d.暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；

e.測試結果總揮發性有機化合物(TVOCs)量測波動範圍 -0.11 ~ 0.16 ppm(偏 5.22 %)，近於前節述可信賴偵測極限 (Reliable D.T. 0.11 ppm)。本研究規範總揮發性有機化合物 (TVOCs)所參考標準(0.56 ppm)，MDL 至少需低於 0.25 ppm(一般空氣中背景總揮發性有機化合物(TVOCs)濃度水準約為 0.3 ppm)。若以一般局限空間之作業環境下，環境溫度約略於 20°C~35°C 來看，量測波動範圍結果則縮小至 -0.06 ~ 0.11 ppm(偏差 3.48 %)。相關測試數據盒鬚圖如圖 1 所示。

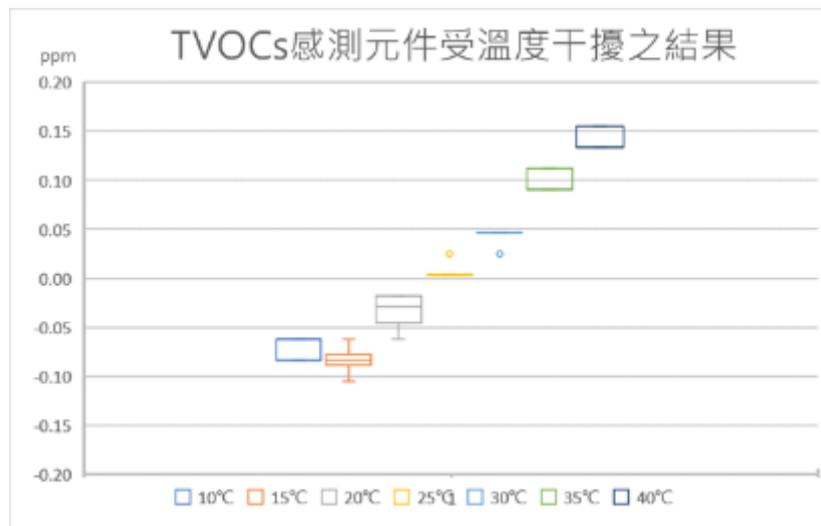


圖 1 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件受溫度干擾測試結果

## B. 濕度干擾

a.測試暴露艙溫度為：25°C ± 0.1°C；；

b.測試暴露艙濕度範圍為：50%~90%RH，分別以 10%作為

濕度增加梯度進行測試；

c.測試氣體濃度：0.0 ppm；

d.暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；

e.測試結果溫度量測波動範圍 -0.02 ~ 0.07 ppm(偏差 1.74%)。

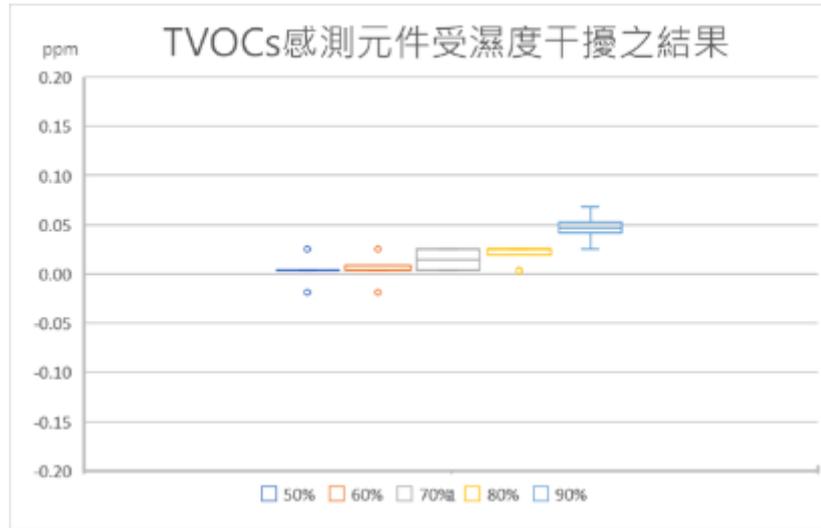


圖 2 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件受濕度干擾測試結果

### C. 苯(Benzene)干擾

a.測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；

b.測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；

c.測試暴露艙苯(Benzene)干擾濃度範圍為： $0.50 \text{ ppm} \sim 2.5 \text{ ppm}$ ，分別以  $0.50 \text{ ppm}$  作為濃度增加梯度進行測試；

d.暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；

e.測試結果苯(Benzene)濃度波動範圍約為  $0.85 \sim 2.74 \text{ ppm}$ (偏差 37.82%)，且感測值穩定變化。相關測試數據盒鬚圖如圖 3 所示。

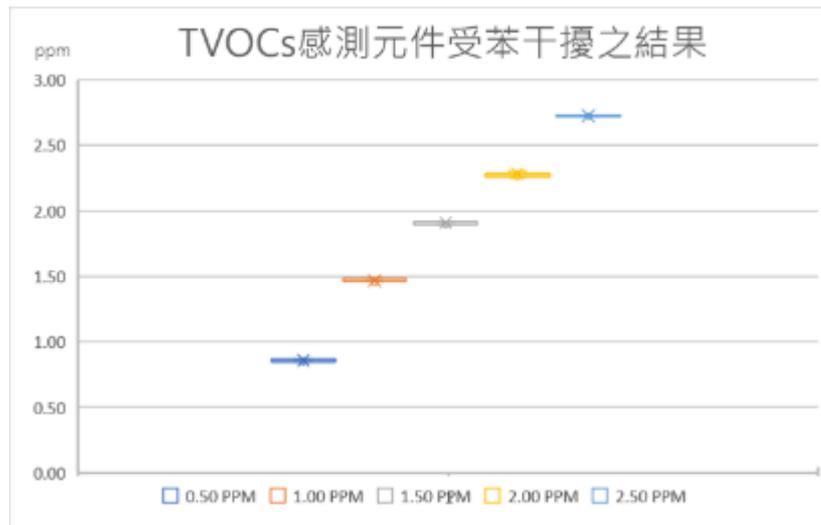


圖 3 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件受苯(Benzene)干擾測試結果

#### D. 氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾

- a. 測試暴露艙溫度(未控溫)範圍為： $28^{\circ}\text{C} \pm 4.0^{\circ}\text{C}$ ；
- b. 測試暴露艙濕度(未控濕)範圍： $60\% \text{ RH} \pm 8\% \text{ RH}$ ；
- c. 測試暴露艙氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾濃度範圍為： $0.25 \text{ ppm} \sim 1.5 \text{ ppm}$ ，分別以  $0.25 \text{ ppm}$  作為濃度增加梯度進行測試；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- e. 參考測試暴露艙因測試不同氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度而無法進行溫控，測試結果波動範圍  $0.00 \sim 0.03$ (偏差  $0.43\%$ )，且感測值穩定變化，推測測試氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度範圍內，總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件應未受干擾。

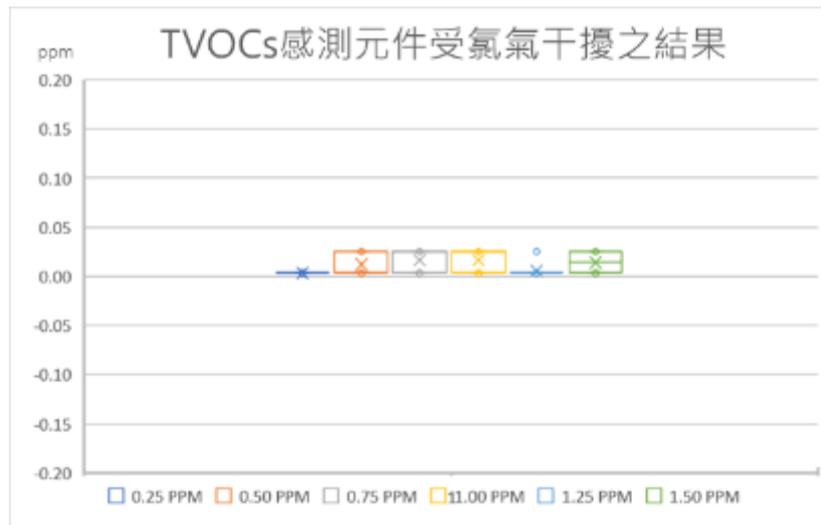


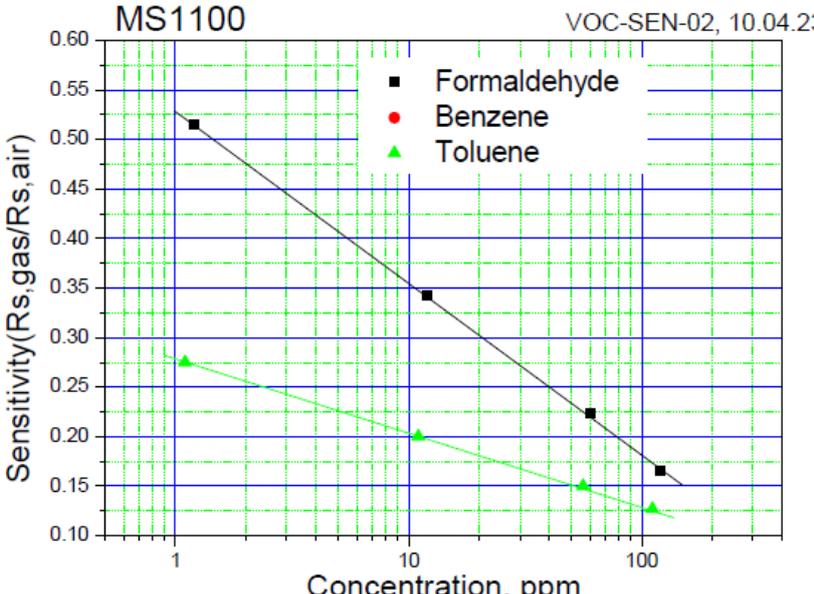
圖 4 總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件受氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾測試結果

## (二)總揮發性有機化合物(TVOCs)元件：MS 1100

### 1.感測元件特性及外觀：

總揮發性有機化合物感測器 MS 1100 主要用於檢測總揮發有機物 (TVOCs)氣體，是一款半導體類型的感測器產品。型錄載明具高的靈敏度和穩定性，能夠偵測 0.1ppm 以上的氣體。

表 2 MS 1100 感測元件特性及外觀

外觀																	
																	
原廠測試																	
 <p>MS1100 VOC-SEN-02, 10.04.23</p> <table border="1"> <caption>MS1100 Sensitivity Data (Estimated from Graph)</caption> <thead> <tr> <th>Concentration (ppm)</th> <th>Formaldehyde Sensitivity</th> <th>Benzene Sensitivity</th> <th>Toluene Sensitivity</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.52</td> <td>0.28</td> <td>0.28</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0.34</td> <td>0.20</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>0.16</td> <td>0.13</td> <td>0.13</td> </tr> </tbody> </table>		Concentration (ppm)	Formaldehyde Sensitivity	Benzene Sensitivity	Toluene Sensitivity	1	0.52	0.28	0.28	10	0.34	0.20	0.20	100	0.16	0.13	0.13
Concentration (ppm)	Formaldehyde Sensitivity	Benzene Sensitivity	Toluene Sensitivity														
1	0.52	0.28	0.28														
10	0.34	0.20	0.20														
100	0.16	0.13	0.13														
特性	規格																
外觀尺寸：8.1x8.1x12.2 (mm)； 重量：3 g； 感測原理：電化學。	工作電壓：5.0 V 工作電流：200 mA； 工作溫度：-10 ~ 50 °C； 工作濕度：5-90 % RH； 平均使用年限：> 3 年；																

## 2. 總揮發性有機化合物(TVOCs)元件測試

### (1) 偵測極限

- A. 測試條件：測試暴露艙溫度範圍為：25°C ± 0.1°C；
- B. 測試暴露艙濕度範圍：60 % RH ± 0.5 %RH；
- C. 測試氣體濃度：1.0 ppm(P)3，異丁烯(Isobutylene)；
- D. 設定 thermal 146i 濃度配置程序，定時開啟 P1、P3 兩點濃度循環濃度進樣；

E. 暴露艙密閉測試，測試歷程 2 小時。

表 3 總揮發有機物(TVOCs)感測元件 MDL 測試結果

方法偵測極限	總揮發有機物(TVOCs) (1.00 ppm)
1	1.2
2	1.1
3	1.2
4	1.2
5	1.2
6	1.2
7	1.2
平均值	1.2
S.T.D.	0.03
M.D.L.	0.09
Reliable D.T.	0.3

(2) 濃度線性

- A. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- B. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- C. 測試氣體濃度： $0 \sim 2.5 \text{ ppm}$  (P.1~P.6)，異丁烯(Isobutylene)；
- D. 設定 thermal 146i 濃度配置程序，定時開啟 P.1~P.6 不同濃度進樣；
- E. 暴露艙密閉測試，測試歷程 12 小時；
- F. 測試濃度趨勢圖如圖 12 所示；
- G. 六點濃度線性回歸(P1 ~ P6)，得其  $R^2$  值為 0.9813。



圖 5 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件濃度線性測試趨勢圖(單位 Count)

表 4 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件線性測試儀器值(Count)

TVOCs	Count	Value(ppm)
P.01	1288	0.00
P.02	1533	0.50
P.03	1821	1.00
P.04	2046	1.50
P.05	2206	2.00
P.06	2339	2.50

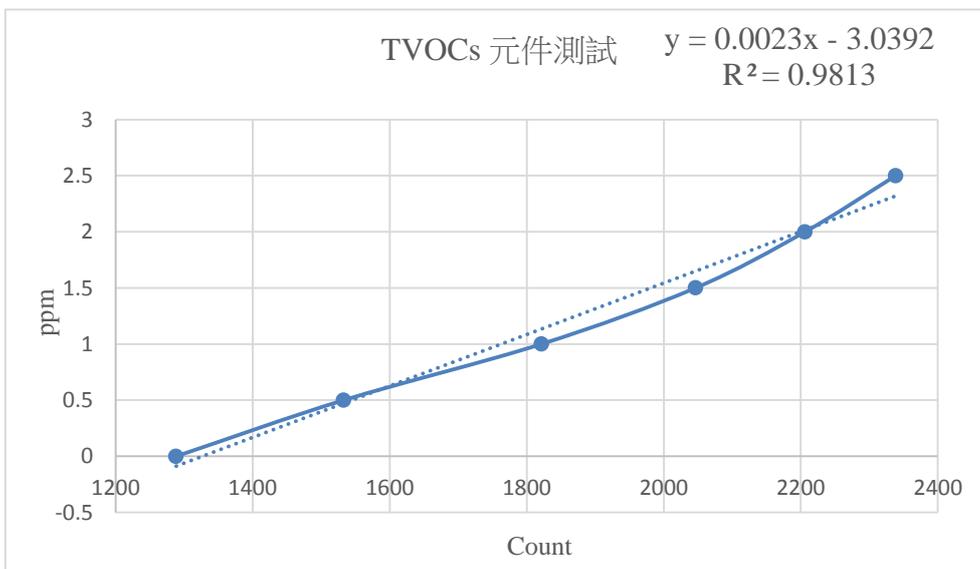


圖 6 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件線性測試結果

(3) 精密度

- A. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- B. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- C. 測試氣體濃度： $1.0 \text{ ppm (P.3)}$ ，異丁烯(Isobutylene)；
- D. 設定 thermal 146i 濃度配置程序，產生  $1.0 \text{ ppm}$  標準氣體用以進樣；
- E. 暴露艙密閉測試，測試歷程 1 小時；
- F. 測試結果符合小於 10%。

表 5 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件精密度測試

精密度	TVOCs (1.00 ppm)	di
1	1.10	0.10
2	1.00	0.00
3	1.00	0.00
4	1.00	0.00
5	1.10	0.10
6	1.10	0.10
7	1.10	0.10
Precision(%)		5.8 %

(4) 準確度

- A. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- B. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- C. 測試氣體濃度： $1.0 \text{ ppm (P.3)}$ ，異丁烯(Isobutylene)；
- D. 設定 thermal 146i 濃度配置程序，產生  $1.0 \text{ ppm}$  標準氣體用

以進樣；

E. 暴露艙密閉測試，測試歷程 2 小時；

F. 準確度(RSD%) = 5.10%。

表 6 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件準確度測試

準確度	TVOCs (1.00 ppm)
1	1.10
2	1.00
3	1.00
4	1.00
5	1.10
6	1.10
7	1.10
平均值	1.06
S.T.D.	0.05
RSD (%)	5.1%

(三)總揮發性有機化合物(TVOCs)元件：SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE

1.感測元件特性及外觀：

SGX Sensortech MiCS-VZ-89 感測模塊集結了 MOS 原理的感測器與智能檢測運算法，可用於檢測狹小空間中總揮發有機物(TVOCs)濃度，常用於會議室與車廂內總揮發有機物(TVOCs)濃度監測，且具備雙訊號輸出可用於控制通風設備。

表 7 SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE 感測元件特性及外觀

外觀																					
原廠測試																					
<p style="text-align: center;"><b>tVOC (isobutylene equiv)</b></p> <table border="1"> <caption>tVOC (isobutylene equiv) Data Points</caption> <thead> <tr> <th>PWM_out (%)</th> <th>tVOC (ppb)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>100</td></tr> <tr><td>15</td><td>200</td></tr> <tr><td>20</td><td>300</td></tr> <tr><td>25</td><td>400</td></tr> <tr><td>30</td><td>500</td></tr> <tr><td>35</td><td>600</td></tr> <tr><td>40</td><td>700</td></tr> <tr><td>45</td><td>800</td></tr> </tbody> </table>		PWM_out (%)	tVOC (ppb)	5	0	10	100	15	200	20	300	25	400	30	500	35	600	40	700	45	800
PWM_out (%)	tVOC (ppb)																				
5	0																				
10	100																				
15	200																				
20	300																				
25	400																				
30	500																				
35	600																				
40	700																				
45	800																				
特性	規格																				
外觀尺寸：14x22.9x1.6 (mm) ； 重量：3 g ； 感測原理：電化學。	工作電壓：5.0 V 工作電流：200 mA ； 工作溫度：0 ~ 50 °C ； 工作濕度：0-95 % RH ； 平均使用年限：> 2 年 ；																				

## 2.總揮發性有機化合物(TVOCs)元件測試

### (1) 濃度線性

- A. 測試暴露艙溫度範圍為：25°C ± 0.1°C ；
- B. 測試暴露艙濕度範圍：60 % RH ± 0.5 %RH ；
- C. 測試氣體濃度：0 ~ 2.5 ppm (P.1~P.6)，異丁烯(Isobutylene) ；

- D. 設定 thermal 146i 濃度配置程序，定時開啟 P.1~P.6 不同濃度進樣；
- E. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- F. 測試結果：濃度 count 值不穩定，感測器不堪使用；
- G. 測試濃度趨勢圖如圖 7 所示，因 count 值呈現雜亂無章，故該感測元件無法在實場中使用；

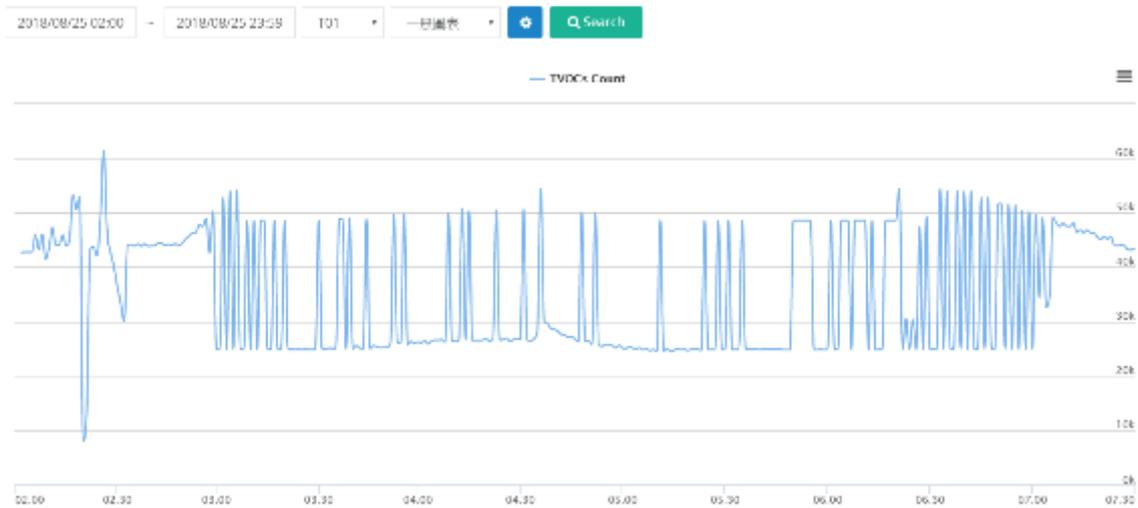


圖 7 總碳氫化合物(TVOCs)感測元件濃度線性測試趨勢圖(單位 Count)

### 3.各總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件比較

本研究綜合 Alphasense、MS1100 與 SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE 三種感測元件性能比較如下表，顯示線性、經密度、精準度、MS1100 在成本價格上及具優勢；但關於實際廠域之選擇卻會因為現場總揮發性有機化合物(TVOCs)濃度而有所差距，但經這次三款總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件的濃度測試，未來可因實際應用場所而提供不同型號之總揮發性有機化合物(TVOCs)感測元件的選用，已達到將感測器優化之目的。

表 8 總碳氫化合物(TVOCs) Alphasense、MS1100 與 SGX Sensortech  
MiCS-VZ-89TE 感測元件性能比較

Sensor	測試項目	Alphasense	MS 1100	SGX Sensortech MiCS-VZ-89TE
	外觀半徑 (mm)	7.62	8.10	14.00
	反應時間 (S)	90	< 10	-
	濃度線性 ( $R^2$ )	0.9998	0.9813	-
	精密度 (%)	- 1.3	5.8	-
	準確度 (%)	1.4	5.1	-
	單價 (NT)	18,500	1,800	-

(四)異丙醇(IPA)元件：Alphasense 4-Electrode gas Sensors 感測元件

1.感測元件特性及外觀：

- (1) Alphasense 4-Electrode gas Sensors 感測元件，為電化學、高穩定性氣體感測元件。因電化學感測器易受溫度影響，本研究自有電路板設計溫度感測器進行溫度自動補償，提高感測器可靠性和簡易調試，可精確的測量環境中異丙醇濃度。
- (2) 此元件感測範圍較廣，經本工作本研究於轉換電路訊號處理濃度轉換時，將特別設計程式編碼燒錄於 MCU 內，並侷限之濃度在線性之感測範圍，以提高感測器之感測線性，同時可作校正自動運算處理。

表 9 Alphasense 4-Electrode gas Sensors 感測元件特性及外觀

外觀	
<p>Technical drawings of the Alphasense 4-Electrode gas sensor. The Top View shows a circular sensor with an outer diameter of <math>\varnothing 27.1</math> mm and an inner diameter of <math>\varnothing 11</math> mm. The Bottom View shows a 45-degree chamfered edge, a 17.0 PCD (Pitch Circle Diameter) for the four electrodes, and a location pin. The Side View shows a height of 16.5 mm, a diameter of <math>\varnothing 32.3</math> including the label, and a diameter of <math>\varnothing 2.8</math> for the pins. The label includes the text 'CHLORINE CL2-B', a barcode, and the number '995'. A note indicates 'Sensing area Do not obscure'. A note states 'All dimensions in millimetres (<math>\pm 0.1</math>mm)'. A note indicates '1 recess' for the pins.</p>	
原廠測試	
<p>Graph showing the percentage output of the sensor relative to 20°C as a function of temperature. The x-axis represents Temperature in degrees Celsius, ranging from -30 to 50. The y-axis represents % Output (referenced to 20°C), ranging from 70 to 110. Multiple data series are plotted, showing a sharp increase in output between -20°C and 0°C, reaching a plateau around 100% output at 20°C and above. The output is relatively stable between 20°C and 50°C, with some minor fluctuations.</p>	
特性	規格
外觀尺寸：32x32x16.5 (mm)； 重量：13 g； 感測原理：電化學。 帶電路板，轉換電壓輸出。	工作電壓：5.0 V 工作電流：200 mA； 工作溫度：-30 ~ 50 °C； 工作濕度：15-90 % RH； 平均使用年限：> 2 年；

