

出國報告（出國類別：出席國際會議）

**澳大利亞 2025 室內空氣品質年會  
（2025 Indoor Air Quality  
Conference）出國報告**

服務機關：行政院環境部大氣環境司

姓名職稱：周幸儀薦任技士

派赴國家/地區：澳大利亞/墨爾本

出國期間：114 年 5 月 21 日至 114 年 5 月 29 日

報告日期：114 年 7 月 31 日

## 摘要

澳大利亞 2025 室內空氣品質年會(2025 Indoor Air Quality Conference)於 2025 年 5 月 26 日至 5 月 27 日於澳洲墨爾本舉行，會議主題包含室內空品污染物傳播模式、監測及淨化設備、國際室內空品建議值適用性探討，於會議中口頭報告臺灣室內空品政策及未來方向、半定量室內空氣品質評核方法的建立與應用。

參訪行程包含拜訪墨爾本大學 Jason Monty 教授，討論室內空品政策、參訪墨爾本南十字車站及 Nightingale Village、參與澳大利亞 2025 室內空氣品質工作坊，討論二氧化碳濃度是否適合作為室內空氣品質的基準。會議中結論為室內空氣品質 (IAQ) 管理應貫穿建築全生命週期，從選用低逸散建材、施工品質控管，到營運階段的智慧化監測與淨化。應導入以「主要風險污染物」為核心的管理思維，例如：高密度空間則以 CO<sub>2</sub> 作為通風指標。技術指引應明確界定 CO<sub>2</sub> 僅為觸發設備的代理指標，避免誤用導致過度通風與濕害問題。建議導入整合通風、過濾、淨化的「等效潔淨空氣」管理模式，參考國際標準如 ASHRAE 241。應強化建築濕度控制與能源協同設計，整合低成本感測與自動化系統以實現自主管理，並推動示範試點驗證其可行性與效益。

# 目錄

壹、計畫目的.....	5
貳、行程及工作內容概要.....	5
參、管理典範的轉移與制度革新.....	6
一、為何改變：從公共衛生權到系統性風險的反思.....	6
(一) 室內空氣傳染風險與制度反思：Patrick Chambers.....	6
(二) 無障礙觀點下的 IAQ 政策轉型 Safe Air Project 倡議：Plum Stone.....	6
二、新一代 IAQ 標準的誕生：風險導向與性能驗證.....	8
(一) ASHRAE Standard 241 與空氣傳播感染控制標準：Dr. Max Sherman.....	8
(二) ASHRAE 241 在澳洲應用：健康、節能與 IAQ 效益：Ben Gill.....	11
(三) CO <sub>2</sub> 作為 IAQ 代理指標的科學基礎與政策建議：Lydia Morawska.....	11
(四) WELL 標準與 IAQ 健康性能驗證：Jack Nunan.....	13
三、危害範式(Harm Paradigm)與 IAQ 健康風險量化.....	14
四、IAQ 的智慧治理：從數據驅動到目標導向.....	17
(一) 智慧建築資料導向的 IAQ 維運策略：Kourtney Null.....	17
(二) IAQ 評估策略與制度挑戰：Jeremy Stampos.....	19
肆、關鍵污染物監測與前瞻技術.....	20
一、虛構案例解析：IAQ 監測複雜性與風險驗證.....	20
(一) 先進 IAQ 監測技術與風險評估應用：Dr Claire Bird.....	20
二、傳統 IAQ 指標之再檢視：CO <sub>2</sub> 與相對濕度.....	23
(一) 室內 CO <sub>2</sub> 指標的應用與迷思解析：Andrew Persily.....	23
(二) CO <sub>2</sub> 作為 IAQ 管理指標之政策建議：Max Sherman.....	26
(三) CO <sub>2</sub> 濃度與健康與認知效能關聯：Pawel Wargocki.....	27
(四) 室內相對濕度與健康關聯性：Mark Jones.....	30
三、IAQ 表面與空氣污染監測之新技術.....	32
(一) 室內環境清潔效能與表面污染的科學實證及應用— Dr. Richard Shaughnessy.....	32
(二) 開發以呼吸道微生物群為基礎之室內空氣感染風險評估標記：方法驗證與應用展望 — Henry Oswin.....	34

(三) 雙功能煙霧警報器與 IAQ 偵測整合技術：Savinda Lekamge.....	35
四、過濾與淨化技術的革新 .....	37
(一)澳洲空氣過濾器標準 AS/ISO 16890：Philipp Schluter .....	37
(二) HEPA 濾網配置對教室內空氣傳染風險之即時監測與分析 — Mohamed Mahmoud.....	38
(三)體味作為室內空氣污染物：淨化技術的科學驗證與展望 — Dino Pisaniello...	40
伍、建築科學與政策實務 .....	40
一、澳洲政策實務：從頂層設計到示範計畫 .....	40
(一)維多利亞州「清新室內空氣路徑計畫」的推動實施報告 — Daniel West.....	40
(二) Jason Monty 教授有關室內空氣品質 (IAQ) 管理的實務觀點與政策建議 ....	42
二、標準的在地化挑戰：澳洲 AS 1668.2 的演進與啟示 .....	44
(一) AS 1668.2 與 CO <sub>2</sub> 指標角色：室內空氣品質管理的誤區與制度定位 — Sonia Holzheimer .....	44
(二)解讀新版通風文件 AS 1668.2 — Daniel McCaffrey .....	46
三、 建築設計、施工與維護的 IAQ 風險挑戰 .....	46
(一)安裝不良對於室內空氣品質的影響 — William Lane.....	46
(二)建築環境中的濕氣、黴菌與設計疏失：微小決策的宏觀影響—Shelby Berg...	47
(三)建築外殼熱橋現象：對室內環境品質、能源效率及建築耐久性的影響分析與對策 — Theresa Braunsch .....	48
(四)被動式住宅中抽油煙機選擇對 PM <sub>2.5</sub> 濃度之影響與補充空氣策略分析—Joel Seagren.....	49
(五)分離式空調系統之隱形污染與健康風險 — Panel Discussion .....	50
陸、心得與建議 .....	51

## 壹、計畫目的

為深入研析國際在室內空氣品質（IAQ）管理上的最新典範與科學實證，至澳大利亞參加 2025 室內空氣品質年會(2025 Indoor Air Quality Conference)。國際趨勢已從傳統「被動通風稀釋」的思維，轉向以「主動風險管理」為核心的整合性策略。其關鍵變革包括：一、捨棄單一指標，採「等效潔淨空氣率」(ECAi)等多重技術組合的性能導向管理；二、建立以「危害範式」(Harm Paradigm)為基礎的科學評估框架，聚焦於 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 及甲醛等關鍵風險污染物；三、釐清 CO<sub>2</sub> 僅為通風代理指標，而非健康指標，避免管理失焦；四、研究導入 ATP 生物負載、微生物基因標記等前瞻監測技術可行性，強化清潔與感染控制的科學驗證。針對我國現況提出應將 IAQ 管理貫穿建築全生命週期、推動風險導向分類管理、與國際標準接軌並創造節能雙贏、強化專業人員職能，以及研究啟動本土示範計畫等八項具體政策建議，期能作為我國研修相關法規與推動政策之依據。

## 貳、行程及工作內容概要

日期	工作內容概要
114.05.21~22	啟程，出發至墨爾本
114.05.23	報告設備及會場確認、至墨爾本大學拜訪 Jason Monty 教授，討論室內空品政策
114.05.24	參訪墨爾本南十字車站
114.05.25	參與年會工作坊探討澳洲、美國與歐洲各地通風標準的差異及 800 ppm CO <sub>2</sub> 濃度是否真正適合作為室內空氣品質的基準
114.05.26~27	參與澳大利亞 2025 室內空氣品質年會及口頭報告
114.05.28	參訪 Nightingale Village
114.05.29	返程，回到台北