## 2. 異丙醇(IPA)元件測試

### (1) 干擾性

#### A. 溫度干擾

a. 測試暴露艙濕度固定為：60 % RH  $\pm$  0.5 % RH；

b. 測試暴露艙溫度範圍為：10°C ~ 40°C，分別以 5°C 作為溫度

增加梯度進行測試；

c. 測試氣體濃度：0.0 ppm；

d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；

e. 測試結果異丙醇(IPA)量測波動範圍結果約由 0.4 ~ 1.7 ppm(偏差 0.65 %)；參考前節述之相較可信賴偵測極限(Reliable D.T. 3.49 ppm)。由於本研究中原先規劃異丙醇(IPA)感測範圍參考管制標準應需至 400 ppm，但考慮整合測試且同為碳氫化合物(VOCs，揮發性有機物)屬性之總碳氫化合物(TVOCs)、苯(Benzene)等感測元件其線性範圍(管制濃度)皆小於 10 ppm。於是放大異丙醇(IPA)可偵測範圍同時也一併鈍化 Sensor 訊號敏感度；若以一般局限空間之作業環境下，環境溫度約略於 20°C~35°C 來看，量測波動範圍結果約由 0.6 ~ 1.1 ppm(偏差 0.25 %)。相關測試數據盒鬚圖如圖 8 所示。

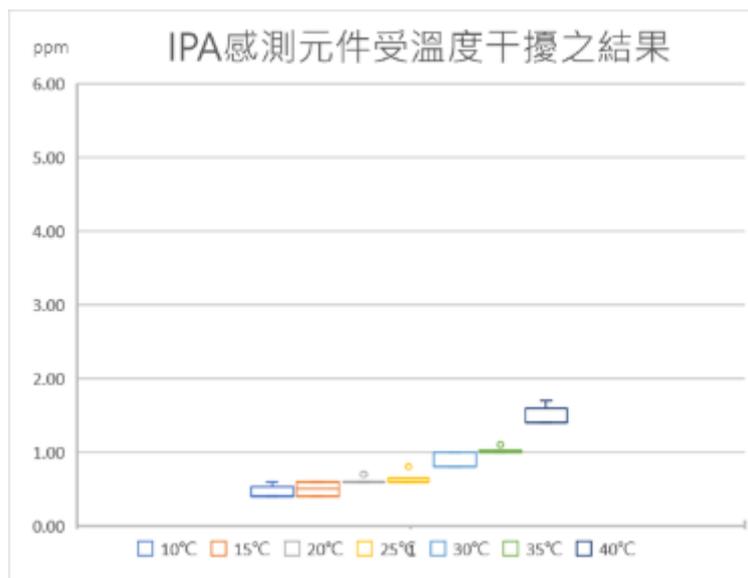


圖 8 異丙醇(IPA)感測元件受溫度干擾測試結果

## B. 濕度干擾

- a. 測試暴露艙溫度為：25°C；
- b. 測試暴露艙濕度範圍為：50%~90%RH，分別以 10%作為濕度增加梯度進行測試；
- c. 測試氣體濃度：0.0 ppm；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；
- e. 測試結果溫度量測波動範圍約 0.6 ~ 1.1 ppm(偏差 0.25 %)。  
相關測試數據盒鬚圖如圖 9 所示。

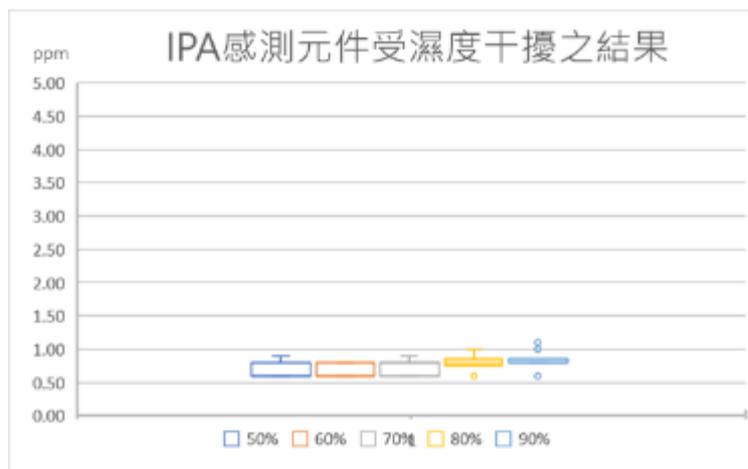


圖 9 異丙醇(IPA)感測元件受濕度干擾測試結果

## C. 異丁烯(Isobutylene)干擾

- a. 測試暴露艙溫度範圍為：25°C ± 0.1°C；
- b. 測試暴露艙濕度範圍：60 % RH ± 0.5 %RH；
- c. 測試暴露艙異丁烯(Isobutylene)干擾濃度範圍為：0.50 ppm ~ 3.0 ppm，分別以 0.50 ppm 作為濃度增加梯度進行測試；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；

e. 測試結果異丙醇(IPA)量測波動範圍結果約由 0.8 ~ 1.8 ppm(偏差 0.50 %)。相關測試數據盒鬚圖如圖 10 所示。

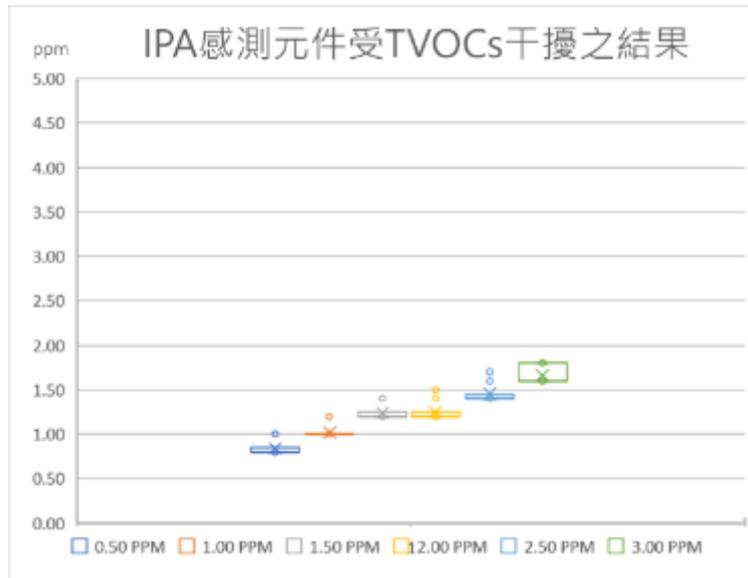


圖 10 異丙醇(IPA)感測元件受總碳氫化合物(TVOCs)干擾測試結果

#### D. 苯(Benzene)干擾

- 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- 測試暴露艙苯(Benzene)干擾濃度範圍為： $0.50 \text{ ppm} \sim 10 \text{ ppm}$ ，濃度增加梯度進行測試；
- 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；
- 測試結果異丙醇(IPA)濃度波動範圍約為  $0.00 \sim 0.20 \text{ ppm}$ (偏差 0.10 %)，且感測值穩定變化。相關測試數據盒鬚圖如圖 11 所示。



圖 11 異丙醇(IPA)感測元件受苯(Benzene)干擾測試結果

#### E. 氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾

- a. 測試暴露艙溫度(未控溫)範圍為： $28^{\circ}\text{C} \pm 4.0^{\circ}\text{C}$ ；
- b. 測試暴露艙濕度(未控濕)範圍： $60\% \text{ RH} \pm 8\% \text{ RH}$ ；
- c. 測試暴露艙氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾濃度範圍為： $0.25 \text{ ppm} \sim 1.5 \text{ ppm}$ ，分別以  $0.25 \text{ ppm}$  作為濃度增加梯度進行測試；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- e. 參考測試暴露艙因測試不同氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度而無法進行溫控，測試結果波動範圍約為  $0.8 \sim 1.2$ ，且感測值穩定變化(偏差  $0.20\%$ )，推測測試氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度範圍內，異丙醇(IPA)感測元件應未受干擾。

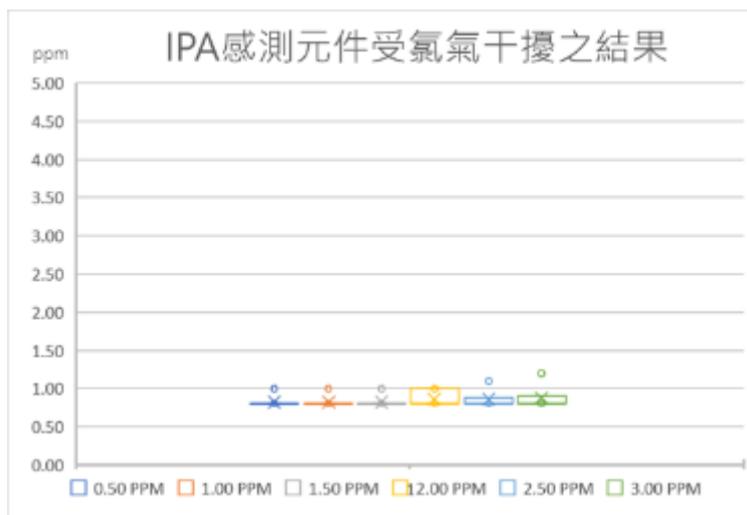


圖 12 異丙醇(IPA)感測元件受氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾測試結果

### (五) 苯(Benzene)元件：Alphasense ETO-B1 Sensors

#### 1. 苯(Benzene)元件測試

##### (1) 干擾性

##### A. 溫度干擾

- a. 測試暴露艙濕度固定為：60 % RH ± 0.5 %RH；
- b. 測試暴露艙溫度範圍為：20°C~35°C，分別以 5°C 作為溫度增加梯度進行測試；
- c. 測試氣體濃度：0.0 ppm；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- e. 測試結果苯(Benzene)量測波動範圍-0.11 ~ 1.21 ppm(偏差 26.52 %)，相關測試數據盒鬚圖如圖 13 所示。

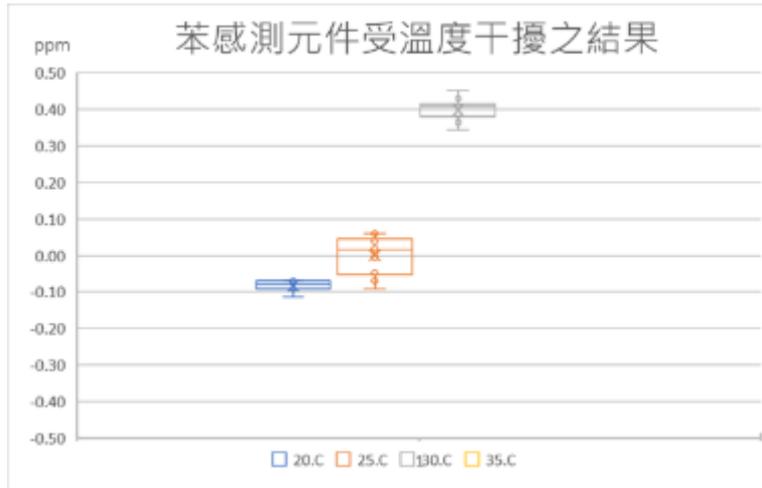


圖 13 苯(Benzene)感測元件受溫度干擾測試結果

B. 濕度干擾

a. 測試暴露艙溫度為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；

b. 測試暴露艙濕度範圍為：40%~70%RH，分別以 10%作為濕度增加梯度進行測試；

c. 測試氣體濃度：0.0 ppm；

d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；

e. 測試結果溫度量測波動範圍 -0.11 ~ 0.45 ppm(偏差 11.31%)。

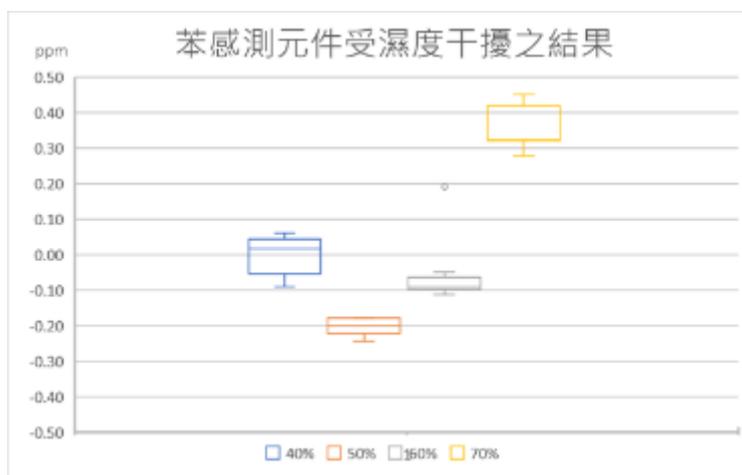


圖 14 苯(Benzene)感測元件受濕度干擾測試結果

C. 氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾

- a. 測試暴露艙溫度(未控溫)範圍為：28°C ± 4.0°C；
- b. 測試暴露艙濕度(未控濕)範圍：60 % RH ± 8 %RH；
- c. 測試暴露艙氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾濃度範圍為：0.25 ppm ~ 5.0 ppm，為濃度增加梯度進行測試；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- e. 參考測試暴露艙因測試不同氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度而無法進行溫控，測試結果波動範圍-0.22~-0.05(偏差 3.48 %)，其相關測試數據盒鬚圖如相關測試數據盒鬚圖如圖 15 所示。

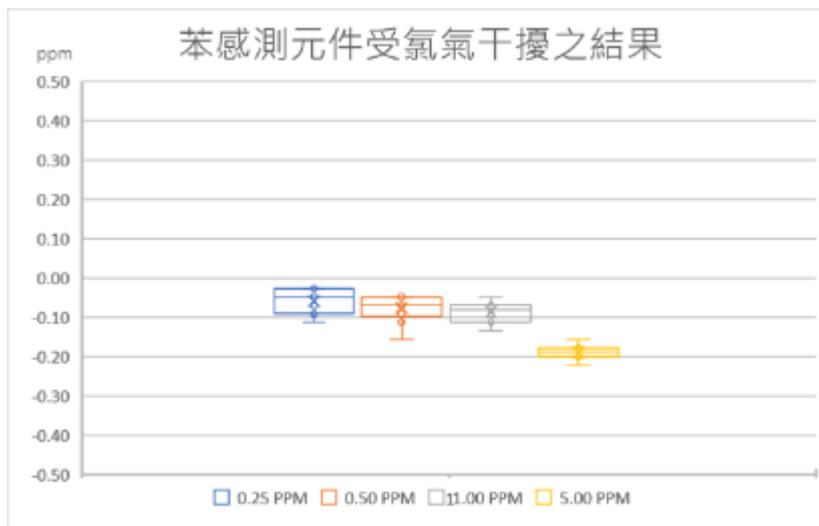


圖 15 苯(Benzene)感測元件受氯氣(Cl<sub>2</sub>)干擾測試結果

(六) 氯氣(Cl<sub>2</sub>)元件：Alphasense Chlorine Sensors 感測元件

1. 氯氣(Cl<sub>2</sub>)元件測試

由於氯氣極度容於水氣中，無法於試驗用海昌(Haich)測試暴露艙中，進行溫濕度控制。故其測試暴露艙非恆溫恆濕控制，僅以夜

間(降低人為干擾)於密閉測試暴露艙中進行各項測試。

(1) 干擾性

A. 溫度干擾

- a. 測試暴露艙濕度固定為： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- b. 測試暴露艙溫度範圍為： $10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，分別以  $5^{\circ}\text{C}$  作為溫度增加梯度進行測試；
- c. 測試氣體濃度： $0 \text{ ppm}$ ；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；
- e. 測試結果氯氣( $\text{Cl}_2$ )量測波動範圍結果約為  $0.10 \sim -0.09 \text{ ppm}$ (偏差  $7.51\%$ )。相近於前節述可信賴偵測極限(Reliable D.T.  $0.10 \text{ ppm}$ )。及本研究規範氯氣( $\text{Cl}_2$ )所參考管制標準( $0.5 \text{ ppm}$ )，MDL 至少需低於  $0.2 \text{ ppm}$ 。若以一般局限空間之作業環境下，環境溫度約略於  $20^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  來看，量測波動範圍結果則縮小至  $-0.10 \sim 0.06 \text{ ppm}$ (偏差  $6.37\%$ )。相關測試數據盒鬚圖如圖 16 所示。

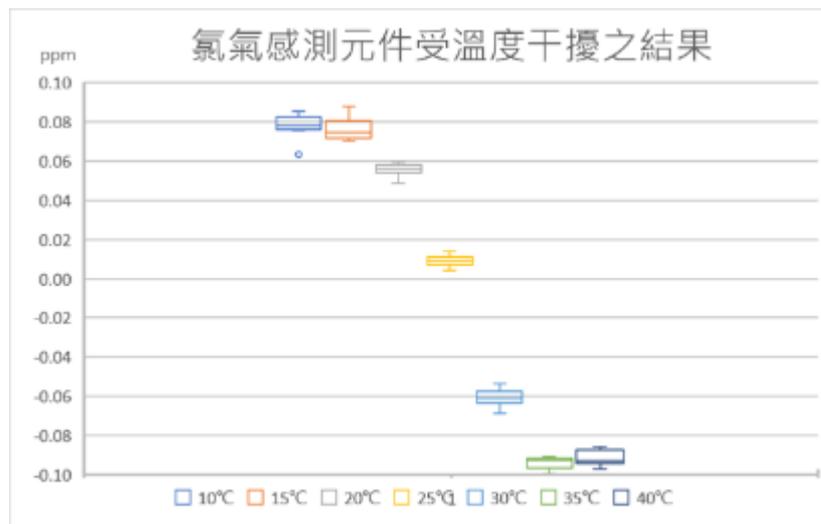


圖 16 氯氣( $\text{Cl}_2$ )感測元件受溫度干擾測試結果

## B. 濕度干擾

- a. 測試暴露艙溫度為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- b. 測試暴露艙濕度範圍為： $50\% \sim 90\% \text{RH}$ ，分別以 10% 作為濕度增加梯度進行測試；
- c. 測試氣體濃度： $0 \text{ ppm}$ ；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；
- e. 測試結果溫度量測波動範圍約為  $-0.01 \sim 0.05 \text{ ppm}$  (偏差 2.28%)。相關測試數據盒鬚圖如圖 17 所示。

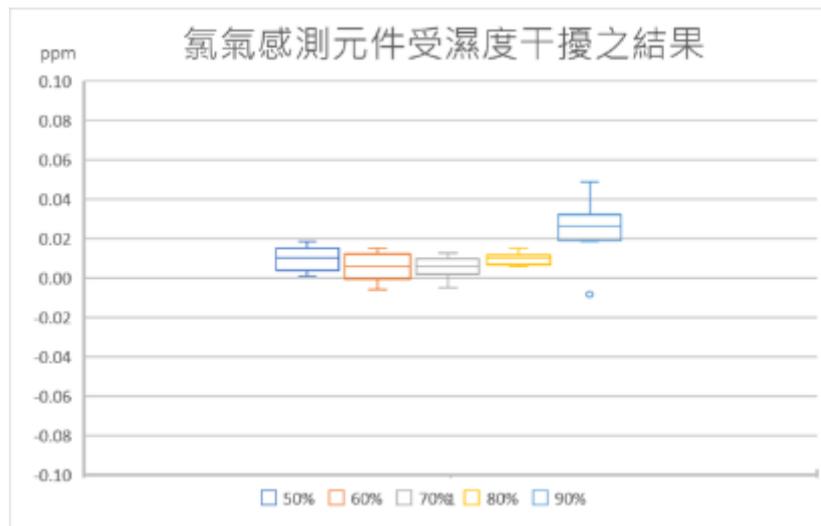


圖 17 氯氣( $\text{Cl}_2$ )感測元件受濕度干擾測試結果

## C. 異丁烯(Isobutylene)干擾

- a. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- b. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$
- c. 測試暴露艙異丁烯(Isobutylene)干擾濃度範圍為： $0.50 \text{ ppm}$

~ 3.0 ppm，分別以 0.50 ppm 作為濃度增加梯度進行測試；

d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 6 小時；

e. 測試結果氯氣( $\text{Cl}_2$ )濃度波動範圍約為 0.01 ~ 0.04 ppm(偏差 1.14 %)，且感測值穩定變化。相關測試數據盒鬚圖如圖 18 所示。

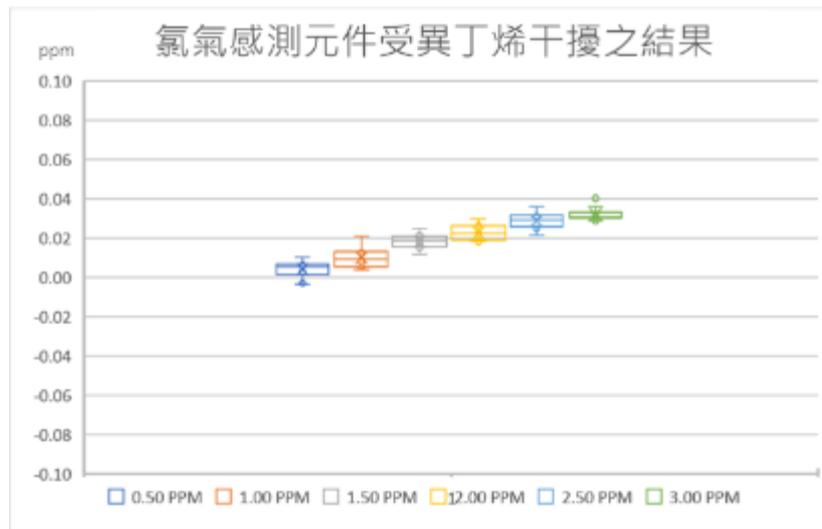


圖 18 氯氣( $\text{Cl}_2$ )感測元件受異丁烯(Isobutylene)干擾測試結果

#### D. 異丙醇(IPA)干擾

a. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；

b. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；

c. 測試暴露艙異丙醇(IPA)干擾濃度範圍為：20 ppm ~ 100 ppm，分別以 20 ppm 作為濃度增加梯度進行測試；

d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；

e. 測試結果氯氣( $\text{Cl}_2$ )濃度波動範圍約為 -0.07 ~ -0.05 ppm(偏差 0.68 %)，且感測值穩定變化。相關測試數據盒鬚圖如圖 19 所示。

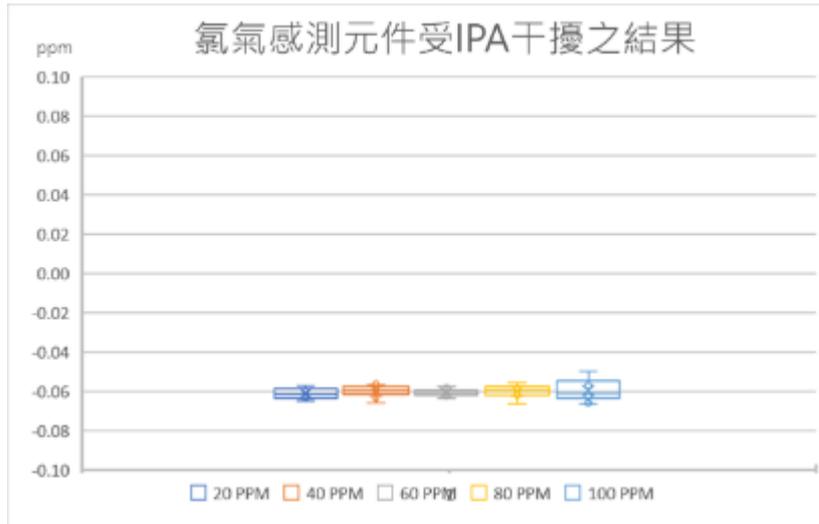


圖 19 氯氣(Cl<sub>2</sub>)感測元件受異丙醇(IPA)干擾測試結果

#### E. 苯(Benzene)干擾

- a. 測試暴露艙溫度範圍為： $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ；
- b. 測試暴露艙濕度範圍： $60\% \text{ RH} \pm 0.5\% \text{ RH}$ ；
- c. 測試暴露艙苯(Benzene)干擾濃度範圍為： $0.50 \text{ ppm} \sim 2.5 \text{ ppm}$ ，分別以  $0.50 \text{ ppm}$  作為濃度增加梯度進行測試；
- d. 暴露艙密閉測試，測試歷程 5 小時；
- e. 測試結果氯氣(Cl<sub>2</sub>)濃度波動範圍約為  $-0.01 \sim 0.00 \text{ ppm}$ (偏差 0.46%)，且感測值穩定變化。相關測試數據盒鬚圖如圖 20 所示。