## 參、管理典範的轉移與制度革新

### 一、為何改變：從公共衛生權到系統性風險的反思

#### (一) 室內空氣傳染風險與制度反思：Patrick Chambers

室內空氣品質 (IAQ) 應被視為建築設計與營運的基本條件，而非在危機後才尋求補救。當前產業對於空氣傳染控制的回應流於形式，過度倚賴單一技術解方，卻忽略了問題的系統性根源。呼籲專業人員應具備完整的知識架構、風險判斷能力與公共責任感，才能真正推動改善。同時批評當前「人人都是專家」的風氣，低估真正專業的價值與角色。

講者反思 COVID-19 疫情中，不僅暴露出建築環境在空氣傳染控制上的嚴重缺陷，也凸顯制度設計與思維模式的僵化。污染控制應從源頭減量、空氣流動機制設計，到保障弱勢族群，全方位納入系統性規劃，而非僅以測量數值或設備安裝作為室內空品政策的治理依據。

社會應將 IAQ 與結構安全並列為建築核心設計目標，並將其視為一項公共財。唯有透過跨領域合作、價值觀重建與責任感驅動，才能真正推動空氣品質管理機制之制度性改革。

#### (二) 無障礙觀點下的 IAQ 政策轉型 Safe Air Project 倡議：Plum Stone

1. **摘要：** Safe Air Project 的人權倡議者 Plum Stone 提出，應重新定位室內空氣品質 (Indoor Air Quality, IAQ) 在公共政策中的角色，將其視為無障礙人權的一環。其主張來自於高風險族群的生活經驗與公共健康挑戰，並透過法律檢視與經濟模型，具體建議將 IAQ 標準納入《澳洲殘疾歧視法》(Australian Disability Discrimination Act 1992) 等核心法規之中，建立具包容性與風險防護力的社會基礎建設。
2. **主張從「環境無障礙」思維重構 IAQ 政策：** Plum Stone 指出，傳染性疾病與空氣品質對健康脆弱族群的影響，常被現行政策與建築設計所忽視。以其個人照護患有囊腫性纖維化與免疫疾病家人的經驗為例，強調通風不良的室內環境對高風險群體構成實質障礙。此觀點延伸出「無障礙環境」(Environmental Accessibility) 的概念，主張應將室內空氣中傳染性與污染性風險，納入無障礙政策評估與法規管理中。並引用世界衛生組織公告內容說明，雖然 COVID-19 的緊急階段已結束，但大流行本身仍在持續。據統計，美國每週仍有超過 300 例與 COVID-19 相關死亡。澳洲各州住院人數亦呈上升趨勢。新變異株 (如 NB1.8.1) 仍被列為持續監控對象。然而，至今仍缺乏具體且前瞻的應變行動計畫，無論是應對當前疫情，或預備下一波傳染病大流行。這強調了一項被長期忽

視的公共政策核心議題：在呼吸傳染疾病成為公共健康挑戰之際，室內空氣品質是否已構成公平、安全與無障礙的基本條件？

**3. 高風險族群覆蓋廣泛，應成為制度設計核心：**根據澳洲統計局數據，「高風險者」並非少數，而是社會的主體

- (1) 每 2 人中就有 1 人至少患有一種慢性健康狀況。
- (2) 16% 的人口年齡超過 65 歲。
- (3) 澳洲全國有 470 萬名兒童。
- (4) 3.8% 的人口為原住民或托雷斯海峽島民。

在此情況下，單靠個人防護並不足以確保健康安全。Plum Stone 主張，應透過制度性調整，將「潔淨空氣」納入社會共融與健康公平的公共政策架構。

**4. 教育與醫療場域具有風險：**在學校方面，澳洲多數校園仍倚賴自然通風，學生可能有感染風險，違背其健康與受教權；而在醫療與長照機構方面，根據《澳洲醫療保健權利憲章》( *Australian Charter of Healthcare Rights* ) 應保障病患獲得安全照護之權益，但數據顯示：

- (1) 2023 年，新南威爾斯州 14% 的 COVID-19 死亡個案是在醫療機構內被感染。
- (2) 在維多利亞州，超過 10% 於院內感染 COVID-19 的患者最終死亡。

Plum Stone 強調，在此類場所中，工程控制(如：高效通風與空氣過濾)應作為基本安全措施之一。

**5. 法規與制度現況之不足：**在職場方面，《工作場所健康與安全法規》( *Model Work Health and Safety Regulations* ) 雖要求提供不危害健康之工作環境，實務上對「通風」的要求多流於形式，欠缺對生物性氣膠污染的具體規範與執行準則。

**6. 經濟效益評估支持 IAQ 政策投入：**根據澳洲國立大學經濟學者 Quentin Grafton、Long Chu 與 Tom Kompas 等人分析，2022 年，長新冠肺炎所造成經濟損失約達 100 億澳元，若納入整體 COVID-19 衝擊，損失估算高達 390 億澳元；模型估算，若透過改善 IAQ 將感染率降低 30% 至 60%，則每年可為澳洲節省 120 億至 240 億澳元，成本效益比可達 1.5 至 3.1，尚未計入其他疾病如流感與哮喘的潛在效益。

**7. 政策建議：**

- (1) 建議修訂《澳洲殘疾歧視法》( *Australian Disability Discrimination Act 1992* )，將空氣品質納入環境無障礙之適用範圍，賦予高風險族群法定保障。
- (2) 建立全國性、可強制執行的 IAQ 標準，涵蓋通風率、過濾等級及污染物濃度上限。
- (3) 優先將標準導入學校、醫療院所、長照機構及大眾運輸系統等高風

險公共場所。

8. 對企業與機構的建議：
  - (1) 鼓勵企業將室內空氣品質納入職業安全與企業社會責任評估範疇。
  - (2) 建議於多元、公平與共融政策中，納入對 IAQ 敏感族群之空間保障措施。
9. 結語：Plum Stone 引用倡議行動常提到的一句話 ”*Nothing about us without us.*”，是時候將因為政策和拖延而受害最深群體的親身經驗，作為決策中心。唯有如此，我們才能真正創造出讓每個人都能安全、健康呼吸的室內環境，這應該是現代化、具韌性且包容的社會中，不可或缺的基礎。

## 二、新一代 IAQ 標準的誕生：風險導向與性能驗證

### (一) ASHRAE Standard 241 與空氣傳播感染控制標準：Dr. Max Sherman

1. 引言：ASHRAE（美國供暖、製冷與空調工程師學會）主導制定的新標準 Standard 241 聚焦於空氣傳播的病原體控制，COVID-19 後全球建築健康與通風設計面臨挑戰。Dr. Max Sherman 從歷史脈絡切入，系統性說明標準的制定背景、核心設計理念及政策意涵，為各國室內空氣品質（IAQ）政策提供技術依據與制度革新參考。
2. 歷史背景與 COVID-19 的催化：人類對空氣傳播疾病認識的演變，從古代的隔絕、中世紀的「瘴氣理論」，到啟蒙時代巴斯德的「細菌理論」以及南丁格爾等人對通風重要性的早期認知。傳統上，通風標準的發展逐漸區分一般空間與醫療場所的需求。COVID-19 大流行成為一個關鍵轉捩點，突顯現有標準在應對大規模空氣傳播疾病上的不足。ASHRAE 迅速成立「流行病特別工作組」（Epidemic Task Force, ETF），發布緊急標準，獲得廣泛關注，並意識到制定更全面、具強制性的空氣傳播感染控制標準的迫切性。
3. ASHRAE Standard 241 的誕生與目標：面對疫情的嚴峻挑戰及白宮的促請，ASHRAE 在極短的 4~6 個月內完成了 Standard 241 制定，並於 2023 年 6 月發布。該標準為降低建築物內空氣傳播風險提供制度化架構與量化依據。其核心特點包括：
  - (1) 適用全建築類型：涵蓋所有建築類型，包括新建、既有、商業及住宅建築，並包含營運和維護。
  - (2) 補強既有 IAQ 標準，防範傳染性氣膠疾病：專注感染控制，建築物仍需遵守 Standard 62.1 等既有 IAQ 標準控制其他污染物，針對傳染性氣膠建立額外防線。
4. Standard 241 的核心概念：
  - (1) 感染風險管理模式 (Infection Risk Management Mode, IRMM)：建築物需「準備就緒」以便在必要時啟動此模式。當啟動 IRMM