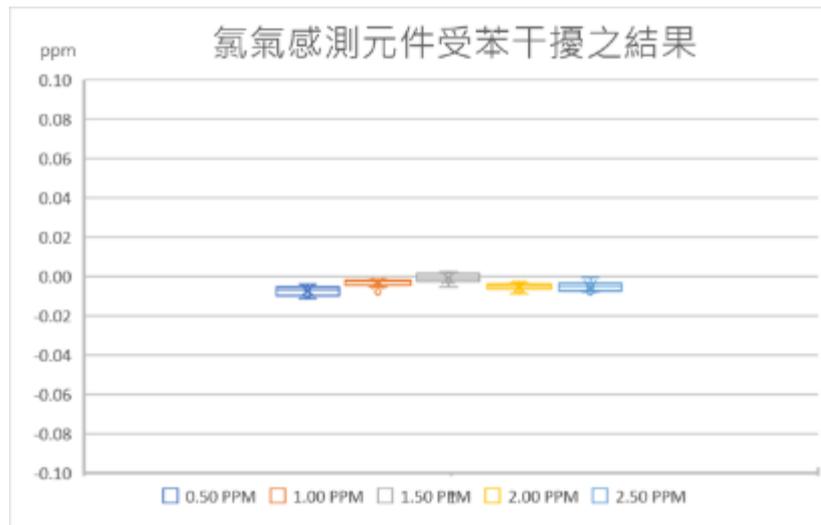


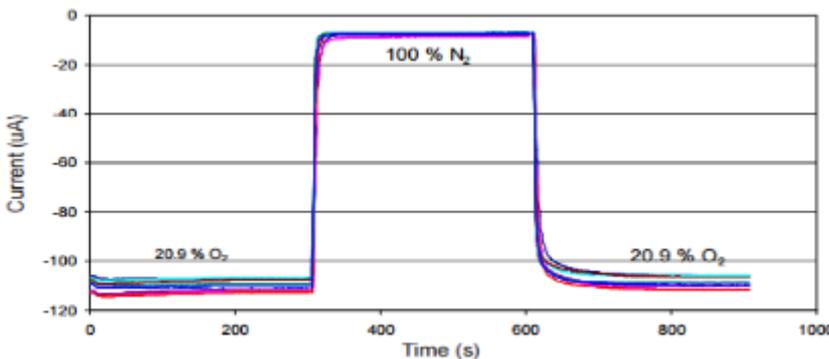
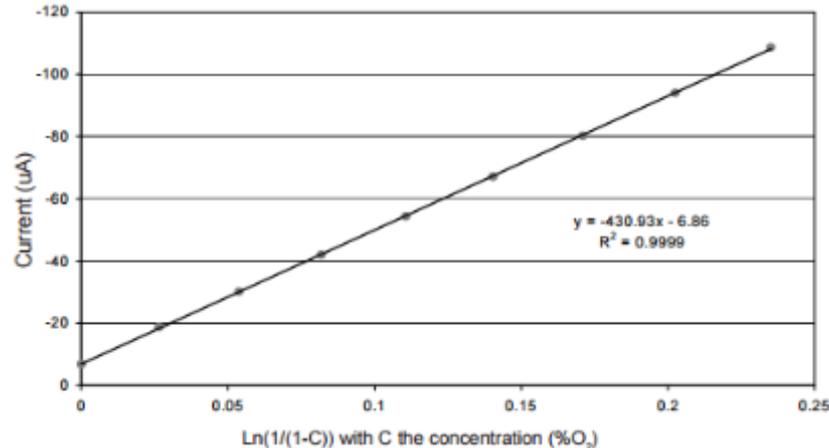
圖 20 氯氣(Cl<sub>2</sub>)感測元件受苯(Benzene)干擾測試結果

### (七)氧氣(O<sub>2</sub>)元件：Alphasense Oxygen Sensors 感測元件

#### 1.感測元件特性及外觀：

Alphasense Oxygen Sensors 感測元件，為三電極電化學感測器，感測量程為 0-30% VOL，廣泛應用在煤礦業、鋼鐵業、石油化工、醫療等場景，可內嵌於氧氣警報器、分析儀內，Alphasense 感測元件可有 2 年或以上壽命，可於-30 至 50 度下工作。Alphasense 之氣體感測元件對不同濃度氣體產生不同的微弱電壓值，經訊號放大轉換為濃度值。感測範圍較廣，經本工作本研究於轉換電路訊號處理濃度轉換時，將特別設計程式編碼燒錄於 MCU 內，並侷限之濃度在線性之感測範圍，以提高感測器之感測線性，同時可作校正自動運算處理。

表 10 Alphasense Oxygen Sensors 感測元件特性及外觀

外觀	
 <p style="text-align: center;">All dimensions in millimetres (<math>\pm 0.15\text{mm}</math>)</p>	
原廠測試	
	
	
特性	規格
<p>外觀尺寸：32x32x16.5 (mm) ；                      重量：6 g ；                      感測原理：電化學。</p>	<p>工作電壓：5.0 V                      工作電流：200 mA ；                      工作溫度：-30 ~ 50 °C ；                      工作濕度：5-95 % RH ；                      平均使用年限：&gt; 2 年 ；</p>

(八)測試結果彙整

- 1.考量比對系統準確度波動可能造成之有：a.)標準品濃度配製(Thermal 146i)，系統不準確度< 3%；b.)暴露艙(溫控、濕控)之系統不準確度< 1%。
- 2.氯氣已考量訊號放大，逼近 Sensor 偵測極限。

表 11 感測元件性能評估測試結果彙整

項目	總碳氫化合物 (TVOCs)	異丙醇 (IPA)	苯 (Benzene)	氯氣 (Cl <sub>2</sub> )
TWA (8 小時日時量平均 容許濃度)	--	400 ppm (983 mg/m <sup>3</sup> )	1 ppm (3.2 mg/m <sup>3</sup> )	0.5 ppm (1.5 mg/m <sup>3</sup> )
STEL (短時日時量平均容 許濃度)	0.56 ppm 1.287 mg/m <sup>3</sup> (參考值)	500 ppm	2 ppm	1 ppm
CEILING (最高容許濃度)	--	--	--	0.5 ppm
Method D.L. < 5 ppm (0.1-0.4 倍) > 5 ppm (0.1 倍) (本研究合約規範)	0.25 ppm	40.0 ppm	0.40 ppm	0.20 ppm
Method D.L. (方法偵測極限)	0.03 ppm	1.05 ppm	0.03 ppm	0.02 ppm
Reliable D.L. (信賴偵測極限)	0.11 ppm	3.49 ppm	0.11 ppm	0.10 ppm
Lineality (濃度線性及範圍)	R <sup>2</sup> =0.9998 0.0~2.5 ppm	R <sup>2</sup> =0.9910 0.0~100 ppm	R <sup>2</sup> =0.9988 0.0~2.5 ppm	R <sup>2</sup> =0.9964 0.0~1.25 ppm
Precision (%) (精密度)	-1.29 %	6.33 %	2.29 %	-4.57 %
RSD (%) (準確度)	1.4 %	1.17 %	9.29 %	1.02 %

項目	總碳氫化合物 (TVOCs)	異丙醇 (IPA)	苯 (Benzene)	氯氣 (Cl <sub>2</sub> )
Response (Sec.) (反應性, T <sub>90</sub> 濃度到達時間/濃度歸零時間)	T <sub>90</sub> = 10 SEC (0.0-2.0 ppm) T <sub>90</sub> = 37 SEC (2.0-0.0 ppm)	T <sub>90</sub> = 129 SEC (0.0-20.0 ppm) T <sub>90</sub> = 177 SEC (20.0-0.0 ppm)	T <sub>90</sub> = 14 SEC (0.0-1.0 ppm) T <sub>90</sub> = 253 SEC (1.0-0.0 ppm)	T <sub>90</sub> = 77 SEC (0.0-0.50 ppm) T <sub>90</sub> = 79 SEC (0.50-0.0 ppm)
TEMP Interference Range : 20°C~35°C Drift (%) (一般作業場所溫度偏差干擾)	-0.06~0.11 ppm (3.48 %)	-0.6~1.1 ppm (0.25 %)	-0.11~1.21 ppm (26.52 %)	-0.10~0.06 ppm (6.37 %)
TEMP Interference Range : 10°C~40°C Drift (%) (溫度偏差干擾)	-0.11~0.16 ppm (5.22 %)	-0.4~1.7 ppm (0.65 %)	--	-0.10~0.09 ppm (7.51 %)
HUM Interference Range : 50%~90% Drift (%) (濕度偏差干擾)	-0.02~0.07 ppm (1.74%)	0.6~1.1 ppm (0.25 %)	-0.11~0.45 ppm (11.31 %)	-0.01~0.05 ppm (2.28 %)
Isobutylene Interference Range : 0.5~3.0 ppm Drift (%) (異丁烯偏差干擾)	--	0.8~1.8 ppm (0.5 %)	0.0~0.46 ppm (9.26 %)	0.01~0.04 ppm (1.14 %)
IPA Interference Range : 20.0~100.0 ppm Drift (%) (異丙醇偏差干擾)	--	--	--	-0.07~-0.05 ppm (1.25 %)
Benzene Interference Range : 0.5~2.5 ppm Drift (%) (苯偏差干擾)	0.85~2.74 ppm (37.82 %)	0.0~0.2 ppm (0.10 %)	--	0.00~0.03 ppm (0.43 %)

項目	總碳氫化合物 (TVOCs)	異丙醇 (IPA)	苯 (Benzene)	氯氣 (Cl <sub>2</sub> )
Cl <sub>2</sub> Interference Range : 0.25~1.25 ppm Drift (%) (氯氣偏差干擾)	0.0~0.03 ppm (0.43 %)	0.8~1.2 ppm (0.20 %)	-0.22~0.05 ppm (3.48 %)	--

## 二、感測時之干擾確認與排除方法

本研究使用之感測器可使用原廠開發之 Toxic Sensor Evaluation Board，可針對特定物種進行通用感測器優化調整，以降低感測化合物物性相近之干擾，提高靈敏度及精確度。經調適之感測元件對物種反應訊號靈敏度、感測訊號響應更大。其優化調整步驟如下：

- (一) 設定起始濃度(initial measuring concentration, IMC)；
- (二) 將暴露艙內氣體流量設置在 300~500 sccm，並將 Toxic Sensor Evaluation Board 之電流定義為 0 V；
- (三) 將電位訊號轉換 (for UMTOX-2: 10 uV/nA)；
- (四) 當 <300 nA 時打入氣體，持續至穩定狀態即可測試反應時間與敏感度；
- (五) 每次將電位增加 50 mV，重複步驟 2 直至電位達到 500 mV；
- (六) 將通用感測元件優化調至最適電訊範圍。



圖 21 Toxic Sensor Evaluation Board

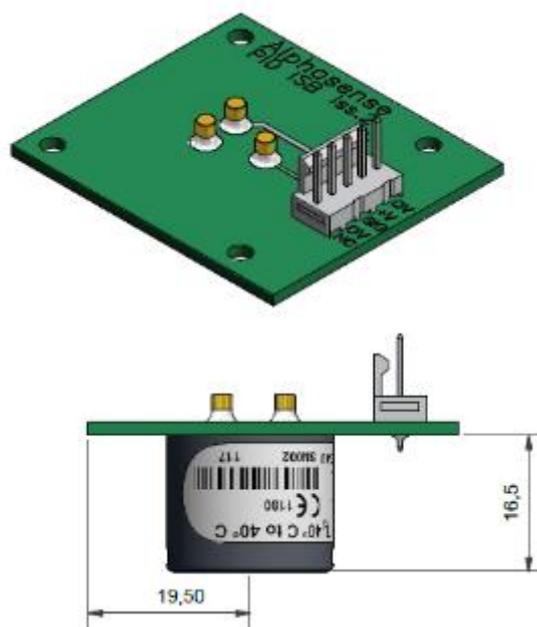


圖 22 Toxic Sensor Evaluation Board 結構圖

### 三、相應不同型式之裝置電路開發設計

#### (一)NB-IoT 模組

中華電信、台哥大、遠傳等電信三雄，於 2017 年 12 月才剛自國家通訊傳播委員會(NCC)各取得 300 萬門物聯網門號，之後也將針對 NB-IoT 推出商用服務收費，未來將依據傳輸量分級收費。本研究設計規劃 NB-IoT 通訊模組作為無線傳輸方式選項之一。目前本研究主要採用，SIMCom 公司 SIM7000E 模組之通訊晶片，由於 NB-IoT 為新型 IoT 通訊架構，故凡在測試步驟及技術資料部分較為缺法，也間接造成系統縫合上之困難。SIM7000E 運行功率為 11mA，待機功率約為 9 $\mu$ A，可採用國內電信三雄無線通訊使用。



圖 23 感測裝置使用之 SIMCom 公司 SIM7000E 模組之通訊晶片圖示

## (二) Wi-Fi 模組

ESP8266 Wi-Fi 模組之使用，主要為藉由 UART-Wi-Fi 傳輸模組，傳送資料至後端資料庫。主要選用原因為著重其小體積封裝(12mm x 17mm x 3mm)、低能耗及合宜性價比。其符合 802.11 b/g/n 標準、支援 STA/AP、多路 TCP Client 連線，並以 3.3V 之低壓供電為電源。

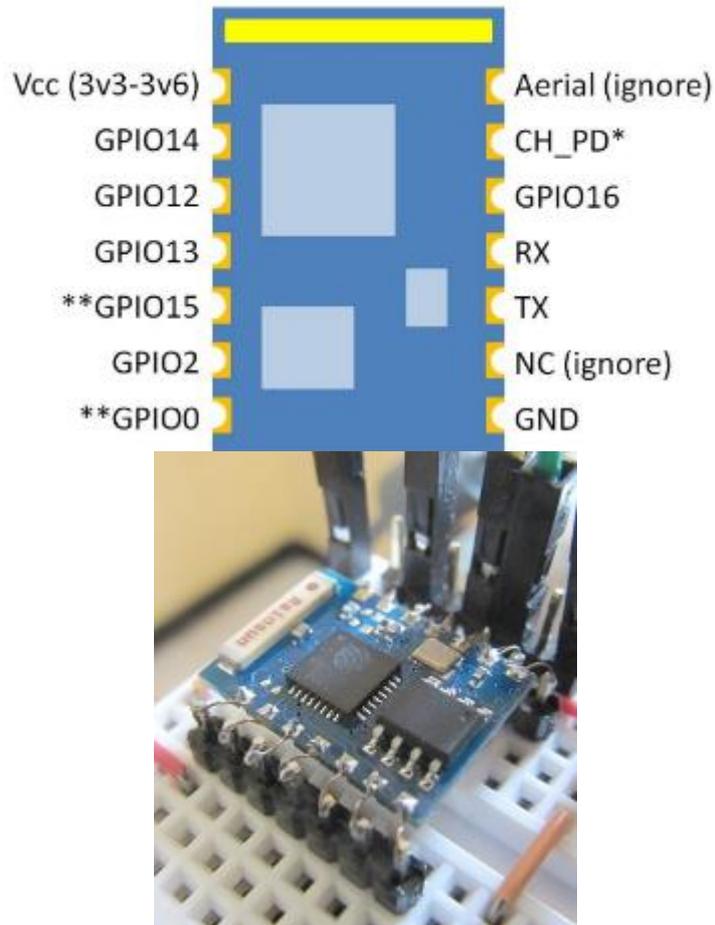


圖 24 ESP8266 Wi-Fi 模組之郵票孔介面位址示意圖(左)與外觀(右)

理論功耗(3.3V 的電源、25°C 的環境溫度下)如下表其量均在天線介面處；另發射資料是基於 90% 的占空比，在持續發射的型態下測得的。

表 12 ESP8266 Wi-Fi 模組之理論傳輸功耗表

型態	通常	單位
傳輸 802.11b, CCK 1Mbps, Pout=+19.5dBm	215	mA
傳輸 802.11b, CCK 11Mbps, Pout=+18.5dBm	197	mA
傳輸 802.11b, OFDM54 Mbps, Pout=+16dBm	145	mA
傳輸 802.11n, MCS7, Pout=+14dBm	135	mA
接收 802.11b, 包長 1024 位元組, -80dBm	100	mA
接收 802.11g, 包長 1024 位元組, -70dBm	100	mA
接收 802.11n, 包長 1024 位元組, -65dBm	102	mA
系統待機型態	70	mA
關機	0.5	μA

註：包長==封包長度

### (三)BT(Bluetooth)模組

BB2710-29(Broadcom) 藍牙模組之使用 (2.4GHz-1.48GHz unlicensed ISM band), 主要為藉由 UART-BR 傳輸模組, 再現地達到修改感測器內部參數之目的, 同時也能藉由行動裝置上 APP 輔助測值顯示及感測濃度之警示。主要選用考量為著重其小體積封裝(25mm x 13mm x 1.8mm)、低能耗及合宜性價比, 並符合 classics&BLE 藍牙版本(V2.1+DER, BT3.0, BT4.0 BLE)、GATT&SPP 標準通訊協議。其理論功耗(3.3V 的電源、25°C 的環境溫度下)如表 13 所示。

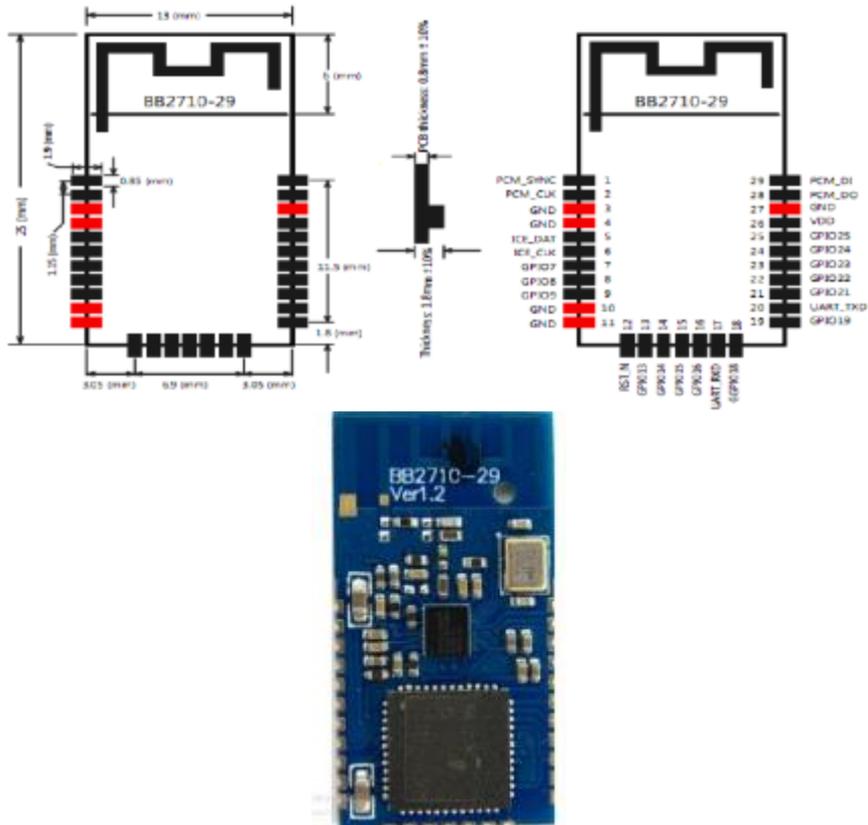


圖 25 BB2710-29 BT 模組之體積及接點介面位址示意(左)與外觀(右)

表 13 BB2710-29 Bluetooth 模組之理論傳輸功耗表

Operation Mode	AVG Current		Unit
	VDD=3.3V	VDD=1.8V	
Broadcast	8.55	8.28	mA
Connected+NoData	13.88	13.62	mA
Connected+Data(10bytes, 20ms)	14.74	14.60	mA
Connected+Data(10bytes, 100ms)	14.22	13.98	mA
Connected+Data(10bytes, 1000ms)	13.87	13.63	mA
Connected+Data(255bytes, 20ms)	14.51	14.28	mA
Connected+Data(255bytes, 100ms)	14.55	14.29	mA
Connected+Data(255bytes, 1000ms)	14.02	13.77	mA

(四)控制邏輯程式開發環境

本工作本研究使用 MDK-ARM 做為感測器系統開發工具，Keil

Microcontroller Development Kit (MDK-ARM) 開發工具 = MDK core + Software Packs; 其中 MDK core 包含 ARM C/C++ compiler、assembler、linker、uVision IDE/Debugger、pack installer 等; Software Packs 包含 CMSIS、Device Startup+Driver、Middleware 等。MDK-ARM 軟體為基於 Cortex-M、Cortex-R4、ARM7、ARM9 處理器設備提供了一個開發環境，專為微控制器應用而設計，可用於大多數苛刻的嵌入式應用。

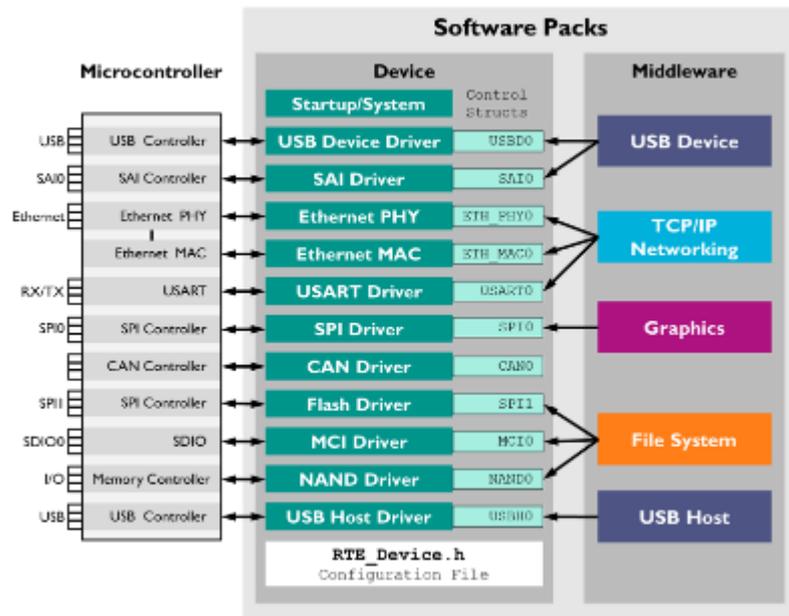


圖 26 MDK core + Software Packs 硬體功能開發架構示意圖

對於 ARM Startup up code 可由 CMSIS(Cortex-M Software Interface Standard, ARM® Cortex 微控制器軟體介面標準)讓不同的 MCU 在存取 Cortex-M 時都使用這個軟體介面，大幅簡化系統開發之複雜性。

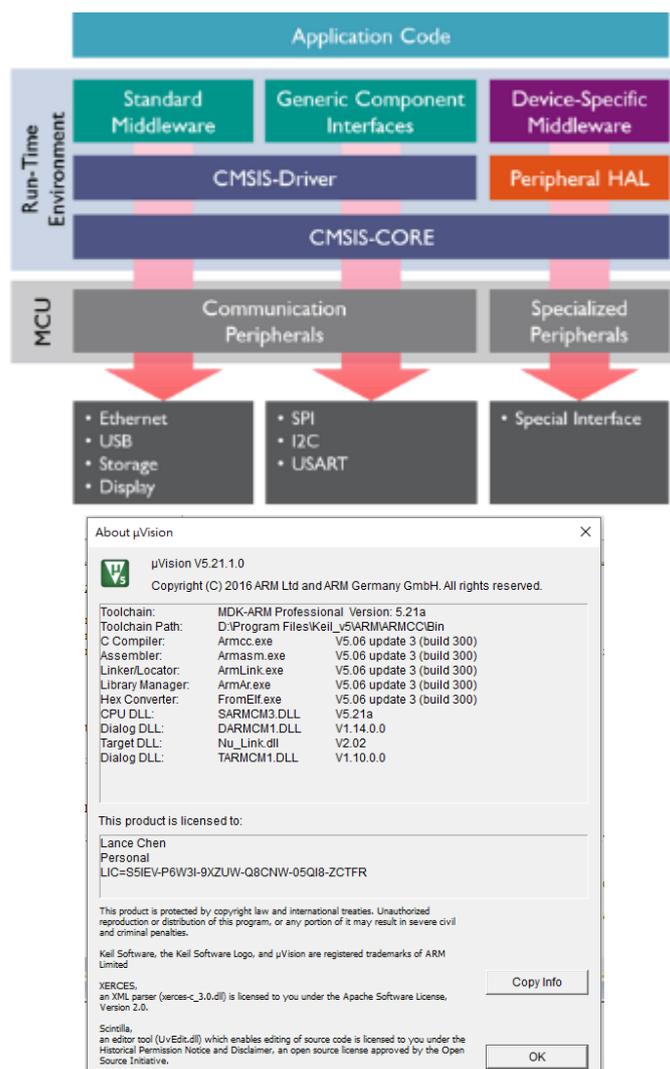


圖 27 與 MDK-ARM 應用層(左)與工作本研究使用之開發軟體版本(右)

### (五) 整合式 PCB 板開發環境

本工作本研究使用整合式 PCB 版開發環境如下，將於期末報告附錄詳細之整合式 PCB 板開發設計圖。

1. OrCAD Capture：做為感測器系統 PCB 電路板之開發程式，用以繪製電路。
2. PSpice(Personal Simulation Program with Intergrated Circuit Emphasis, PSpice)：為輸入電路圖檔後，定義(1)元件名稱、連結參數 \*.net；(2)元件端點連線別名 \*.als；(3)元件符號定義 \*.olb；(4)元件參數定義 \*.lib 後，搭配模擬元件資料庫(延伸類比行為模型元件、被動式元件、