時，明確執行加強通風、空氣淨化等措施。是否啟動則交由主管機關、建築業主或契約機制決定。IRMM 設計為彈性應變選項，並非為全天候常設操作，以平衡公共衛生效益與能源成本。

- (2) **等效潔淨空氣率 (Equivalent Clean Air for infectious aerosols, ECAi)**：以「技術中立」的方式定義去除或滅活空氣中病原體的等效潔淨空氣量。可透過增加室外空氣、過濾、消毒、空氣淨化等多種手段達成。標準中對所使用的空氣淨化技術有相應的性能與安全要求。

#### 5. 關鍵指標和計算邏輯：

- (1) 以風險為本的建模：透過蒙地卡羅模擬法，基於可接受風險值計算 ECAi 標準，反映實務中高度變異的病原體傳播條件。
- (2) 人均基準優於換氣次數：標準明確採用「每人每秒公升」(L/s/person) 為 ECAi 核心指標，取代小時換氣次數(Air changes per hour, ACH) 或單位面積換氣量，以解決換氣率忽略人數密度的問題。
- (3) 提供場所別建議值：標準提供了針對不同場所類型（如：辦公室、餐廳、牢房等）的 ECAi 建議值，考量人員密度、活動類型、新陳代謝率等因素。Dr. Sherman 強調，這些數值經過更嚴謹的科學分析，可能與 Lancet 的建議有所不同。

#### 6. 合規性設計與成本控制彈性：標準提供多條合規路徑，避免一刀切措施對既有建築產生過高壓力，實務意涵如下：

- (1) 技術組合靈活：可選擇中央空調升級、便攜式空氣清淨機或加強外氣換氣等組合達到 ECAi 要求。
- (2) 透過人數管理達成 ECAi：辦公場所可透過「人數密度管理」作為達標策略，無需改動既有設施。
- (3) 政策推動需考慮成本效益：以學校案例說明，結合多元技術配置可僅增加 10% 能源成本達成標準，顯著優於單靠增外氣的高耗能方式。

#### 7. 空氣淨化技術的規範 Standard 241 明確要求：

- (1) 性能與安全性需認證：須符合 ASHRAE 52.2 等標準，並由製造商證明過濾效能與安全。
- (2) 防制副產物風險：包含臭氧、顆粒物之排放需符合限值；UVC 等主動技術亦須評估材料反應風險。
- (3) 不同設備之潔淨效率可換算為 ECAi，便於制定績效導向補助或分級制度。

#### 8. 建築整備與維護計畫要求：

- (1) 建築整備與資訊計畫 (Building Readiness and Information Plan, BRIP)：要求建築物提出 BRIP，列出 IRMM 操作流程、責任歸屬、維運頻率、設備評估方式，確保標準可執行。

- (2) 強化運轉期間維護頻率：如濾網更換、空氣清淨機檢修頻率，在 IRMM 期間需加嚴，應納入執法指標與輔導計畫。

## 9. 住宅場所的特別條文：

考量住宅場域無法隔離感染者於住家外，標準有針對住宅的專章，包括設置臨時隔離區域；指導其他家庭成員如何降低風險；與 ASHRAE Standard 62.2 同步發展，擴充住宅 IAQ 條文，有助日後納入住宅建築技術規範或補助基準。