基本類比行為模型元件、信號源元件...等)後，用以進行電路模擬。

3. Layout Plus，印刷電路板程式；Express，可程式邏輯元件程式。

#### 四、建立細懸浮微粒(PM10、PM4、PM2.5等)之感測裝置

##### (一)前人文獻比對方法回顧

利用暴露艙進行感測器與直讀儀器之比對，Chowdhury 等人於 2007 年研究中為在一密封暴露艙進行實驗，污染來源為木材燃燒之懸浮微粒，屬於生物質氣膠(Biomass)，將燃燒木材所產生之煙霧導入暴露艙，並使用風扇減低空間中濃度之差異，將感測器安裝於暴露艙內圍牆面上，一組比對測試其維持時間為 30 分鐘，每一組實驗後會進行換氣之步驟使暴露艙濃度達到背景值濃度後再進行下一輪比對實驗，此部分重複五次來探討感測器與直讀儀器濃度反應一致性之關係，實驗濃度範圍為 0-1800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  分成六組 PM<sub>2.5</sub> 濃度區間，指出感測器在低濃度 30-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  與直讀儀器其一致性較差；Wang 等人在 2015 年研究中，使用不同污染源(香燃燒、鹽類溶液、聚苯乙烯小球)來比對感測器與直讀儀器其線性關係、偵測極限值、粒徑解析度、污染源成分等進行一系列詳細之實驗，將污染源通入一暴露艙，並將感測器放於暴露艙內，且暴露艙其兩側牆面穿入採樣管與直讀儀器連接，採樣管與感測器需放於同一處來減少空間濃度差異，實驗針對三種不同規格之感測器在 0-1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其相關性最高之感測器其  $R^2$  為 0.98，相關性最差之感測器其  $R^2$  為 0.78，指出感測元件內部裝置可能會影響量測結果；Austin 等人於 2015 年研究中使用特定粒徑之聚苯乙烯小球(0.75、1、2、3、6  $\mu\text{m}$ )，配置成水溶液於噴霧器中，將污染源通入混合倉後，再經過感測器後並進入直讀儀器，結果指出在 0-50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1  $\mu\text{m}$ -3 $\mu\text{m}$  其線性相關性最高之  $R^2=0.99$ ，0.75 $\mu\text{m}$  及 6  $\mu\text{m}$  其相關性  $R^2<0.9$ ，說明感測器可能有最佳量測粒徑範圍。而本研究為使用三種不同成分之污染源，以及針對污染源所產生之主要

粒徑範圍，分別為 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$  其線性相關性進行比對與探討，實驗方法於此節第三部分詳細描述。

表 14 前人文獻整理列表

汙染源	比對項目	比對儀器	結果	參考文獻
(1)Atomized $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (2)粉砂岩 (3)線香燃燒	$\text{PM}_{0.5}$ - $\text{PM}_{10}$ 質量&數目 濃度	Dusttrak APS SMPS	$\text{PM}_{0.5}$ - $\text{PM}_4$ $R^2 > 0.8$	本研究
木材燃燒	$\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度	Dusttrak	$R^2 = 0.88$	Chowdhury et al., 2007
(1) Atomized NaCl (2) Atomized PSL (0.3/0.6/0.9 $\mu\text{m}$ ) (3) Atomized $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (4) 線香燃燒	$\text{PM}_{2.5}$ 質量濃度	SidePak SMPS	$R^2 = 0.78-0.98$	Wang et al., 2015
Polystyrene microspheres	0.75-6 $\mu\text{m}$ 質量濃度	APS	$\text{PM}_1$ - $\text{PM}_3$ $R^2 = 0.99$ ; $\text{PM}_{0.78}$ & $\text{PM}_6$ $R^2 < 0.9$	Austin et al., 2015

## (二)儀器原理

本研究所使用之直讀儀器包括量測質量濃度之氣膠監視量測儀與空氣粒子計數器，以及量測數目濃度之氣動微粒分徑儀與掃描式移動度分析儀，感測器則可同時量測質量濃度與數目濃度，儀器詳細原理說明如下：

### (1) 氣膠監視量測儀

氣膠監視量測儀(DustTrak, Model DustTrak 8533; TSI Inc., USA)可量測粒徑範 0.1-10  $\mu\text{m}$  微粒之重量濃度，濃度偵測極限為 0.001 至 150  $\text{mg}/\text{m}^3$ ，採樣流量為 3 L/min，攜帶氣流流量(Sheath air)為 4 L/min，採樣時間最短能每秒量測一讀值，本研究以 1 分鐘為採樣間隔。

氣膠監視量測儀外觀及內部構造如圖 28 所示，該儀器根據 90° 雷

射光散射原理來即時量測微粒之濃度，利用內置氣泵將氣溶膠微粒吸入光學室中，藉由雷射二極體(Laser diode)發出雷射光穿過準直鏡(Collimating lens)及柱狀透鏡(Cylindrical lens)形成光束，再透過表面含金塗層球面鏡(Spherical mirror)散射至光檢測器中計算微粒之重量濃度。

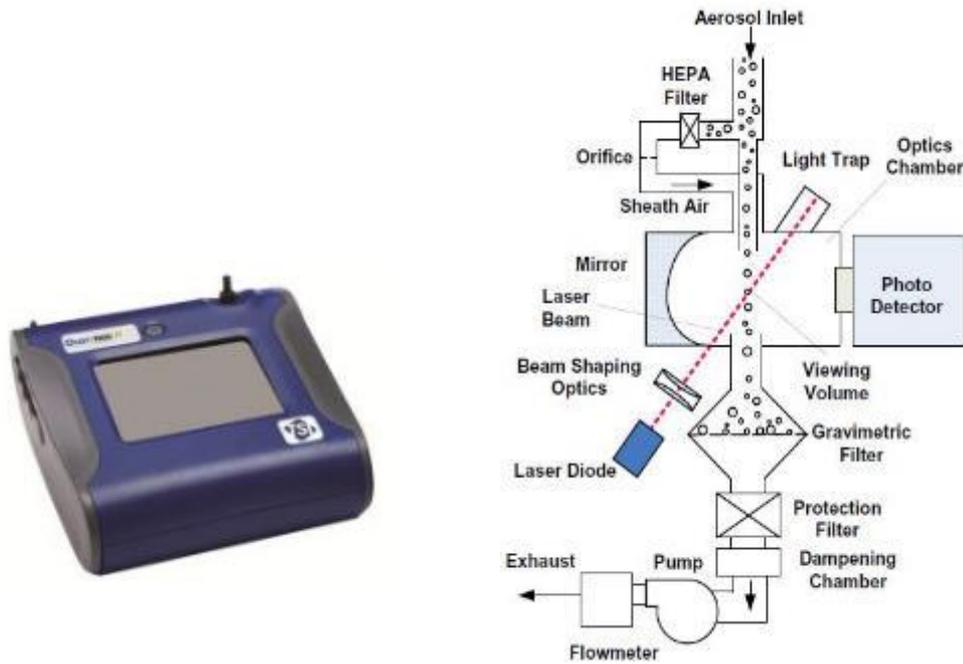


圖 28 氣膠監視量測儀外觀及內部構造(Dustrak 操作手冊)

## (2) 個人式懸浮微粒暴露偵測儀

個人式懸浮微粒暴露偵測儀 (SIDEPAK Personal Aerosol Monitor Am520; TSI Inc., USA) 量測粒徑範 1-10  $\mu\text{m}$  微粒之重量濃度，其外觀與內部構造如圖 29 所示，為利用雷射 90o 光散射原理量測微粒質量濃度，利用內置氣泵將氣溶膠微粒吸入光學室中，藉由雷射二極體(Laser diode)發出雷射光穿過準直鏡(Collimating lens)及柱狀透鏡(Cylindrical lens)形成光束形成光束，再透過表面含金塗層球面鏡(Spherical mirror)散射至光檢測器中計算微粒之重量濃度，在固定採樣流量之前提，質量濃度經由氣膠通過光散射強度並運用經驗式進行換算。根據不同粒徑之採樣頭( Cyclone)不同，可量測不同粒徑之懸浮微粒，採樣流量範圍為 0.7 至 1.8 L/min，採樣時間最短能每秒量測一讀值，本研究以 1 分鐘為採樣間隔。

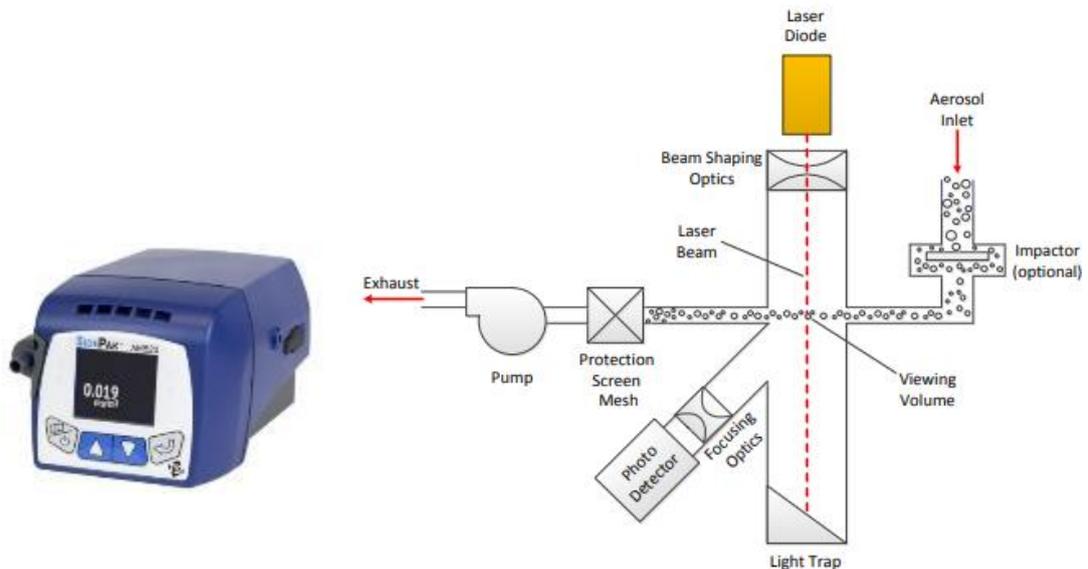
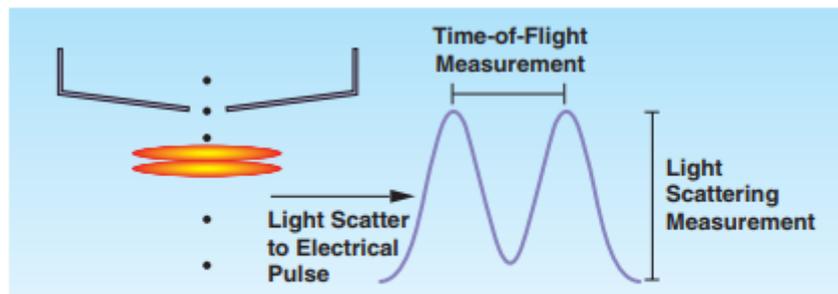


圖 29 空氣粒子計數器外觀與內部構造(SIDEPAK 操作手冊)

## (3) 氣動微粒分徑儀

氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS 3321; TSI Inc., USA)可量測粒徑範 0.5-20  $\mu\text{m}$  微粒之數目濃度粒徑分布，其原理為係

利用微粒被加速之難易程度來區分不同，經由攜帶氣流將微粒限制在一中心線，並使微粒通過兩道聚焦之平行雷射光束，並偵測微粒通過兩道雷射光束之通過時間量計算各粒徑之數目濃度，採樣流量為 1L/min，攜帶氣流流量為 4L/min，其時間解析最短能每秒量測一粒徑分布，本研究以 1 分鐘為採樣間隔，儀器外觀及內部構造如圖 30 所示。



*The Model 3321 uses a patented optical system to produce one double-crested signal for each particle, resulting in highly accurate measurements.*

圖 30 氣動微粒分徑儀外觀及內部構造(APS 操作手冊)

#### (4) 掃描式移動度分析儀

掃描式移動度分析儀(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS 3080)包含電移動度分析儀、長型差移動式粒徑分析器(Long Differential Mobility Analyzer, Long DMA 3081A)與凝結微粒計數器(Condense

Particle Counter, CPC 3787 )，微粒通過長型差移動式粒徑分析器之前，會先通過一慣性衝擊器去除 500 nm 以上的微粒，和一個雙極充電器使微粒帶電情形成波茲曼分佈，使用電移動度分析儀來設定所需電壓電流與攜帶氣流等參數來調整不同粒徑範圍與解析度，而帶有電壓的長型差移動式粒徑分析器(long DMA)中心柱和不帶電的圓筒內壁形成一電場，此時帶有和中心柱相反電性、且電移動度剛好的微粒，就會從中心柱下方一小缺口被分離出來，分離出的微粒就成單徑微粒，接著單徑微粒被導入凝結微粒計數器(CPC)來計算微粒的數目，本研究使用最短之時間解析，為每分鐘量測一粒徑分布，其量測粒徑範圍為 10 nm-1000 nm，採樣流量為 0.6 L/min，攜帶氣流流量為 6 L/min，儀器外觀及內部構造如圖 31 所示。

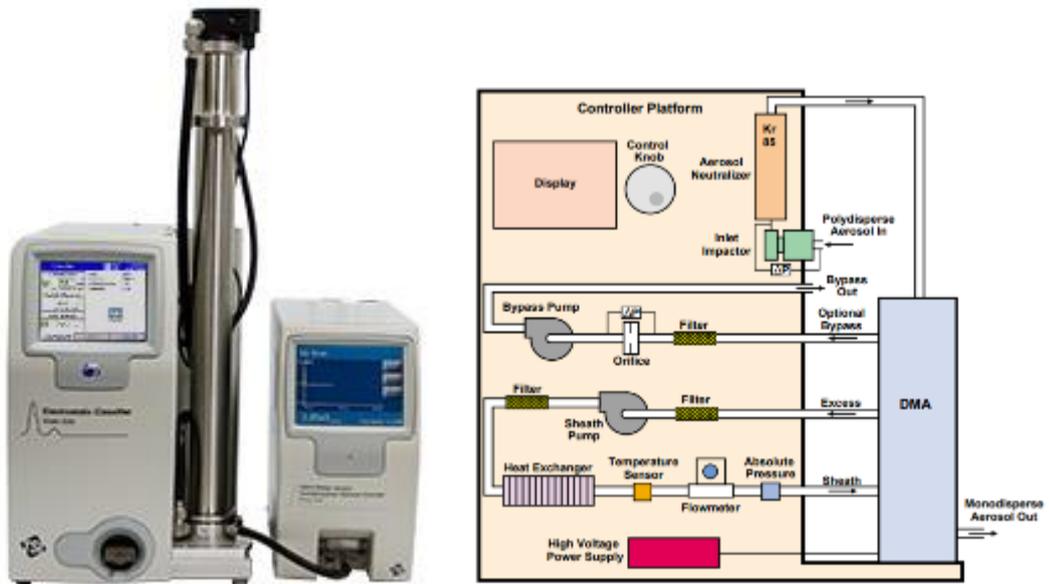
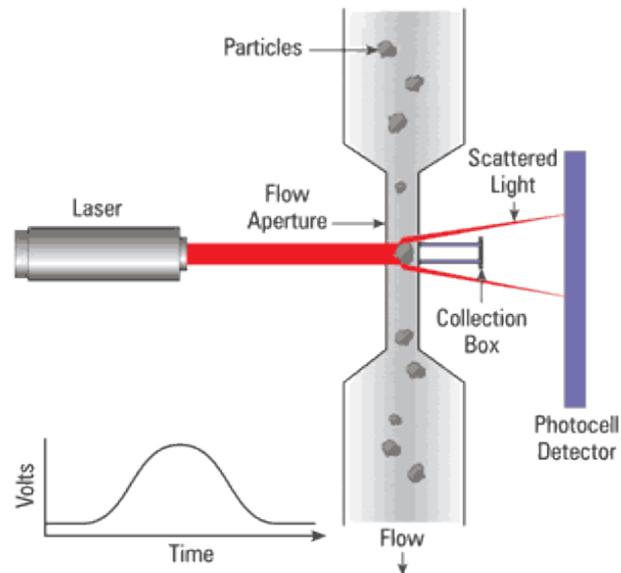


圖 31 掃描式移動度分析儀外觀與內部構造(SMPS 操作手冊)

##### (5) 本研究感測器

本研究採用體積更小之 A5 型號元件。A5 為鐳射數位式通用微細顆粒物濃度感測器。內含雷射器和光電接收管元件，內部構造如圖 32 所示為採用光散射原理，通過鐳射在灰塵顆粒物上發生散射並由光電變

換器變為電信號，由量測到空氣中不同粒徑的顆粒物數量，進行複雜的演算法(TSI 運算法)進而得到顆粒物濃度，為精良的電路設計，以及穩定可靠的鐳射量測之感測元件。



資料來源：machinery lubrication

圖 32 鐳射數位式通用微細顆粒物濃度感測器原理

該懸浮微粒感測元件亦可「同時」輸出包括 0.1 公升之空氣中粒徑為 0.3  $\mu\text{m}$  至 10  $\mu\text{m}$  之顆粒數，且運用經驗式換算提供  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  與  $\text{PM}_{10}$  之質量濃度，可同時提供 13 個 Channels 的懸浮微粒之顆粒數或質量濃度。本研究所使用各直讀儀器與感測器其所量測粒徑範圍整理於表 15 所示。

表 15 ONEAIR A5 感測器特性及規格表

正面	特性
	外觀尺寸：35x34x11(mm)； 重量：18g； PM <sub>10</sub> /PM <sub>2.5</sub> 2-Channels 及「顆粒數」6-Channels 同時量測，風扇空氣恆定減少氣流不穩定因素符合 ROHS(2011/65/EU)規定。
背面	量測
	感測範圍：0.3~10 μm； 感測範圍(濃度)：0~1,000 μg/m <sup>3</sup> ； 分辨率：1 μg/m <sup>3</sup> ； 精度(準確率)：98%； 數據反應：<10 Sec.
側面	規格
	工作電壓：5.0V； 工作電流：90mA； 工作溫度：-10~50℃； 工作濕度：80% RH； 平均使用年限：>5 年；

資料來源：本研究彙整各感測元件型錄

表 16 直讀儀器與感測器量測粒徑範圍列表 價錢

儀器	價錢 (新台幣)	單位	量測粒徑範圍
DustTrak	40 萬	μg/m <sup>3</sup>	<10 μm (1μm、2.5 μm、4 μm、10 μm)
SIDEPAK	12 萬	μg/m <sup>3</sup>	<10 μm (1μm、2.5 μm、4 μm、10 μm)
APS	120 萬	#/cm <sup>3</sup>	0.5-20 μm
SMPS	110 萬	#/cm <sup>3</sup>	<1 μm
本研究感測器	2.5 萬	μg/m <sup>3</sup>	1 μm、2.5 μm、10 μm
	(韓	#/ cm <sup>3</sup>	0.3 μm、1 μm、2.5 μm、5 μm、10 μm

## 五、實驗方法

本研究為使用一暴露艙進行直讀儀器與感測器比對，且設計三種能產生不同之粒徑範圍其污染源方法，其三種方法其產生污染源種類、產生方式等說明描述如下。

### (一) 方法一：硫酸銨溶液作為污染源

利用硫酸銨溶液產生污染源其實驗示意圖如圖 33 所示，包含(1)產生污染源配置、(2)稀釋污染源濃度、(3)平衡暴露艙壓力以及(4)直讀儀器分析。產生污染源配置為使用噴霧器(Atomizer)將含微粒溶液經過乾燥劑(Dryer)後通入暴露艙，而暴露艙內之對角線角落各安裝一風扇使濃度能均勻分布，待暴露艙內濃度穩度後將感測器開啟，並進行與氣膠監測測量測儀(TSI DustTrak 8533)比較一小時內其質量濃度變化趨勢，以及與氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS 3321)比較粒徑分布圖，稀釋配置為通入乾淨空氣來稀釋暴露艙內污染源濃度，來達到實驗所需設計之濃度值；平衡壓力配置為另外通入氣體暴露艙來平衡避免暴露艙處在負壓環境所設計，通入氣體皆經過高效能濾網去除背景之懸浮微粒來避免干擾暴露艙內濃度。

本研究使用三種不同濃度分別為 0.01%、0.05%以及 0.25%之硫酸銨溶液，硫酸銨其密度為  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ，並利用稀釋配置設計不同三種  $\text{PM}_{10}$  質量濃度環境，分別為一般室內環境濃度： $20 \mu\text{g/m}^3$ ，以及大於  $100 \mu\text{g/m}^3$  之高污染作業環境。

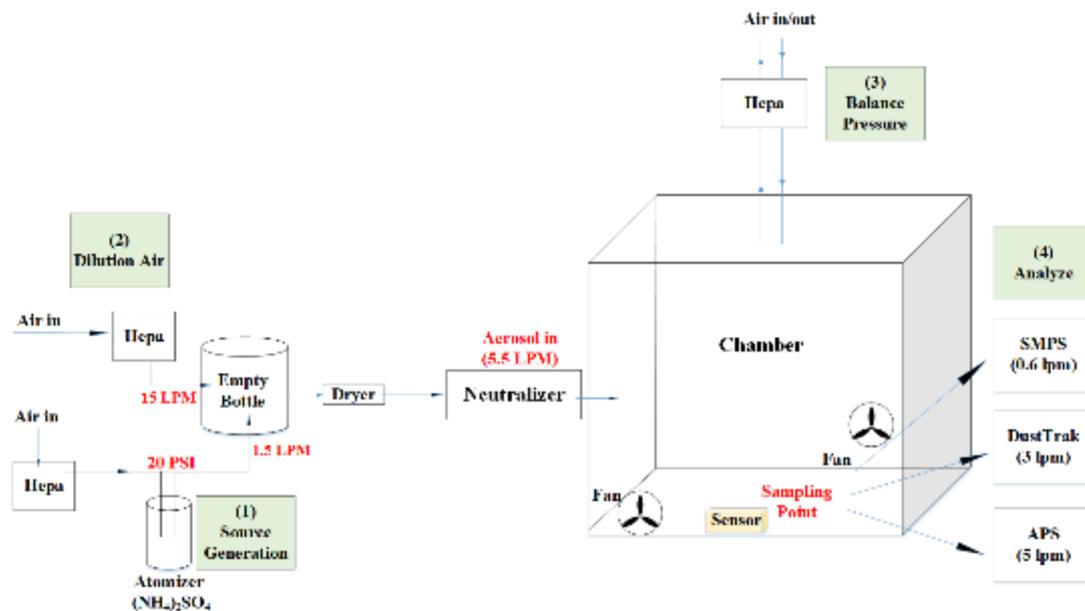


圖 33 實驗設計圖(利用硫酸銨溶液產生汙染源)

(二) 方法二: 細粉砂岩樣本作為汙染源

利用方法一：噴霧器(Atomizer)噴出硫酸銨溶液作為汙染源主要為產生小於約  $1\ \mu\text{m}$  之微粒，因此另外利用岩石粉末標本來產生大於  $1\ \mu\text{m}$  之汙染源，所使用之汙染源為經篩網塞選出細粉砂岩樣本(圖 34)，其粒徑範圍為  $4\ \mu\text{m}$ - $15\ \mu\text{m}$  較符合感測器與直讀儀器之粒徑範圍，細粉砂其平均密度為  $2.3\ \text{g}/\text{cm}^3$ ，利用塞選出細粉砂岩樣本進行質量濃度比對其實驗示意圖(圖 35)，包含平衡壓力配置與直讀儀器分析，在暴露艙內將 1 克此汙染源分別放於暴露艙內之風扇附近，由氣膠監測量測儀(TSI DustTrak 8533)與感測器比對量測  $1\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$  質量濃度，以及使用氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS 3321)比較粒徑分布圖，因此產生汙染源之方法無法持續穩定產生固定濃度之汙染源，因此質量濃度與數目濃度將會是一下降曲線。



圖 34 本研究所使用之細粉砂岩樣本

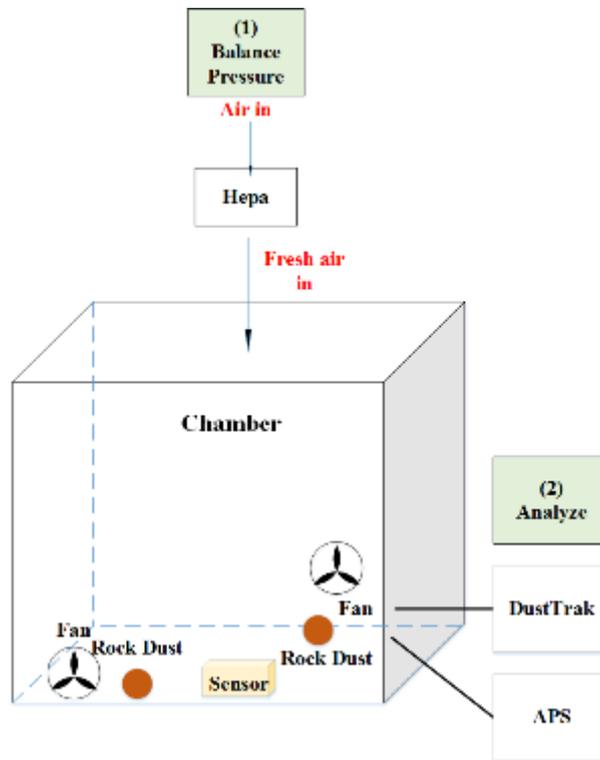


圖 35 實驗設計圖(利用細粉砂岩粉末產生污染源)