## 10. 標準的持續發展與公共衛生觀點

- (1) 標準修訂：Standard 241 是動態發展的，修訂版刻正公開意見徵詢，內容調整包括新增廁所排氣要求、因應 Standard 185.3（紫外線空氣和表面處理）的發布而移除部分性能要求等。
  - (2) 公共衛生觀點的討論：鑑於 COVID-19 病毒持續傳播及其長期影響，是否應考慮將 IRMM 作為常態運行的基線標準。Dr. Sherman 回應，提高 ECAi 確實能降低風險，但風險無法降至零。將風險降低到何種程度及社會願意為此付出多少成本，是政治經濟學的決策，ASHRAE 的角色是提供技術工具與標準，而非決定社會應接受的風險水平。建築物業主可根據自身情況決定是否長時間運行 IRMM。
11. ASHRAE Standard 241 的核心理念可歸納為兩大原則：一為技術中立性 (Technology Neutrality)，透過等效潔淨空氣率(ECAi)作為量化基準，允許使用通風、過濾、UVGI、空氣清淨等任一或多元組合方式達成性能要求，提升實務彈性與政策可行性。二為風險導向管理(Risk-Based Management)，以「感染風險管理模式(IRMM)」作為應變機制，依據病原體傳播風險與建築用途，由主管機關或場域業主適時啟動加強措施。此雙重架構兼顧公共衛生效益與能源效率，為未來 IAQ 制度提供系統性參考。

## 12. 政策建議

- (1) 採納先進標準：評估將 Standard 241 的核心理念(如：ECAi、IRMM)納入 IAQ 標準或法規的可行性，導入以人均風險管理為主體制度，以提升建築物應對空氣傳播疾病的韌性。
- (2) 強調技術中立與彈性：鼓勵場所結合通風、過濾、紫外線殺菌（常為 UVC 波段）、空氣清淨設備等方式，採用多種技術手段達到 IAQ 目標。
- (3) 重視整備與管理：推動場所建立類似 BRIP 的管理計畫，納入既有公告場所定檢之行政審查流程，確保 IAQ 設施不僅被安裝，更能有效運作和維護。
- (4) 建立高風險場所 IRMM 觸發機制：例如：長照機構、幼兒園、醫療設施，建議研議建立 IRMM 啟動機制與適用場域原則，作為感

染嚴重但無法離開場域時緊急應變手段。

## (二) ASHRAE 241 在澳洲應用：健康、節能與 IAQ 效益：Ben Gill

Ben Gill 認為，改善室內空氣品質（IAQ）與建築物減碳並非對立目標，可結合 ASHRAE 241 標準與 ASHRAE 62.1 附錄 D，實現健康、節能與經濟效益兼顧的三贏局面。

1. **現存問題與實務挑戰：**澳洲商業不動產常忽視 IAQ 對健康的影響，決策仍以成本與碳排為優先。僅靠提高通風量（如達到 4 倍室外空氣換氣率）在現有建物中幾乎不可行，因牽涉高額資本支出與營運成本。
2. **成功案例與數據證據：**墨爾本大學實驗室與阿德萊德醫療設施透過高效過濾（如：MERV 14/HEPA）與設備升級，有效降低懸浮微粒、黴菌與細菌濃度，IAQ 改善超過 90%，同時達成節省 75%~85% 能源，證明 IAQ 與節能可兼得。
3. **推動制度與誘因改革：**
  - (1) 建議調整澳洲國家建築環境評級系統(National Australian Built Environment Rating System, NABERS) 等評等制度，將持續 IAQ 改善列為加分項目。
  - (2) 評估 IAQ 改善與碳排與能源績效之關聯性。
  - (3) 政府應提供稅收減免、補助等財政支持，降低採用先進 IAQ 技術與節能改造的初期投資壓力。
  - (4) 推動產業溝通與設施管理業轉型，建構 ASHRAE 241 合規設計的成本效益模型。
4. **試點示範與資料整合：**
  - (1) 鼓勵在學校、醫院、長照機構等高敏感族群公共場所設立示範點，測量 PM、VOCs、黴菌等 IAQ 指標並連結能耗數據。
  - (2) 建立開放資料平台，整合澳洲本地 IAQ 與節能成效，促進政策、產業與研究對話。
  - (3) 推廣成功案例，加強公眾與業界認知。
5. **政策定位與總結：**提升 IAQ 與減碳應視為相輔相成的政策目標。澳洲政府若能積極採納 ASHRAE 241 原則，搭配明確政策導引與財政誘因，不僅能保障公眾健康，也可推動建築部門綠色轉型，幫助實現 2030 年及更長期的氣候目標。