### (三) 方法三: 燃燒線香作為污染源

本研究透過自行設計開發之懸浮微粒暴露艙進行高濃度懸浮微粒濃度之比對，暴露艙詳細規格如圖 36 所示，高約 200 公分、直徑 40 公分之圓柱體，暴露艙實驗流程圖與列表如表 17 所示，當懸浮微粒進入暴露艙時具有

足夠空間始之充分均勻的分佈在艙體中，暴露艙兩側設有圓孔使空氣進氣，促使懸浮微粒進入艙體後妥善分佈，並於艙底高約 20 公分處設有專屬感測器置放平台，避免感測器置放不同位置或置放於艙底造成感測濃度之偏差。整體實驗設計透過點燃線香作為懸浮微粒之生成來源，搭配抽氣幫浦(Pump)於暴露艙底之開口進行抽氣，使因燃燒線香所產生之懸浮微粒經擴散由高濃度的線香燃燒艙進入懸浮微粒暴露艙。為使懸浮微粒均勻分布於艙內，經由計算管內雷諾數(Reynolds number, Re)，當雷諾數大於 4000 時，代表暴露艙內為一擾流之不穩定狀態，因此假設此一狀態時懸浮微粒均勻分布於倉體內。對於管內的流動狀態，雷諾數定義為：

為使懸浮微粒均勻分布於暴露艙內，須使倉體內部雷諾數大於 4000。

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$\rho$ =流體密度；

25°C，1 atm，空氣密度為 1.186 kg/m<sup>3</sup>；

V=平均流速

D=管直徑 (0.4 m)；

$\mu$ =流體動力黏度；

常溫 (25°C) 及常壓下，空氣的黏度為 1.78 Pa·s(10<sup>-5</sup>)=0.0000178 Pa·s

$$\frac{1.186 * V * 0.4}{0.0000178} > 4000$$

因此管內流速需大於 16 M/S。當暴露艙內達此一狀態即可透過本研究所 開發之懸浮微粒感測器與 SIDEPAK(TSI SIDEPAK AM520)個別監測之濃度進行比對。

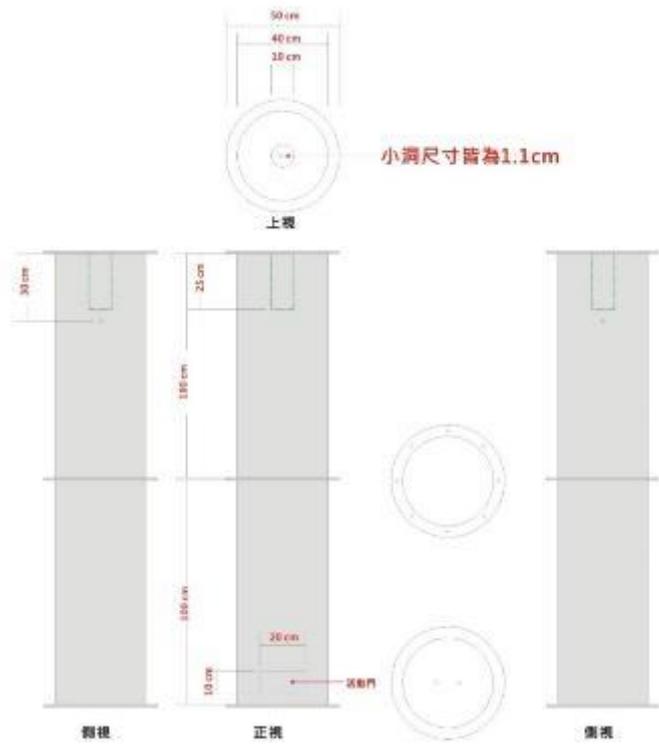


圖 36 懸浮微粒暴露艙示意圖

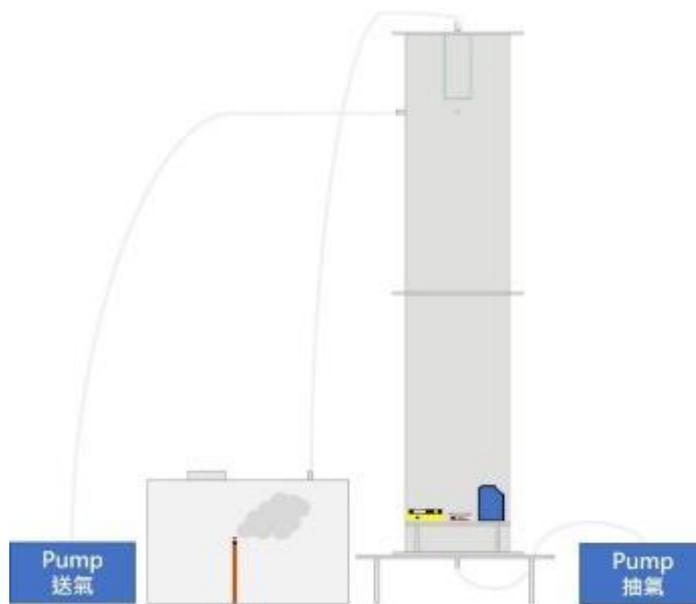


圖 37 懸浮微粒暴露艙實驗設計示意圖

表 17 使用燃燒線香為汙染源其比對流程

流程	時間 (分鐘)
待機量測暴露艙內部背景濃度	10
燒香製造汙染源	5
Pump 送氣(汙染源)至暴露艙內	5
待暴露艙內濃度達 550 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 停止 pump 送氣	-
暴露艙內濃度降至 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第一點 500 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 475-525 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
Pump 送氣(air)至暴露艙	-
暴露艙內濃度降至 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第二點 400 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 380-420 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
Pump 送氣(air)至暴露艙	-
暴露艙內濃度降至 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第三點 300 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 285-315 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
pump 送氣(air)至暴露艙	-
暴露艙內濃度降至 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第四點 200 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 190-210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
pump 送氣(air)至暴露艙	-
暴露艙內濃度降至 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第五點 100 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 095-105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
pump 送氣(air)至暴露艙	-
暴露艙內濃度降至 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 開始比對第六點 50 $\pm$ 5% $\rightarrow$ 47.5-52.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10
Pump 持續送氣(air)至暴露艙內部濃度降至背景濃度	-

本研究所設計其三種產生汙染源方法之除了比較不同成分對於感測器反應之影響差別，其比對目的如表 18 所示，依產生粒徑範圍、以及產生方式來比較不同粒徑範圍之穩定性、濃度趨勢以及線性關係等，因方法一能穩定產生與控制汙染源濃度，因此能比對不同溶液濃度下之直讀儀器與感測器在同一時間內其數目濃度和質量濃度穩定趨勢與其線性關係；而方法二因無法持續穩定產生汙染源，因此汙染源濃度會隨時間逐漸下降，但相較方法一能產生較大之粒徑範圍分布；方法三則選定  $\text{PM}_{2.5}(2.5\mu\text{m})$  進行高濃度作業環

境至低濃度作業環境中感測器與直讀儀器之線性比對。

表 18 三種產生不同汙染源之實驗方法比較列表

	方法一	方法二	方法三
汙染源	硫酸銨溶液	細粉砂岩	線香
目標粒徑	1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$ -10 $\mu\text{m}$	2.5 $\mu\text{m}$
產生方式	噴霧器 (Atomizer) 0.01%、0.05%、0.25% 溶液，通入固定流量於 暴露艙	放置 1 克於 暴露艙內	燃燒線香
目的	(1) 濃度穩定性趨勢 (2) 質量、數目濃度分 布趨勢 (3) 不同質量濃度間 線性關係	(1) 粗粒徑之數目濃度 (2) 粗粒徑之質量濃度	(1) 高濃度 PM <sub>2.5</sub> 至 低濃度 PM <sub>2.5</sub> 其線性 關係

## 六、數量濃度與質量濃度比對之結果

### (一) 硫酸銨溶液汙染源(0.3 $\mu\text{m}$ -2.5 $\mu\text{m}$ )

#### 1. 數目濃度趨勢比對

利用噴霧器(Atomizer)噴出硫酸銨溶液產生汙染源，通入暴露艙一小時內其 0.3  $\mu\text{m}$  之數目濃度由掃描式移動度分析儀(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS)所量測，而大於等於 0.5  $\mu\text{m}$  之數目濃度由氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS)所量測。並根據感測器的粒徑區間(0.3 $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  及 2.5  $\mu\text{m}$ )，比較氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS)與感測器於 0.3  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  及 2.5  $\mu\text{m}$  其平均數目濃度如表 19 所示，由表結果指出 0.3  $\mu\text{m}$  與 0.5  $\mu\text{m}$  之數目濃度量測絕對值，氣動微粒分徑儀較感測器高，而 1  $\mu\text{m}$  與 2.5  $\mu\text{m}$  感測器與氣動微粒分徑儀其量測讀值相似。另將一小時內所量測到濃度趨勢繪製成曲線圖，如圖 38 所示，觀察出 0.3  $\mu\text{m}$  與 2.5 $\mu\text{m}$  在同一濃度中其濃度變化結果，氣動微粒分徑儀

(Aerodynamic Particle Sizer, APS)與感測器之趨勢不相同，感測器皆為一上升趨勢，然而氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS)之濃度變化在過程中則呈現高低起伏情況，而在 0.5  $\mu\text{m}$  和 1  $\mu\text{m}$ ，感測器與氣動微粒分徑儀其濃度趨勢相似；四種粒徑其濃度線性關係如圖 39 所示，在 0.3  $\mu\text{m}$ -2.5 $\mu\text{m}$  粒徑範圍之數目濃度中，以 0.5  $\mu\text{m}$  和 1  $\mu\text{m}$  較有相關性，濃度成一上升趨勢， $R^2$  分別為 0.97 與 0.88，而，因此由結果指出即使 0.5  $\mu\text{m}$  其數目濃度差異值大但具有高之線性關係，且和在量測 1  $\mu\text{m}$  之數目濃度時可用公式校正直讀儀器與感測器間之濃度值。

表 19 0.3  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$  及 2.5  $\mu\text{m}$  數目濃度絕對值比較列表

粒徑	SMPS ( $\#/cm^3$ )	Sensor ( $\#/cm^3$ )
0.3 $\mu\text{m}$	$1.7 \times 10^4$	200
粒徑	APS ( $\#/cm^3$ )	Sensor ( $\#/cm^3$ )
0.5 $\mu\text{m}$	2450	150
1 $\mu\text{m}$	112	120
2.5 $\mu\text{m}$	3	10

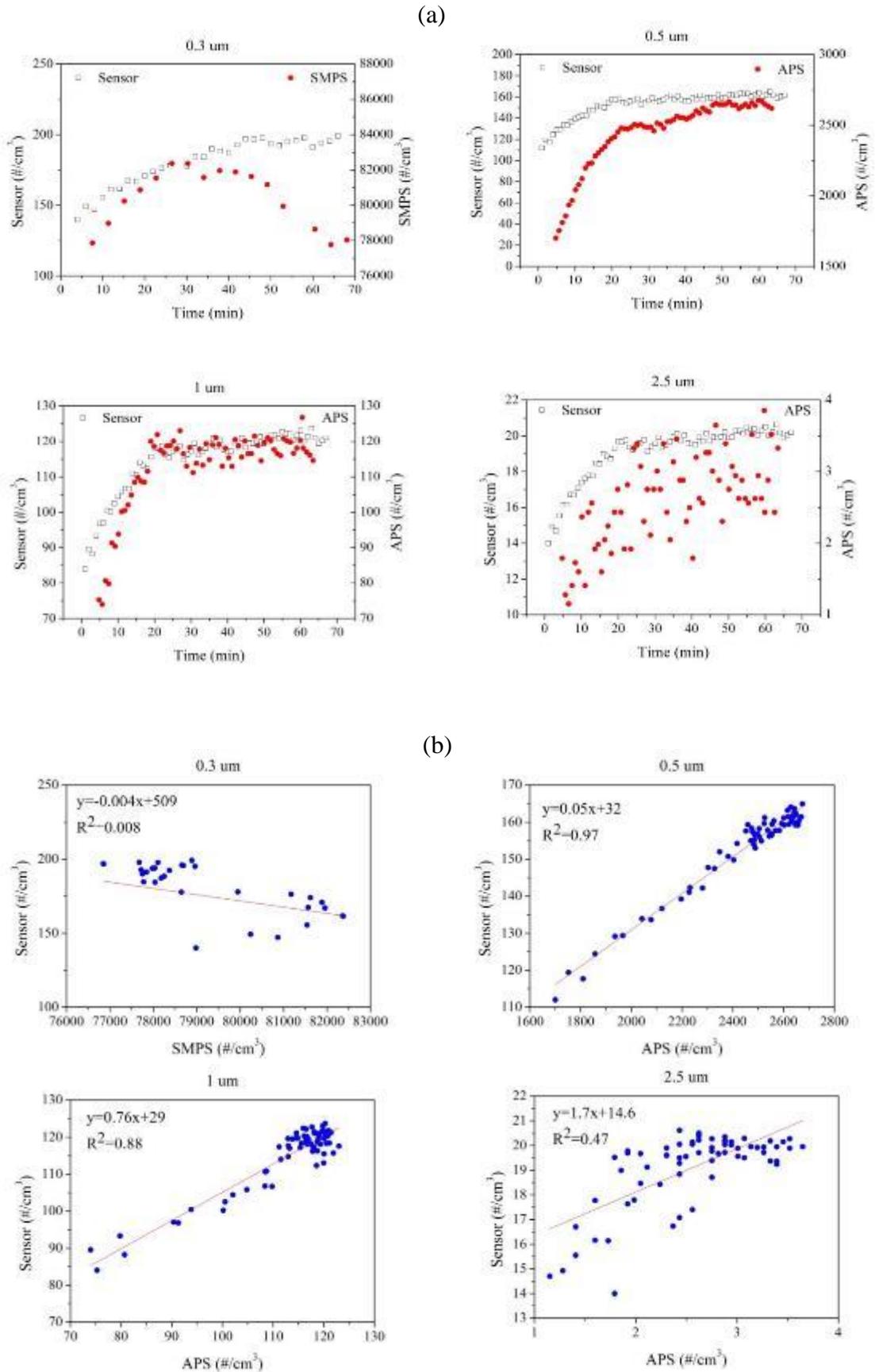


圖 38 利用硫酸銨溶液為汙染源，0.3 $\mu\text{m}$ 、0.5 $\mu\text{m}$ 、1 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$  其數目濃度趨勢與線性關係圖 (a): 濃度趨勢; (b): 濃度線性

另外將數目濃度繪製成一粒徑分布圖，結果如圖 所示，然而由上述結果指出  $0.3 \mu\text{m}$  其數目濃度絕對值差異極大，因此粒徑分布圖中只呈現  $0.5 \mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$  之粒徑範圍，圖 結果中其粒徑分布圖為呈現一下降曲線，且多數粒徑集中於  $0.5 \mu\text{m}$  以下，感測器其數目濃度之下降曲線較氣動微粒分徑儀 (Aerodynamic Particle Sizer, APS) 緩。

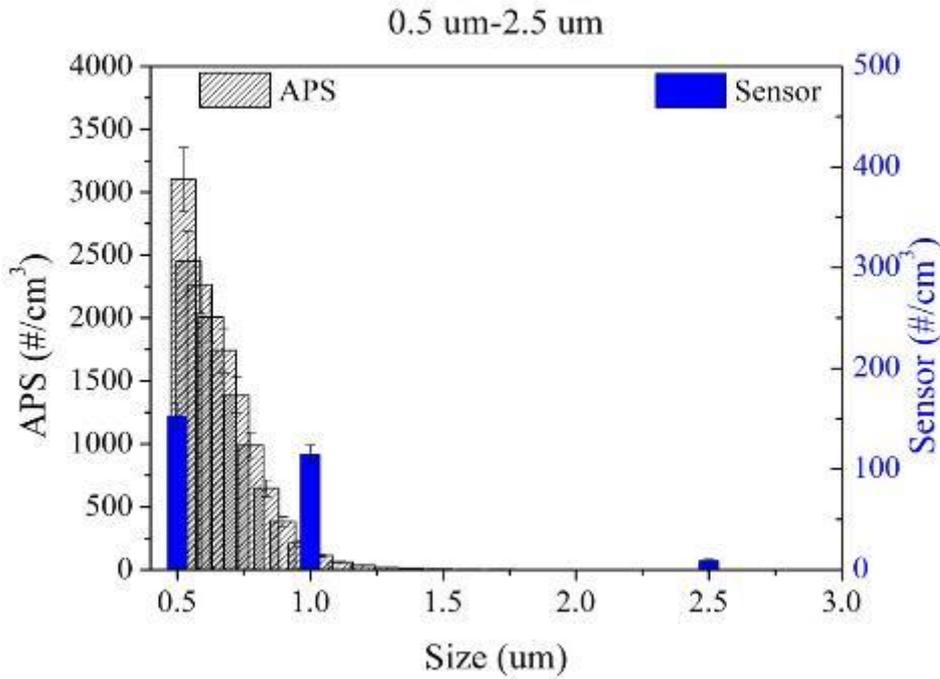


圖 39 利用硫酸銨溶液為污染源， $0.3\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$  數目粒徑分布圖

## 2. 質量濃度趨勢比對

利用噴霧器(Atomizer)噴出硫酸銨溶液產生汙染源，配置三種溶液重量濃度，分別為 0.01%、0.05%與 0.25 %之硫酸銨溶液微粒，並通入暴露艙一小時，比較氣膠監測量測儀(DustTrak)與感測器兩者在一小時內所測量其質量濃度趨勢結果以及線性關係。

而其方法所產生之粒徑範圍集中小於 1  $\mu\text{m}$ ，感測器所能量測質量濃度之最小粒徑為 1  $\mu\text{m}$ ，因此選擇 1  $\mu\text{m}$  之三種質量濃度範圍進行比對，濃度趨勢結果如圖 40 所示，當溶液為 0.01%時，氣膠監測量測儀(DustTrak)顯示其質量濃度為 20-25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，除了兩者間濃度趨勢不相同外，也無線性關係，可能原因為感測器質量濃度為個位數時(0-5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )其穩定性不佳，誤差值增大之故所導致，然而當硫酸銨溶液為 0.05%與 0.25%，氣膠監測量測儀(DustTrak)顯示其質量濃度為大於 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，分別為 120-180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、400-600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此時感測器其讀值與氣膠監測量測儀(DustTrak)濃度讀值趨勢相似，且具有相當高之相關性， $R^2$  皆約為 0.97，因此能用公式係數校正讀值。

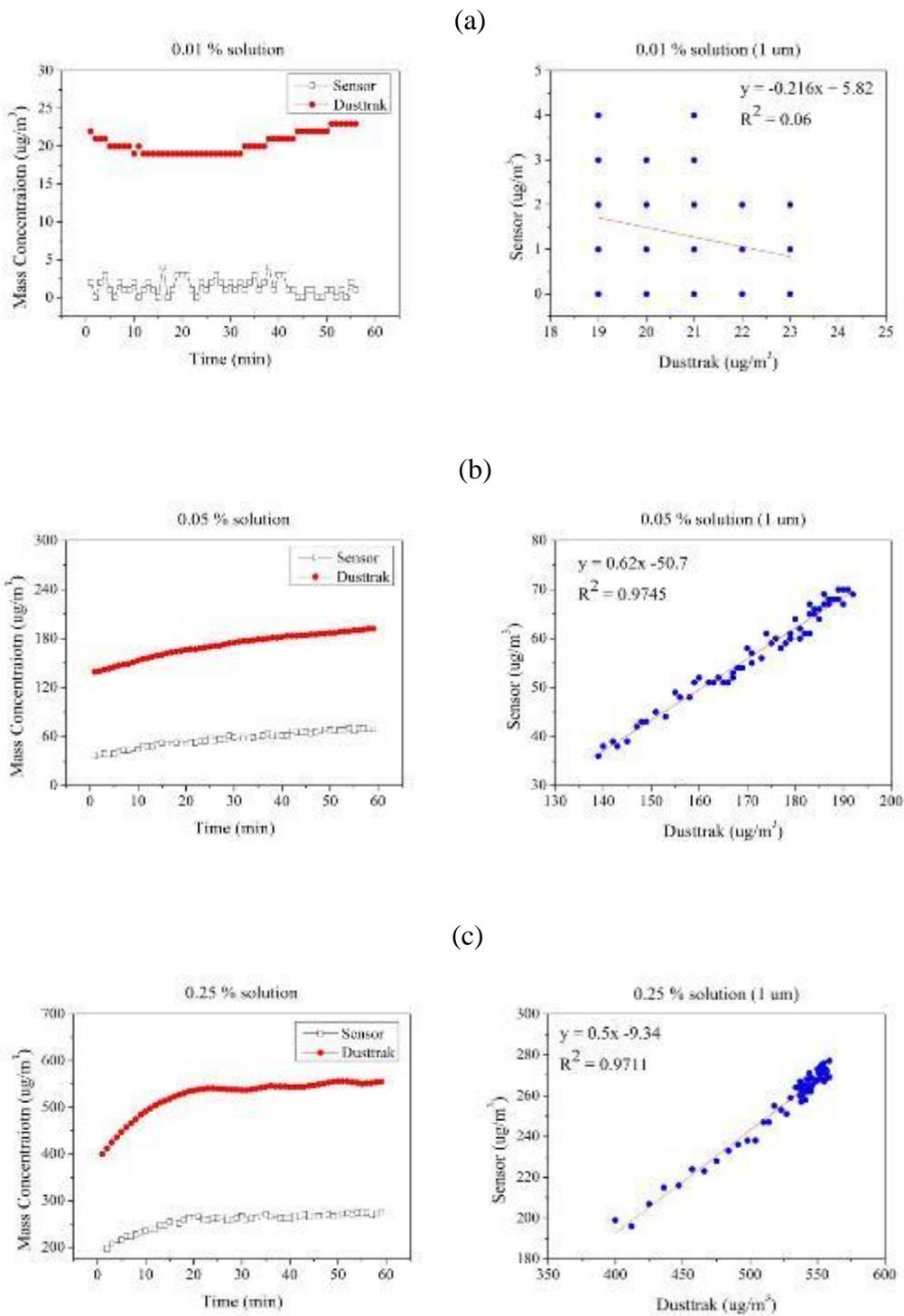


圖 40 利用硫酸銨溶液為汙染源，質量濃度濃度趨勢與線性關係圖  
(a)0.01%; (b)0.05 %; (c) 0.25%

上述三種濃度其一小時之量測結果圖 40 中指出感測器其濃度絕對值相較直讀儀器低，由氣膠監測量測儀(DustTrak)分別量測到 20-25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、120-180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、400-600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  與感測器分別量測到質量濃度為 0-5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、30-60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、200-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，將三種不同質量範圍其兩者於一小時內之質量濃度平均並取標準差繪製成線性圖比較其線性關係，結果如圖 41 所示，結果指出氣膠監測量測儀(DustTrak)與感測器在三種低、中、高質量濃度具有高線性相關性， $R^2=0.96$ ，因此感測器在分別量測相對不同低中高之質量濃度範圍時具有高正確性。

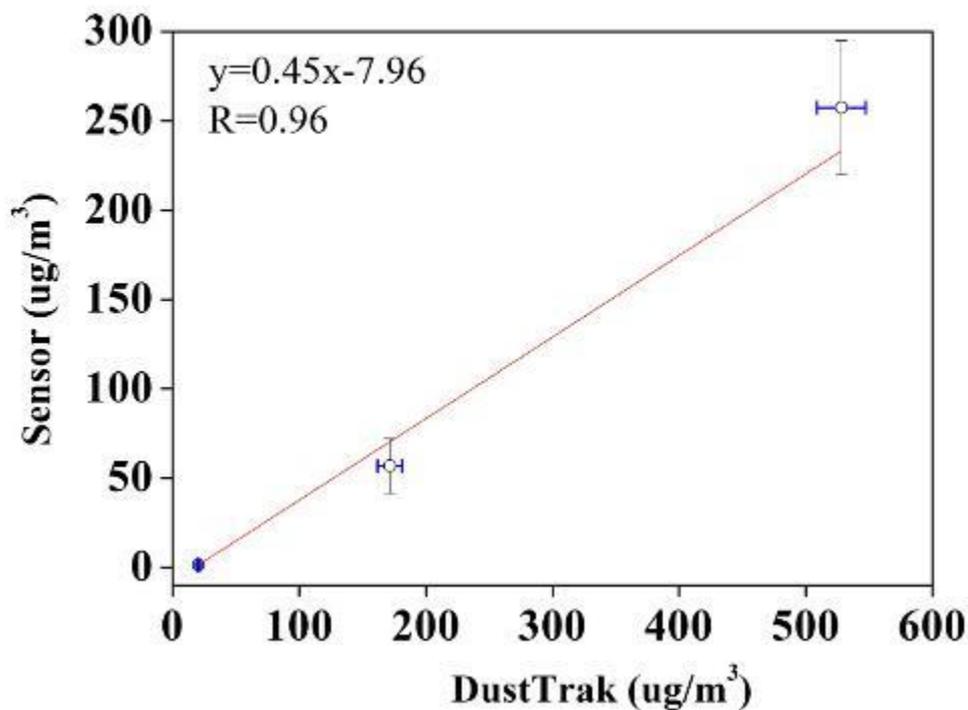


圖 41 不同質量濃度(DustTrak Reading：20、120-180、400-600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，與感測器線性關係圖

## (二) 細粉砂岩污染源(1 $\mu$ m-10 $\mu$ m)

### 1. 數目濃度下降趨勢比對

利用方法二，將細粉砂岩樣本放置暴露艙風扇旁來產生污染源，比對氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS)與感測器其數目濃度絕對值與粒徑分布圖，結果如表 20 及圖 42 所示，因感測器其數目濃度粒徑分布範圍為 1  $\mu$ m、2.5  $\mu$ m、5  $\mu$ m、10  $\mu$ m，因此在討論 4  $\mu$ m 時則使用感測器量測 5  $\mu$ m 之結果進行比對。

由圖 42 (a)指出感測器所量測到其粒徑分布圖隨時間為一下降曲線，在 1 $\mu$ m-10 $\mu$ m 粒徑範圍內，感測器量測到主要分布粒徑為在 1  $\mu$ m，數目濃度隨時間而逐漸下降，而圖 42 (b)指出氣動微粒分徑儀量測到其粒徑分布圖為在粒徑為 2.5  $\mu$ m 為主要粒徑，此外約在 2-4 分鐘時數目濃度突然上升又下降，其原因可能為濃度尚未穩定之故。由表 4 指出，前 20 分鐘內，感測器與氣動微粒分徑儀在 1  $\mu$ m、2.5  $\mu$ m 與 4  $\mu$ m 其濃度絕對值差異較大，隨時間增長後濃度值逐漸接近，其濃度趨勢圖如圖 43(a)所示。

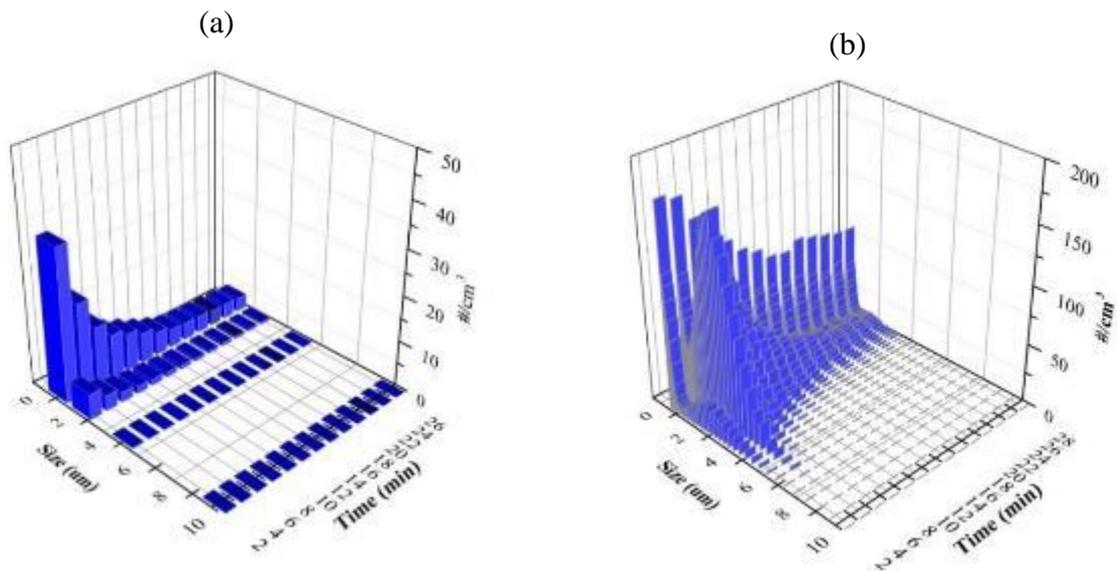


圖 42 利用粉砂岩粉末為污染源其 1-10 $\mu$ m 粒徑分布圖  
(a)感測器; (b) 氣動微粒分徑儀

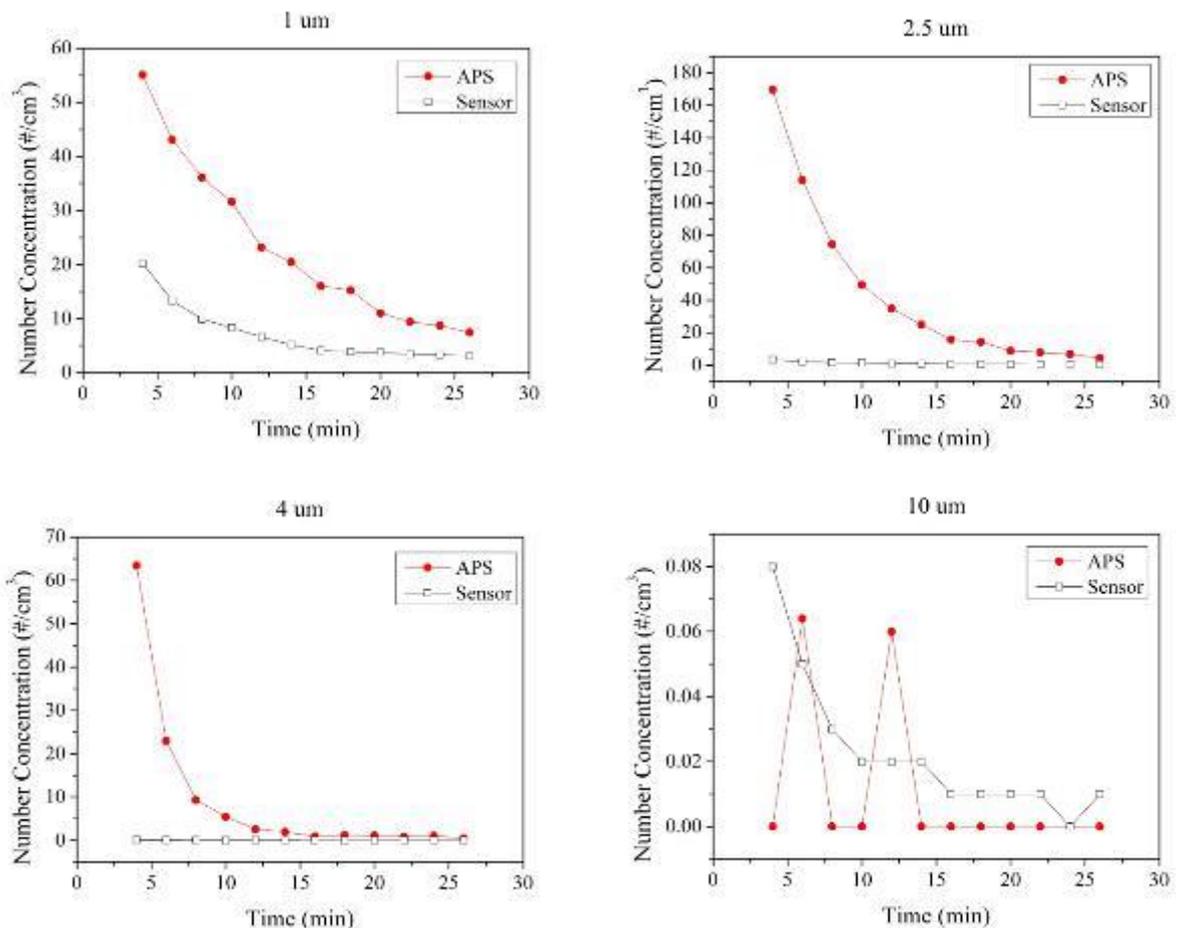
表 20 1 μm、2.5 μm、4 μm、10 μm 數目濃度絕對值比較列表

<b>Sensor (#/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>Time</b>	<b>1 μm</b>	<b>2.5 μm</b>	<b>5 μm</b>	<b>10 μm</b>
<b>2 min</b>	33.78	5.63	0.27	0.13
<b>4 min</b>	20.21	3.36	0.16	0.08
<b>6 min</b>	13.29	2.21	0.1	0.05
<b>8 min</b>	9.88	1.64	0.07	0.03
<b>10 min</b>	8.28	1.38	0.06	0.02
<b>12 min</b>	6.59	1.09	0.05	0.02
<b>14 min</b>	5.16	0.86	0.04	0.02
<b>16 min</b>	4.08	0.68	0.03	0.01
<b>18 min</b>	3.85	0.64	0.02	0.01
<b>20 min</b>	3.73	0.62	0.02	0.01
<b>22 min</b>	3.36	0.56	0.02	0.01
<b>24 min</b>	3.3	0.55	0.02	0
<b>26 min</b>	3.05	0.5	0.02	0.01
<b>APS (#/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>Time</b>	<b>1 μm</b>	<b>2.5 μm</b>	<b>4 μm</b>	<b>10 μm</b>
<b>2 min</b>	9.41	22.59	15.62	0
<b>4 min</b>	55.10	169.53	63.42	0.06
<b>6 min</b>	43.07	113.79	22.98	0.06
<b>8 min</b>	36.10	74.43	9.34	0
<b>10 min</b>	31.62	49.41	5.50	0
<b>12 min</b>	23.17	34.88	2.56	0.06
<b>14 min</b>	20.48	24.96	1.98	0
<b>16 min</b>	16.00	15.68	0.96	0
<b>18 min</b>	15.23	14.27	1.22	0
<b>20 min</b>	11.01	8.90	1.15	0
<b>22 min</b>	9.41	7.81	0.90	0
<b>24 min</b>	8.70	6.72	1.09	0
<b>26 min</b>	7.42	4.48	0.51	0

感測器與氣動微粒分徑儀(Aerodynamic Particle Sizer, APS) 於不同粒徑其濃度趨勢圖圖 43a)指出數目濃度在剛開啟風扇使均勻散佈細粉砂岩樣本於暴露艙時，其數目濃度絕對值差異大，在不同粒徑情況下，感測器與氣動微粒分徑儀在粒徑為  $1\ \mu\text{m}$  其濃度趨勢及下降斜率較相似；在  $2.5\ \mu\text{m}$  與  $4\ \mu\text{m}$  時其氣動微粒分徑儀下降趨勢幅度較感測器大，而約需 20 分鐘後，感測器與氣動微粒分徑儀其濃度值逐漸接近；於  $10\ \mu\text{m}$  其濃度絕對值較相近，但濃度趨勢較不一致，感測器隨時間逐漸下降，而氣動微粒分徑儀濃度趨勢為高低起伏。

將其四種粒徑於同一時間所量測之數目濃度繪製成線性比較圖，結果如圖 43b 所示，感測器與氣動微粒分徑儀在  $1\ \mu\text{m}$  與  $2.5\ \mu\text{m}$  有高之線性關係， $R^2$  分別為 0.94 與 0.99， $4\ \mu\text{m}$  其線性關係較差， $R^2$  為 0.88，而  $10\ \mu\text{m}$  由結果觀察出無線性關係，可能原因為感測器在  $4\ \mu\text{m}$  以及  $10\ \mu\text{m}$  其數目濃度較少之故，導致誤差值增大。

(a)



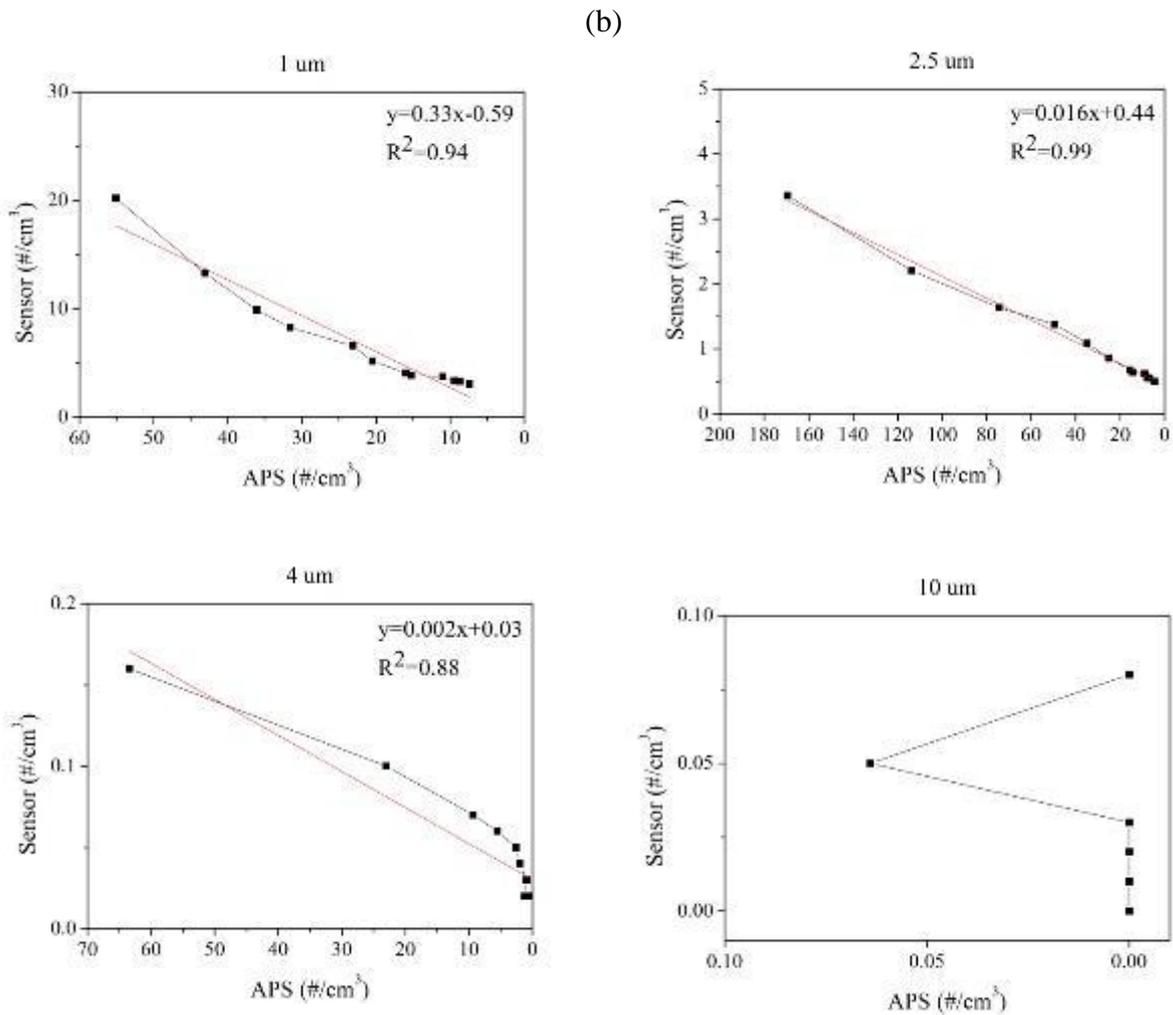


圖 43 利用粉砂岩粉末為污染源，1 μm、2.5 μm、4 μm、10 μm 數目濃度趨勢與線性關係圖(a)濃度趨勢圖; (b)線性關係圖

## 2. 質量濃度下降趨勢比對

利用污染源為細粉砂岩，將細粉砂岩樣本放置暴露艙風扇旁來產生污染源，比對氣膠監測量測儀(DustTrak)與感測器其質量濃度絕對值結果如圖 44 所示，在前五分鐘由氣膠監測量測儀(DustTrak)量測到 1 μm、2.5 μm 及 10 μm 皆出現極高質量濃度值，質量濃度分別為 600 μg/m<sup>3</sup>、700 μg/m<sup>3</sup>、1500 μg/m<sup>3</sup>，五分鐘後開始濃度下降，三十分鐘後則降回背景值濃度，然而感測器前五分鐘量測到 1 μm、2.5 μm 及 10 μm 其質量濃度分別為 50 μg/m<sup>3</sup>、60 μg/m<sup>3</sup>、80 μg/m<sup>3</sup>，且濃度下降趨勢較緩，此外，氣膠監測量測儀在 1 μm、2.5 μm、10 μm 其質量濃度分佈比例為

1:1.16:2.1；感測器為 1.:1.2:1.6，其中兩者在 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  其比例較相似，而 10  $\mu\text{m}$  則差距較大，此結果於圖 43 (b)結果中 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  其線性關係較佳有所關係，因感測器其質量濃度為由數目濃度換算而來之故所導致。

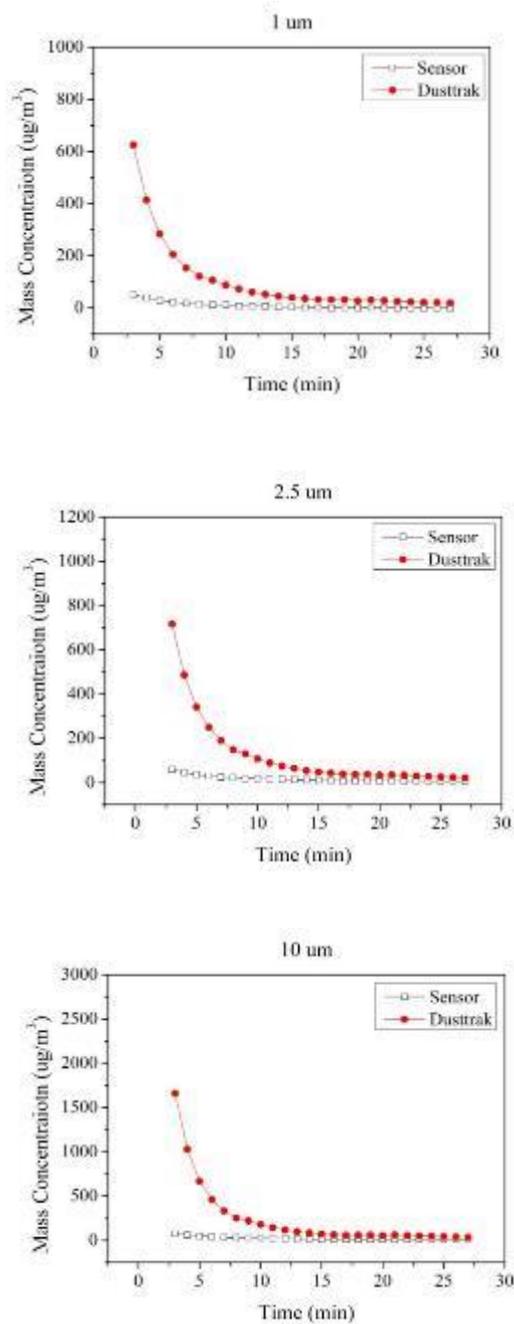


圖 44 利用粉砂岩粉末為汙染源，1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  質量濃度下降趨勢圖

另外將三十分鐘內其採樣時間相同之氣膠監測量測儀與感測器量測讀值繪製成一線性關係圖，結果如圖 45 所示， $1\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$  其  $R^2$  分別為 0.96、0.97，在  $10\mu\text{m}$  時其線性關係較差， $R^2$  為 0.91。

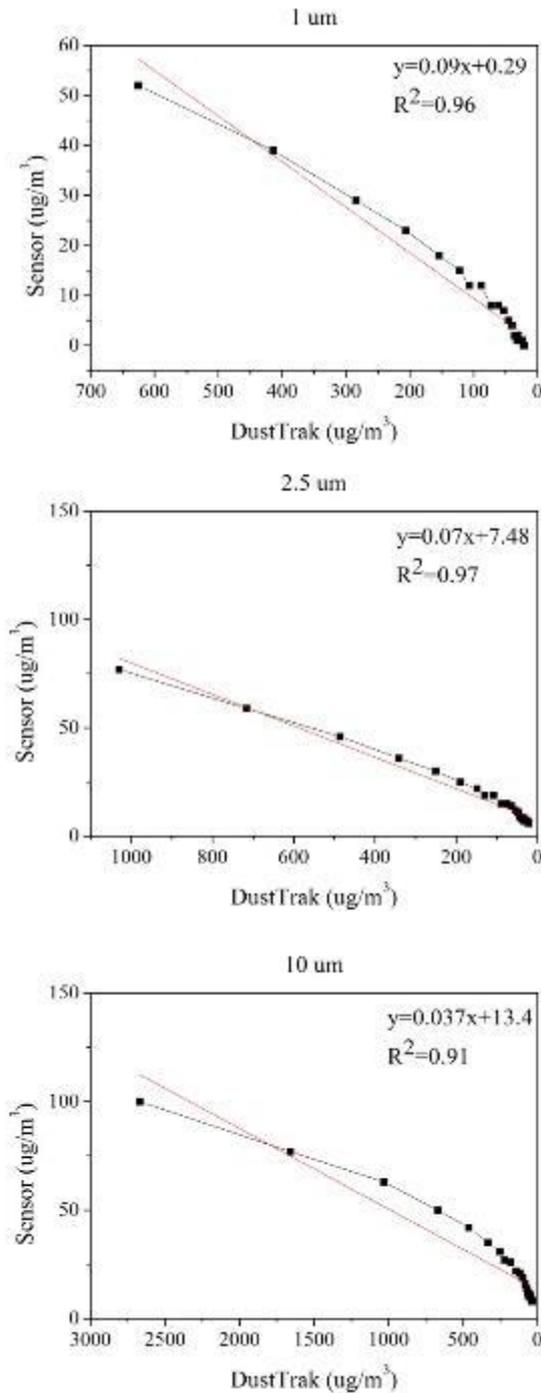


圖 45 用粉砂岩粉末為污染源， $1\mu\text{m}$ 、 $2.5\mu\text{m}$  及  $10\mu\text{m}$  質量濃度線性關係圖

### (三) 燃燒線香污染源(2.5 $\mu\text{m}$ )

透過直讀式儀器得知暴露艙內部濃度，當暴露艙濃度降至預先設定之每一比對點時，開始進行暴露艙內懸浮微粒濃度值之比對，紀錄十分鐘內所監測到之數據進行平均濃度比較。預先設定第一點比對點為  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，直讀式儀器與感測器所監測到平均濃度結果分別為 495 與  $497 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均落在 $\pm 5\%$ 可接受之誤差範圍內。接續第二至六點，直讀式儀器與感測器所監測到懸浮微粒平均濃度均可落在 $\pm 5\%$ 可接受之誤差範圍內。而透過 T-test 進行統計分析直讀式儀器所監測到懸浮微粒濃度是否與感測器所量測之濃度具有顯著差異，其結果 *p-value* 為 0.99，代表兩者所監測之懸浮微粒濃度無統計上顯著差異。

表 21 懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)比對結果

流程	TSI ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Sensor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
待機量測暴露艙內部背景濃度	6	8
待暴露艙內濃度達 $550 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 停止 pump 送氣	550	550
第一點比對點 ( $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	495	497
第二點比對點 ( $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	392	395
第三點比對點 ( $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	293	295
第四點比對點 ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	198	195
第五點比對點 ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	99	102
第六點比對點 ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	51	48
T-test	<i>p-value</i> = 0.99	

## 七、不同場域之數據傳輸設計

本研究將依據實際場域應用考量，規劃設計合適之低功耗號、低通訊成本、低資料遺失率之無限通訊模組。包括：

### (一) 開放空間、戶外主要使用 NB-IoT 數據傳輸

中華電信、台哥大、遠傳等電信三雄，於 2017 年 12 月才剛自國家通訊傳播委員會(NCC)各取得 300 萬門物聯網門號，之後也將針對 NB-IoT 推出商用服務收費，未來將依據傳輸量分級收費。本研究已設計規劃 NB-IoT 通訊模組作為戶外型無線傳輸方式選項之通訊模組。

## (二)局限空間、室內主要使用 WiFi 數據傳輸

於無法接收 NB-IoT、4G 網路訊號，或可藉由內建 WiFi 訊號覆蓋範圍進行資料傳輸，本研究已設計規劃 WiFi 傳輸為室內型無線傳輸方式選項之通訊模組。

## (三)近場藍芽數據傳輸，主要使用於裝置設定

藍芽數據傳輸主要於感測裝置近場使用，於數據顯示、參數設定、系統維護等功能。

## (四)數據狀態及資料標註

由於掌握高科技廠區作業場所危害暴露情形，將透過本研究發展作業環境監測技術，經長期、連續之有害物監測，以獲得廠區或作業現場勞工各化學物質之即時暴露濃度。因此資料蒐集過程中之資料標註(Flag)是非常重要且嚴謹的一項，經由正確蒐集之資料，以便能職場應用聯網技術收集監測資料，進行後續巨量資料之運算、分析之正確性。

本研究中將所蒐集到的資料標註類別，分別標註包括電力供應、校正、離線維修，及其他儀器訊號低於感測極限或負值等，如表 22 所示。

表 22 資料蒐集標註類別表

Flag	Activity	Data Validation & Average
P	Power Failure	Valid Average
p	Power Failure	Invalid Average
C	Calibration Activity	Valid Average
c	Calibration Activity	Invalid Average
D	Off-Line Part of	Valid Average
d	Off-Line Part of	Invalid Average
B	Bad Condition	Valid Average
b	Bad Condition	Invalid Average
+	Positive Over Range	Valid Average
m	Positive Over Range	Invalid Average
-	Negative Under Range	Valid Average
l	Negative Under Range	Invalid Average
R	Rate of Change	Valid Average
r	Rate of Change	Invalid Average

## (五)無線傳輸功能與架構

針對感測裝置之無線傳輸設計，計有：

1. 藍芽通訊協定傳輸：利用 Bluetooth 通訊字串，作為近場感測器測值顯示、警示、及感測器維護之介面，資料或命令可相互傳輸。
2. Wi-Fi、NB.IOT 通訊傳輸：利用 TCP Client 轉至 TCP Server 1883 Port 進行資料蒐集，所有資料(分鐘平均值)、資料參數(包含資料註記、校正參數等)等，皆會回傳至雲端主機。



圖 46 感測裝置無線傳輸功能與架構設計示意圖

## (六)近場場域傳輸

### 1. BT(Bluetooth)傳輸

感測器系統整合於無 BT(Bluetooth)天線狀況下，以可視距離情況下從遠到近進行 Bluetooth 應用程式距離之測量，每次改變的距離是約 0.6M，每次皆關掉應用程式重新連結 Bluetooth，反覆測量 5 次，總和的 Bluetooth 可連接距離平均值約是 12M。

另外再隔約 8cm 實心牆的強況下從遠到近進行 Bluetooth 應用程式距離之測量，每次改變的距離是約 0.3M，每次皆關掉應用程式重新連結 Bluetooth，反覆測量 3 次，總和的 Bluetooth 可連接距離平均值約是 4M。

以上兩次皆在未先連接 Bluetooth 的情況下進行，如果預先與應用程式連結 Bluetooth 程式在較遠距離下能感應到 Bluetooth 的存在及有數值的變動，但會發生數值異常，建議在可連接範圍內進行手機及裝置 Bluetooth 應用程式之配對。

## 2. 系統以中斷(Interrupt)回應藍芽連線設計

中斷(Interrupt)設計為使 MCU 會在事件發生時立即收到通知，並可快速切換至所要求的處理，這種快速回通常被稱為即時處理。事實上，若中斷(Interrupt)處理的頻率非常高，運作速度將因為必須中斷(Interrupt)事件而變慢，同時也會因為要以輪詢迴圈(Loop)進行主要處理作業的難度而變慢。

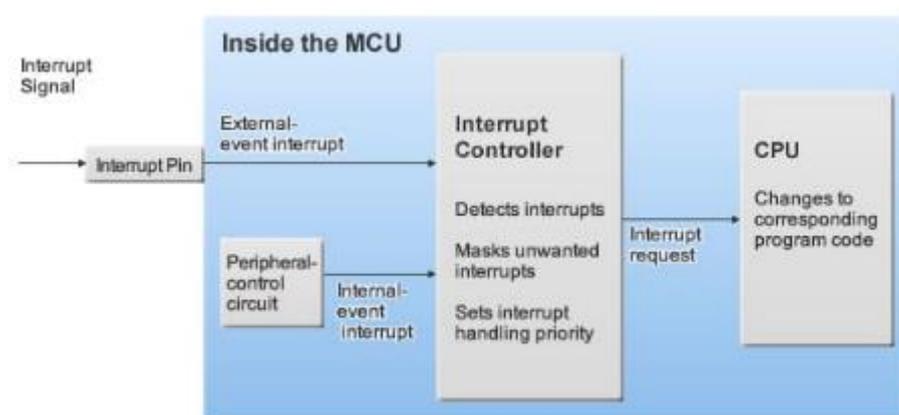


圖 47 感測裝置中斷(Interrupt)處理程序示意圖

因為系統能耗關係，在設計上以藍芽連線連線之行動裝置設計為被動性(人為觸動)Polling 之感測值查詢(另有自動 Polling 設定)。當藍芽連線被觸動時，系統立即執行一 UART 之中斷(Interrupt)處理，以修先處理行動裝置上要求之系統命令。本研究感測裝置中斷(Interrupt)處理程序設計有：

- (1) 優先處理即時感測值，含儀器訊號(Count 值)之顯示要求。
- (2) 優先處理超標警示(關閉蜂鳴器)。
- (3) 手動 Wi-Fi 斷線之重新連線。
- (4) 系統設定，包括警示關閉及開啟(ON/OFF Alarm)、警示值設定、系統校正值修訂等。

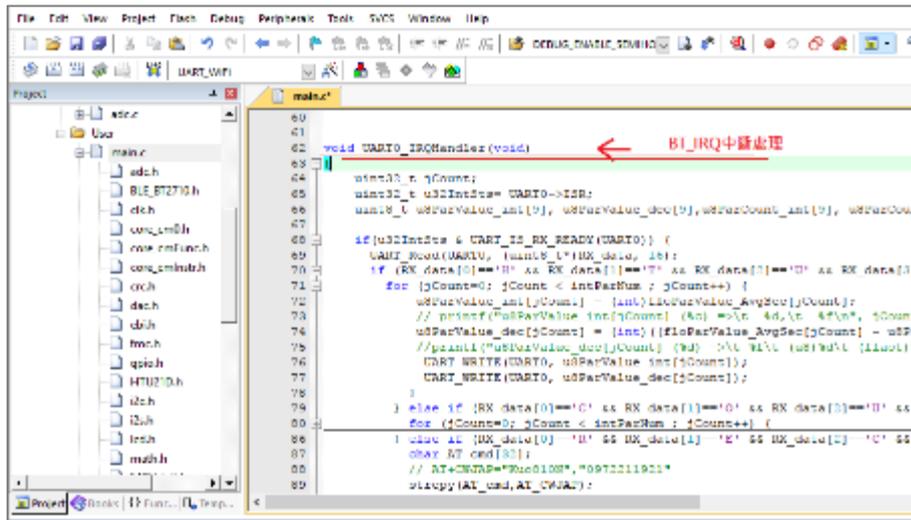


圖 48 感測裝置中斷(Interrupt)處理程序邏輯

## (七)資訊傳輸之容量

### 1. 感測裝置傳輸數據量

感測裝置傳輸設計，於每分鐘上傳分鐘均值(MinAvg)至系統前，以 TCP Client Port : 1883 方式與 TCP Server 端建立連線。上傳封包包括分鐘平均感測值(MinAvg\_Value)及分鐘平均儀器值(MinAvg\_Count)，以字串形式封包傳輸，封包約為 100 bity，字元設計溢位值為 192 bity。

### 2. 感測裝置傳輸容量

IEEE 802.11n，是由 IEEE 在 2004 發展，2009 年核定的標準。其增加了對 MIMO 的支援，允許 40MHz 的無線頻寬，最大傳輸速度理論值為 600Mbit/s。以一般 ISP(例如中華電信)表定連線頻寬 100Mbit/s，實際連線 20Mbit/s 連線速率來看，連線主要瓶頸仍為一般 ISP 業者系統。網路速度計算理論值應可同時容納 16 萬組感測器同時連線。至於終端伺服器回應處理部分仍為系統容量瓶頸，仍須以實際多感測器同時運行測試方式評估相關系統性能。

## 八、初步結論

### (一) 數目濃度(0.3 $\mu\text{m}$ 、0.5 $\mu\text{m}$ 、1 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$ 、4 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ )

1. 使用硫酸銨溶液為穩定產生污染源，其粒徑集中小於 0.5  $\mu\text{m}$  以下，結果指出

在 0.5  $\mu\text{m}$  與 1  $\mu\text{m}$  時，直讀儀器 APS 與感測器有較高之線性關係， $R^2$  分別為 0.97、0.88。

2. 使用細粉砂岩粉末產生 1  $\mu\text{m}$ -10 $\mu\text{m}$  其微粒污染源之濃度下降趨勢比對實驗，結果指出直讀儀器 APS 與感測器在 1  $\mu\text{m}$  與 2.5  $\mu\text{m}$  具有高之線性關係( $R^2>0.9$ )；而 4  $\mu\text{m}$  其線性關係較差， $R^2=0.88$ ，10  $\mu\text{m}$  則無線性關係，原因可能為污染源所含之 4  $\mu\text{m}$  與 10  $\mu\text{m}$  其數目濃度極低而導致。
3. 因此在量測數目濃度時，感測器在 0.5  $\mu\text{m}$ 、1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  可用公式與直讀儀器 APS 進行校正。
4. 感測元件(sensor)與掃描式電移動度分析儀(SMPS)兩者偵測原理不同，因此在 0.3  $\mu\text{m}$  處有較大的差異，0.3  $\mu\text{m}$  數目濃度應以 SMPS 讀值為準。Sensor 使用雷射光散射原理來量測懸浮微粒濃度，有文獻指出在使用光學原理量測儀器在懸浮微粒直徑大於 1  $\mu\text{m}$  才有較好的訊號讀值(Wang et al., 2009)。而 SMPS 乃使用不同粒徑的懸浮微粒具不同電移動性的原理，使懸浮微粒帶電後再把不同大小的懸浮微粒分離出來，對小於 1  $\mu\text{m}$  懸浮微粒數目濃度量測相較於 sensor 有較準確的結果。

## (二) 質量濃度(1 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ )

1. 粒徑為 1 $\mu\text{m}$  時且環境維持在一 DustTrak 其讀值為大於 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  一小時內，感測器與直讀儀器 DustTrak 具有高之相關性( $R^2>0.99$ )，當 DustTrak 讀值小於 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  時與感測器其濃度讀值無線性關係。
2. 粒徑為 1 $\mu\text{m}$  時，感測器分別在三種低中高質量濃度(直讀計 DustTrak 讀值為 20、120-180、400-600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )時具有高線性關係( $R^2=0.96$ )。
3. 使用細粉砂岩污染源方法所產生 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  質量濃度大於 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，結果指出 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$  及 10  $\mu\text{m}$  下降趨勢中其線性關係  $R^2$  皆大於 0.9。
4. 質量濃度中可用公式校正之粒徑為 1  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ ，因此感測器所能量測之質量濃度濃度範圍皆可用公式與直讀儀器進行校正。

## 附錄 2 氣體感測裝置使用說明

勞工安全意識越來越注重的情況下，需要一套隨身偵測設備可對工作人員周遭進行即時的环境監測，本產品不管在一般工業環境甚至危險作業環境，皆可有效即時的了解周圍環境是否具有危害物質。

本產品除了固定式感測器以外，同樣效能下同時備有穿戴式感測器增加行動性。外觀方正大氣，正面壓克力面板使設備的美觀度提升。另外考量盡可能不影響人員作業，所配置穿戴式感測器尺寸以最低限度設置，更能提高作業人員方便性，可偵測氣體項目包含：溫度、濕度、總碳氫化合物 (TVOCs)、異丙醇 (IPA)、苯 (Benzene) 及氯氣 (Cl<sub>2</sub>) 與懸浮微粒 (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)。感測器甚至可透過手機 APP 分析各測項數據，及即時了解危害風險評估數值，感測器的資料能即時上傳到系統指定的資料集中伺服器，為節能提供數據資料和保障。

### 功能特點

- 一機多用，可同時偵測 1 至 5 種氣體濃度。
- 因應佈點與監測需求，提供不同型號感測器。
- 口袋式大小，方便攜帶作業，電池耐用。
- 採用原裝進口檢測單元，設量精度高、抗干擾能力強。
- 內鍵蜂鳴警報功能，可進行各測項設定報警值的上下限。
- 可通過手機 APP 即時了解各項測值參數，快速了解危害風險等級。
- 偵測反應快，感測數值解析度 (Data Resolution) 高。
- 維護容易，易於進行系統維護。

## 主要規格參數

電源	4.2 V DC
功率	<5V 180mA
監測項目	溫度、濕度、總碳氫化合物 (TVOCs)、異丙醇 (IPA)、苯 (Benzene)、氯氣 (Cl <sub>2</sub> )、懸浮微粒 (PM <sub>10</sub> ,PM <sub>2.5</sub> )
設備尺寸 (mm)	區域固定式：134×75×30；個人配戴式：110x62x30
通訊方式	APP：藍芽；雲端：wifi
電池壽命	區域固定式：16 小時；個人配戴式：8 小時
操作環境	0~50℃；20~95%RH
預熱時間	10 分鐘
設備材質	PVC

## 感測元件參數

感測項目	溫度	濕度	懸浮微粒	TVOCs	異丙醇	苯	氯氣
廠牌	Aosong	Aosong	ONEAIR A5	Alphasense	Winsen	Alphasense	Alphasense
感測原理	電容式	電容式	雷射式	PID	電化學	電化學	電化學
量測範圍	0~100℃	0~100% RH	0.3~10 μm	0~10 ppm	0~10 ppm	0~100 ppm	0~20 ppm
作業環境容許濃度	-	-	1,000 μg/m <sup>3</sup>	50 ppm	400 ppm	1 ppm	0.5 ppm
解析度	0.1℃	0.1%	1 μg/m <sup>3</sup>	0.01 ppm	0.1 ppm	0.01 ppm	0.01 ppm
MDL	-	-	-	0.1 ppm	3.5 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm
Linearity	-	-	1 μm R <sup>2</sup> =0.94 2.5 μm R <sup>2</sup> =0.99	0~2.5 ppm R <sup>2</sup> =0.9998	0~100 ppm R <sup>2</sup> =0.9910	0~2.5 ppm R <sup>2</sup> =0.9988	0~1.25 ppm R <sup>2</sup> =0.9964



圖 1 區域固定式感測器外觀

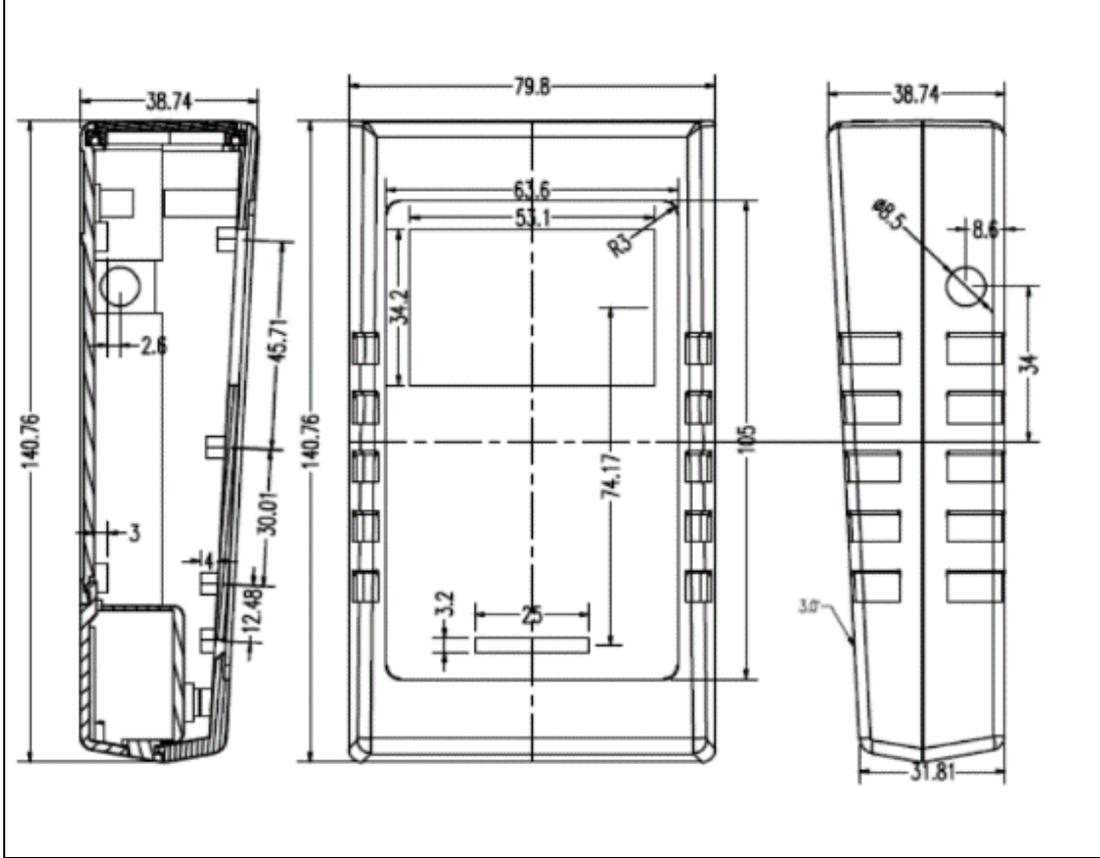


圖 2 區域固定式感測器構造設計圖



圖 3 個人配戴式感測器外觀

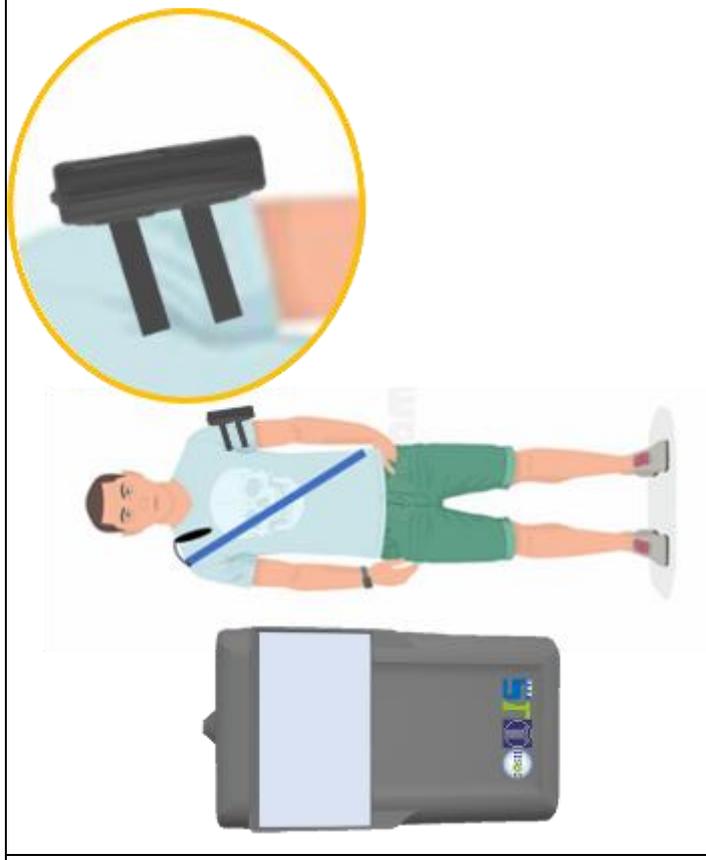


圖 4 個人配戴式感測器配戴示意圖

## 行動 APP 使用說明

目前已開發 Android 系統所使用的行動 APP，可透過智慧型手機連結現場感測裝置，經由手機螢幕呈現污染物即時監測數值，具有即時、快速及便利等優點，本節針對行動 APP 下載、介面介紹、零點全福設定為主，於下文提出詳細說明。

### (一) 職場有害物即時監控系統-載點說明

1. 於 Google Play 搜尋框內鍵入「ILOSH 勞安所作業環境有害物智慧監測」。
2. 點選後具有安裝鍵及說明。

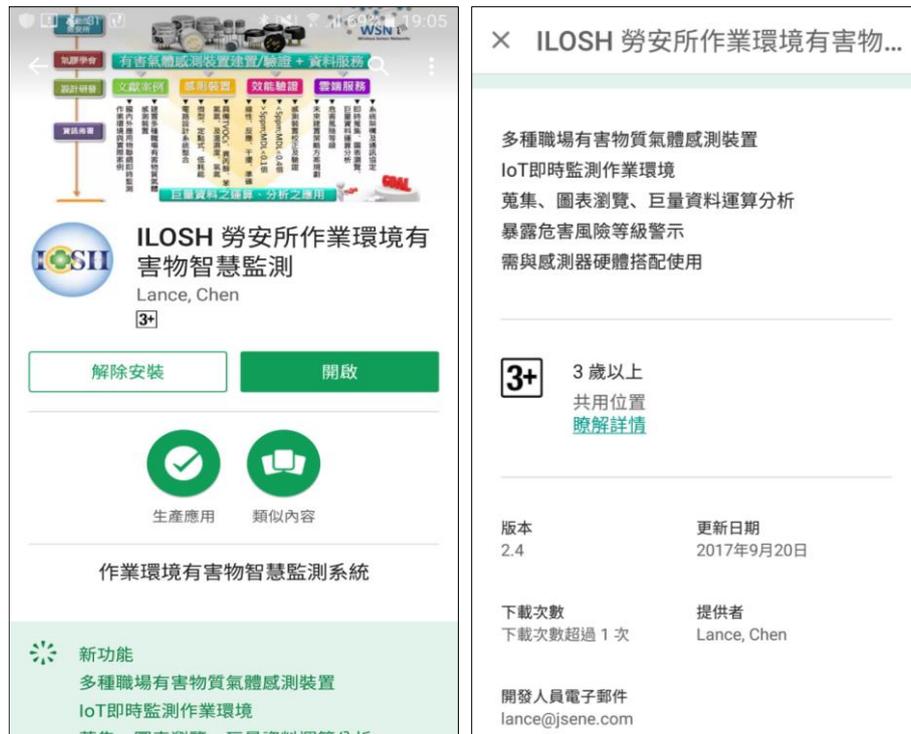


圖 5 職場有害物即時監控系統 APP 下載示意圖

### (二) 職場有害物即時監控系統-介面說明

1. 進入畫面首頁，功能：設備連結、智慧感測及系統設定。
2. 智慧感測：所有上線中的感測器即時讀值之顯示。
3. 風險評估：根據感測器各測項之即時數據推估現場作業風險等級。



圖 6 職場有害物即時監控系統首頁

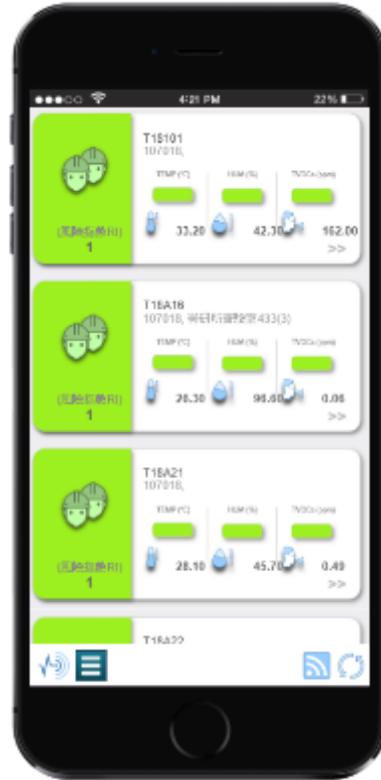


圖 7 APP 數據顯示

4. 現場監測資訊與監測項目：可從手機 APP 中觀察目標污染物之即時濃度值，測項包括：溫度、濕度、總揮發性有機物 TVOCs、異丙醇 IPA、氯  $\text{Cl}_2$  與細懸浮微粒  $\text{PM}_{2.5}$  等。
5. 風險評估：根據感測器各測項之即時數據推估現場作業環境有害物暴露風險等級。



圖 8 職場有害物即時監控系統監測資訊

6. 數據手動更新鍵：點選後監測數據將會更新，點選各感測器即時數值亦會同時更新最新數據。
7. 警報功能：根據法規濃度限制，當超標時發出警報警訊，並以圖示與顏色區分風險暴露等級之不同。
8. 即時測值會依據現場監測數值，持續更新最新數據。



圖 9 監控系統顯示頁面



圖 10 警報功能操作說明

9. 場域客製化感測器分布圖：依據感測器佈點場域現場平面圖客製化感測器分布圖並配有即時測值之顯示。



圖 11 根據不同場域客製化感測器分布圖

10. 勞研所最新消息公布：提供使用者關於勞研所最新訊息之公布。



圖 12 勞研所最新消息公布欄





圖 14 後端監控平台首頁

## 專案管理

6. 由左端選單點選個別專案進入專案監控各感測器頁面。

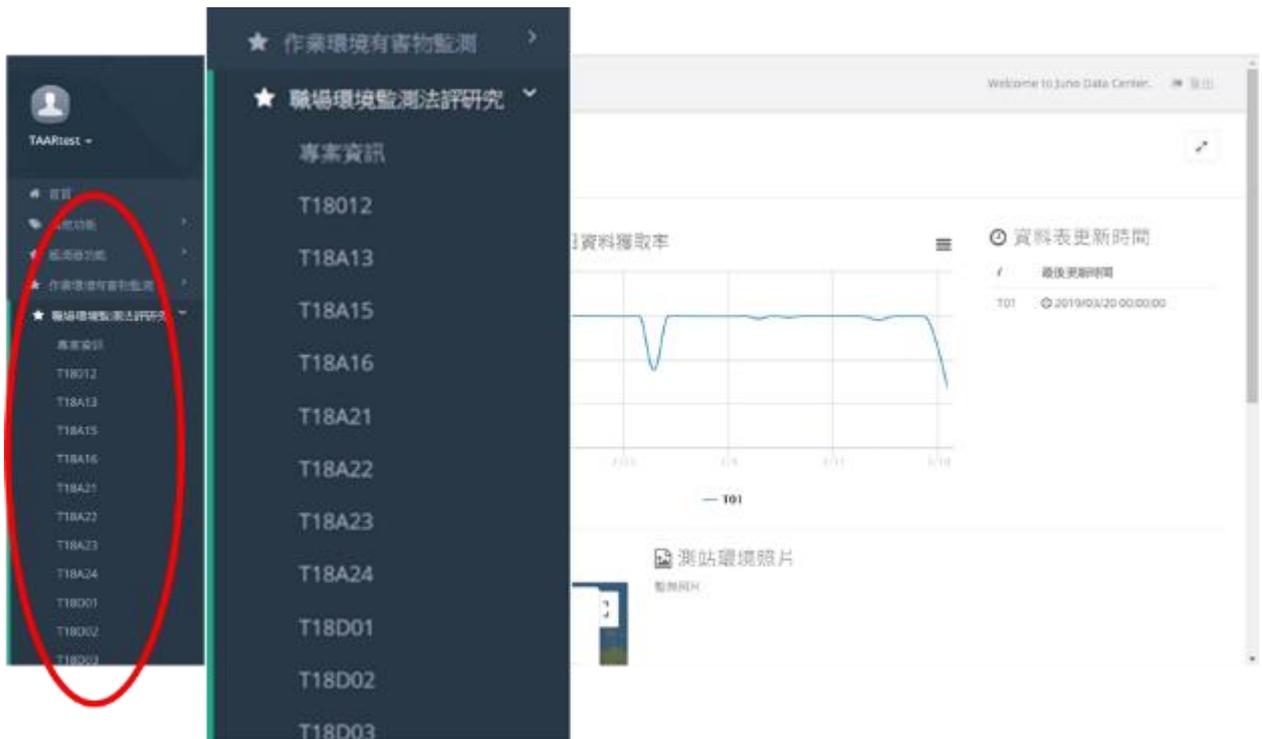


圖 15 後端監控平台個別專案管理頁面

## 資料獲取情形

1. 感測點(站)資料更新狀態，列表感測點(站)並檢視每一時間資料表的更新時間及狀態，以四種顏色提示每一資料表更新狀態。
2. 圖表顯示感測點(站)各時間表之資料獲取率，示意圖如下圖所示。



圖 16 感測點(站)各時間表之資料獲取率例圖

## 歷史資料檢視

1. 依數據監測系統所提供之時間類別可選擇分鐘均值、五分鐘均值、小時均值和一日均值等瀏覽資料表。
2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供選取方框選擇欲顯示之測項欄位。
4. 每一欄位可遞增或遞減排序。
5. 提供 Excel 格式下載資料表功能。
6. 歷史資料檢視示意如下圖所示。



圖 17 感測點(站)歷史資料檢視示意表圖

### 日報表資料檢視

1. 顯示單一測項之每日二十四小時資料。
2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供下拉選單選擇欲顯示之測項。
4. 每一欄位可遞增或遞減排序。
5. 自動計算查詢區間之資料獲取率。



圖 18 日報表資料檢視示意表圖

### 趨勢圖表檢視

1. 依數據監測系統所提供之時間類別可選擇一分鐘、五分鐘、一小時和一日資料繪製趨勢圖。
2. 自訂起始日期(時間)和結束日期(時間)查詢特定區間資料。
3. 提供選取方框選擇欲顯示之測項欄位。
4. 三種顯示模式：正常模式、多重座標軸模式、座標軸分行模式。
5. 可顯示或屏蔽測項的趨勢線(圖)。
6. 每一測項可設定趨勢線種類：折線圖、曲線圖、折線區域圖、曲線區域圖、柱狀圖、點圖(圓形、方形、菱形、正三角、倒三角)。
7. 提供 PNG、JPEG、PDF、SVG 等四種下載格式。

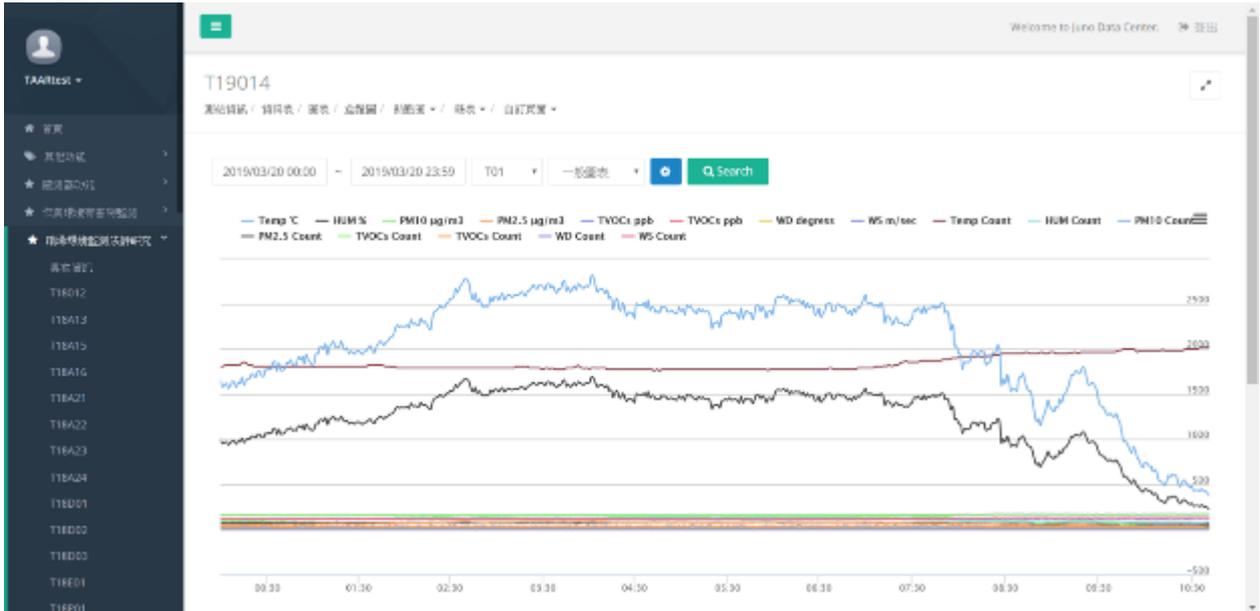


圖 19 趨勢圖表資料檢視示意圖

### 即時監測數據展示

8. 顯示各感測點（站）及測項之即時測值。
9. 紅色警示即時測值未更新或離線。

測站代碼	測站名稱	資料表最後更新時間
TNSPWW	南科汙水廠	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:00 T1440: 09/25
TNSPSD	南科員工宿舍	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:01 T1440: 09/25
TNSPIW	南科群創門口	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 21:01 T1440: 09/25
TNSPRC	南科資源中心	T60: 09/24 T05: 08/24 T01: 08/24
TNSPUMC	南科聯電	T60: 20:00 T01: 21:01 T05: 20:55 T1440: 09/25
TNSPIP	群創水質站	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 00:01 T1440: 09/25
LJSPSD	路科員工宿舍	T60: 20:00 T05: 20:55 T01: 09/08 T1440: 09/25
TNDYL	進管湖	T05: 07/01

圖 20 即時監測數據展示示意圖

### 數據分析

10. 經由左列選單點選其他功能：測站資料分析，可進行不同感測器歷史讀值之數據分析。
11. 經由選單點選個別專案中不同感測器、時間尺度與測項，並可自訂趨勢圖線性顏色，以區分不同感測器。

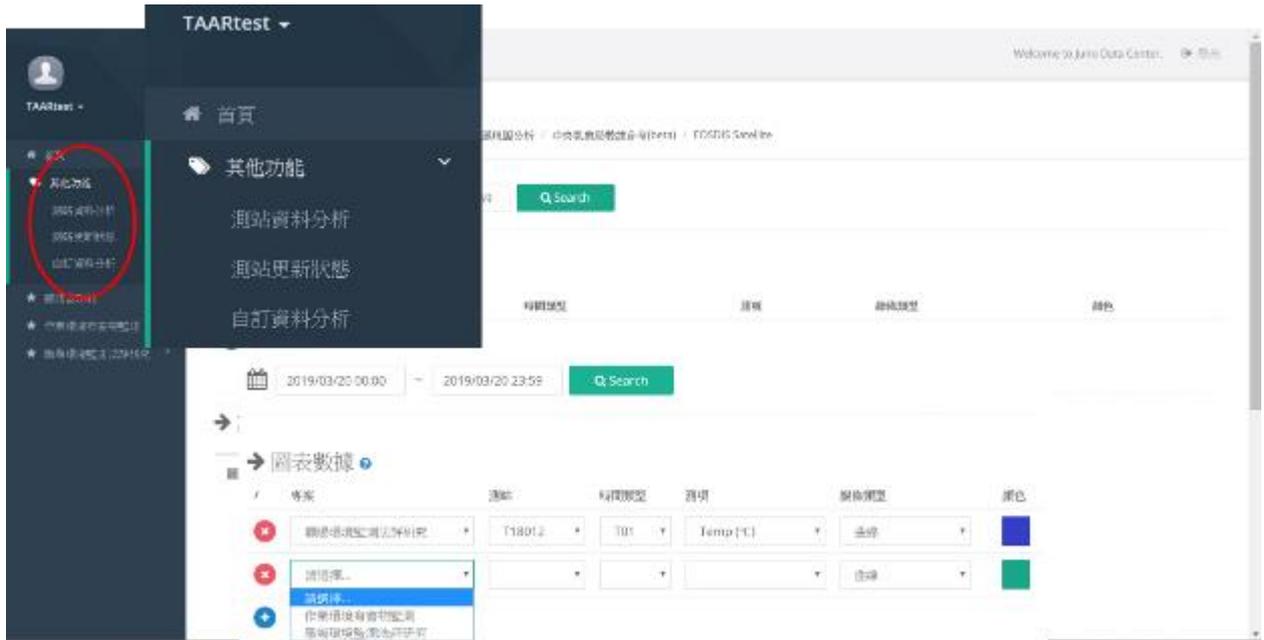


圖 21 歷史數據分析示意圖

## 保固

1. 保固期間：產品主機自購買日享有 5 年的保固服務。消費者如有保固服務需求時，需提供購買發票或證明。如消費者無法提出購買發票或證明，保固期間之計算則依產品之出廠日期起算 15 個月。
2. 保固地區：本保固服務條款有效適用之地區為台灣地區。
3. 非保固範圍：
  - (1).因意外、濫用、誤用、水、淹水、火災或其他天災或不當放置等外來因素造成的損壞。
  - (2).非經本公司授權之維修人員所進行之檢修、修改或變更，可能造成產品永久性損壞。

## 使用注意事項

1. 工作溫度：0 °C ~ +50 °C
2. 當您為本產品設置覆蓋物時，覆蓋物不能密封並遮住元件感測區。
3. 必須有通風，以確保機本正常氣體擾動已達感測目的。
4. 請勿重摔重壓及丟入水中
5. 完全沒電至充滿電約 6 小時左右，區域固定式感測器充滿電一次約可使用 16 小時，

個人配戴式則可使用 8 小時。

6. 設置裝置時位於接近口鼻位子，以達到保護使用者的健康安危之功能。
7. 當濃度超出標準時會發出警訊聲。

## 附錄 3 通訊協定

### 物聯網資料通訊協定

MQTT 的全名為 Message Queuing Telemetry Transport，是由 IBM 的 Andy Stanford-Clark 博士和 Eurotech 的 Arlen Nipper 博士於 1999 年共同發明的通訊協定。以下以 MQTT 簡稱。

MQTT 是為了物聯網而設計的通訊協議，透過發布者(Publisher)/訂閱者(Subscriber)的方式來做訊息傳送。由於是針對物聯網而設計的協定，因此它所應用的資源非常低，適合用於在處理器資源及網路頻寬有限的物聯網裝置，再加上已經有許多 MQTT 程式庫被陸續開發出來，以及開放 MQTT 伺服器的原始碼，使得開發 MQTT 物聯網、機器之間(Machine to Machine,M2M)的通訊變得非常簡單(例：Facebook Messenger 的即時通訊即使用 MQTT 協定。)

#### (一) MQTT 與 HTTP 差異

MQTT 和 HTTP 的底層都是 TCP/IP，「TCP/IP」是 Transmission Control Protocol(TCP)和 Internet Protocol(IP)的簡稱，為網路上的一種通訊協定，是上網時大家都遵循的一些規則。有了這些規則，即使是不同的電腦設備與作業環境，都可以透過這些通訊協定來互通訊息。同時也是因為這些規則，Internet 才可能有這麼多應用(WWW、E-Mail、FTP、Telnet 等)。TCP/IP 是一個開放的標準，任何人均可自由的下載和 TCP/IP 相關的技術標準和文件；同時 TCP/IP 也鼓勵使用者評論這些標準，一同來幫忙改善網路的執行效率。MQTT 和 HTTP 差異在於網路上流通的「訊息格式」以及應用程式的處理機制不同。以下作差異說明。

假設某個裝置透過 Web 瀏覽器，以 HTTP 協定傳送溫度數值給網站伺服器如圖 1 所示。

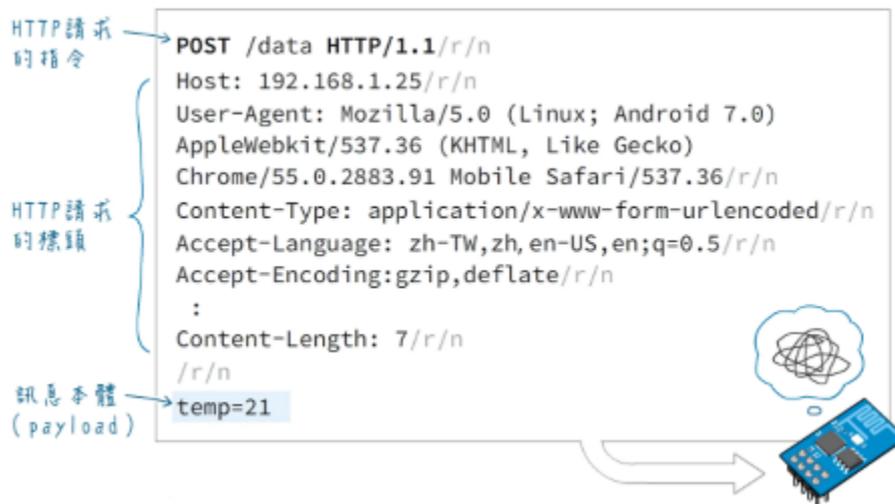
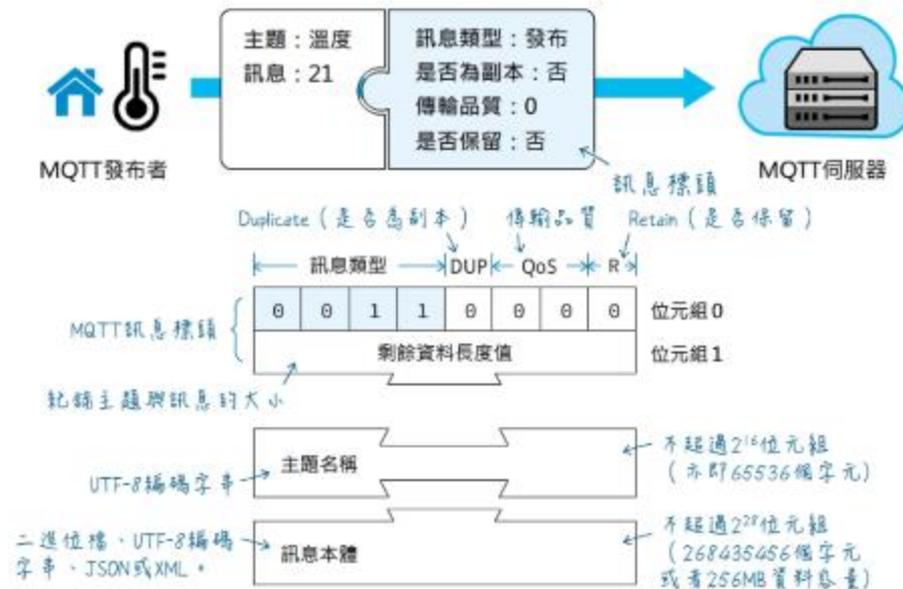


圖 1 HTTP 通訊協定傳送模式

除了 HTTP 請求指令以及代表 21 度的訊息本體，訊息中間夾帶許多描述用戶端的標頭(header)資訊，例如：來自於 Chrome 瀏覽器、作業系統是 Android 7、可讀取中文、英文等等。這些額外的標頭訊息在許多物聯網通訊應用不僅僅是多餘的，不僅佔用網路頻寬、記憶體並且需花費更多時間處理。

採用 MQTT 所發佈溫度訊息的格式如圖 2 所示，不同於 HTTP 的標頭需採用文字描述，MQTT 的標頭則採用數字編碼，整個長度只佔 2 位元組，等同於兩個字元。除了更精簡的標頭，且 MQTT 的標頭區並未標示傳送目標的 IP 位址。



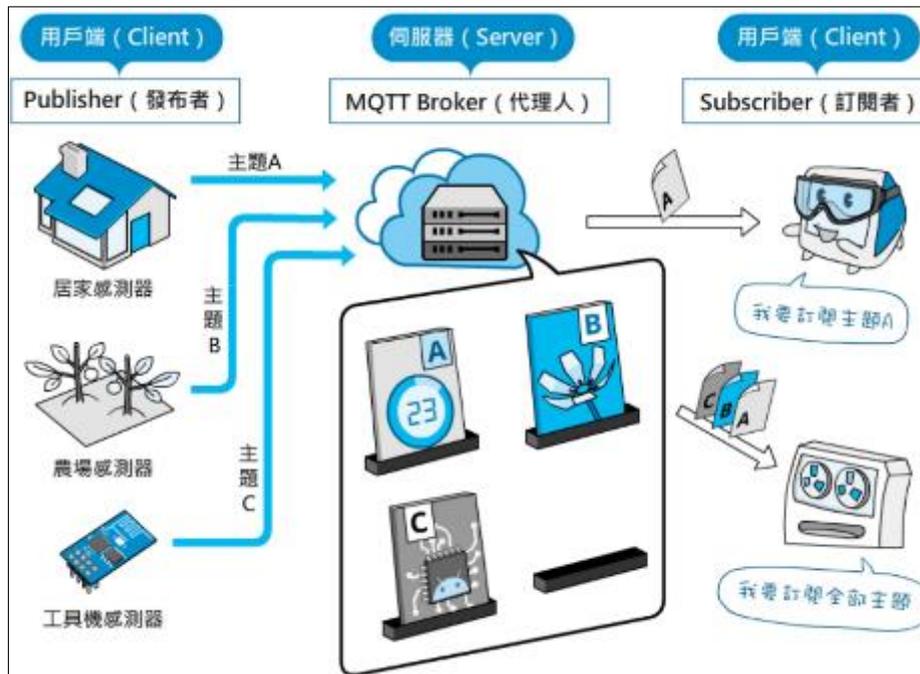
資料來源：：<https://swf.com.tw/>

圖 2 MQTT 通訊協定傳送模式

## (二) MQTT 傳送機制

MQTT 是一種基於「發布/訂閱」機制的訊息傳輸協定，可以想像成雜誌發行和訂閱的機制。MQTT 訊息發送端，相當於雜誌出版商，雜誌出版之後並不直接提供給消費者，而是交由經銷商或書局作為代理人(Broker)，來統籌管理發行和訂閱事宜。

代理人是個伺服器軟體，向伺服器發送主題的一方是發佈者(Publisher)，從伺服器獲取主題的一方為訂閱者(Subscriber)。傳送感測器資料的一邊是發布者，接收感測器資料的一邊則是訂閱者。每個感測器/微控器的訊息都需建立主題名稱以利識別，如圖 3 所示。(資料來源：<https://swf.com.tw/>)



資料來源：：<https://swf.com.tw/>

圖 3 MQTT 傳輸機制

代理人(Broker)可儲存發布者的訊息，在發布者(Publisher)中斷連線的情況下，提供訂閱者(Subscriber)最近更新的訊息。訂閱者(Subscriber)需要告知代理人(Broker)想要訂閱的主題，每當發布者 (Publisher)傳入新訊息時，代理人(Broker)就會依照主題，傳送給所有訂閱者(Subscriber)。「發布者」(Publisher)和「訂閱者」(Subscriber)都是用戶端，代理人(Broker)是伺服器。由於兩個用戶端之間有伺服器當作中繼站，所以兩邊並不需要知道彼此的 IP 位址。

### (三) MQTT 的特性

MQTT 通訊協定意味用戶端較小，可有效使用網路頻寬，MQTT 通訊協定具有「保證傳送」及「隨發即忘」的等功能，除此之外還有以下特性：

發布(Publish)/訂閱(Subscribe)的訊息傳送模式，來提供一對多的訊息發送。

使用 TCP/IP 來提供基本的網路連結。

三種訊息傳輸品質設定，MQTT 定義「0」最多傳送一次(at most once)；

「1」至少傳送一次(at least once)；「2」確實傳送一次(exactly once)

「0」最多傳送一次：不保證訊息會送達，MQTT 裝置之間的訊息傳遞基於 TCP/IP，在正常連線狀態下，TCP 能確保訊息封包都能抵達目的地。在網路階層架構中，「MQTT 程式」屬於應用層，它產生的訊息交給下一層(TCP)處理，但 MQTT 程式並不清楚最底層的網路是否壅塞甚至斷線，所以才說，MQTT 不保證能交付訊息。

「1」至少傳送一次：代理人(Broker)收到訊息之後，會回應 PUBACK 訊息(publish acknowledgement，發布確認)給發布者(Publisher)，確認有收到訊息。假如一段時間過後，發布者(Publisher)沒有收到 PUBACK 回應，它會認定訊息沒有送達，因而重新傳送一次訊息。然而，如果代理人(Broker)有收到訊息，但是在它傳送回應時，發布者因連線故障而漏接回應。發布者(Publisher)會誤以為對方沒收到訊息而再次傳送，導致訂閱者(Subscriber)重複收到相同訊息。

「2」確實傳送一次：當代理人(Broker)收到訊息時，它將回覆 PUBREC(publish received，已收到發布訊息)，並且暫存訊息的「封包識別碼」，以防重複處理相同的訊息。當發布者代理人(Broker)收到 PUBREC 回應時，將傳送 PUBREL (publish release，釋放發布訊息)給代理人(Broker)，代理人(Broker)會先把訊息傳送給訂閱者(Subscriber)，然後回應 PUBCOMP (publish complete，發布完成)並刪除之前暫存的訊息。

如果佈署的物聯網裝置採用的網路很穩定(如：有線網路)，或者在感測器頻繁地發送數據，即使遺漏少數樣本數據也無妨的情況下，則採用「0」最多傳送一次設定。

假如所應用場合需確實接收每一則訊息，且用戶端程式可以過濾(或者不在乎)重複的訊息，那麼「1」至少傳送一次設定已足敷使用，因此設定不會像「2」確實傳送一次那樣佔用較多網路頻寬、處理器資源和傳輸時間。

國家圖書館出版品預行編目資料

作業環境有害物即時監測運算及驗證研究 / 周瑞淑等著. --		
1 版. -- 新北市：勞動部勞研所，民 108.06		
面；公分		
ISBN 978-986-05-9094-4 (平裝)		
1.勞工衛生 2.職業衛生		
1.	412.53	108006498

作業環境有害物即時監測運算及驗證研究  
著（編、譯）者：鄭乃云、王琳麒

出版機關：勞動部勞動及職業安全衛生研究所  
22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號  
電話：02-26607600 <http://www.ilosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 108 年 6 月  
版（刷）次：1 版 1 刷  
定價：500 元  
展售處：

五南文化廣場	國家書店松江門市
台中市 中區 中山路 6 號	台北市 松江路 209 號 1 樓
電話：04-22260330	電話：02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「研究成果／各年度研究報告」，網址為：  
<https://laws.ilosh.gov.tw/ioshcustom/Web/YearlyReserachReports/Default>
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述，並請注意需註明資料來源；有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN:1010801240

ISBN: 978-986-05-9094-4



勞動部勞動及職業安全衛生研究所

INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR



地址：新北市汐止區橫科路407巷99號

電話：(02) 26607600

傳真：(02) 26607732

網址：<http://www.ilosh.gov.tw>

ISBN 978-986-05-9094-4



9 789860 590944

GPN:1010801240

定價：新台幣500元