## (三) CO<sub>2</sub> 作為 IAQ 代理指標的科學基礎與政策建議：Lydia Morawska

1. **CO<sub>2</sub> 作為 IAQ 代理指標之科學基礎與務實性：**考量目前即時監測所有污染物與病原體的技術尚未普及，CO<sub>2</sub> 作為人體代謝產物，可有效反映人員

密度與通風效能。評估工具的關鍵在於能否推動改善，CO<sub>2</sub> 監測在預警通風不足與推動改善措施方面，具有不可取代的實務價值。然而 CO<sub>2</sub> 作為室內空氣品質 (IAQ) 管理指標，存在限制：

- (1) 在非極高濃度下，CO<sub>2</sub> 對健康的直接生理影響相對有限；
- (2) 作為通風代理指標，易受及時波動與使用行為影響；
- (3) 當缺乏感染來源時，CO<sub>2</sub> 濃度難以直接對應感染風險。

## 2. IAQ 管理層級：健康指引、國家標準與性能要求

- (1) 健康指引 (如：World Health Organization's Air quality guidelines, AQG 2021)：基於暴露與反應關係之健康保護建議值。
- (2) 國家標準 (強制性法規)：除健康考量外，尚需納入測量可行性、法規遵從性、經濟成本等現實要素，故其限值常較 WHO 指引寬鬆。另需有標準方法才能頒布標準。
- (3) 性能要求：強調結果導向，透過可量測指標評估 IAQ 實際表現，並驅動改善。

## 3. 室內 IAQ 管理挑戰與性能標準之必要性：相較於室外空氣品質具備成熟監測網與管制標準，室內 IAQ 管理面臨空間異質性高、合規監測儀器成本昂貴、病原體缺乏即時監測技術等。現行建築法規多偏重設計符合性，缺乏對實際 IAQ 的評估。呼籲建立以 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 及 CO 等關鍵污染物為核心的 IAQ 標準，作為保障民眾健康及政策介入之基礎。實證研究亦顯示改善 IAQ 具顯著成本效益。

## 4. IAQ 標準框架：Morawska 教授團隊提出之 IAQ 標準框架，建議監測 PM<sub>2.5</sub>(基於 WHO 指引調整為短時暴露均值)、CO(基於 WHO 指引) 及 CO<sub>2</sub>。800 ppm CO<sub>2</sub> 建議值，基於特定風險評估情境 (模擬含一名 Delta 變種病毒感染者之教室，以 R<sub>0</sub><1 為通風目標) 推導而來。核心價值在於科學推導方法學，而非絕對數值。各國應依自身條件 (如：建築特性、氣候、主要病原體等) 進行本土化風險評估，訂定合適基準。

## 5. 政策推動策略：

- (1) 短期：提升公眾認知；進行大規模 IAQ 現況普查；優先建立 CO<sub>2</sub> 等污染物之指引；推廣應用低成本 IAQ 感測器。
- (2) 中期：針對學校、醫療機構等特定公共場所，研議引入強制性 IAQ 法規；強化建築設計、建造及營運階段的 IAQ 整合管理。
- (3) 長期：將 IAQ 要求全面納入建築法規、永續建築評估體系及都市治理框架，並考量氣候變遷調適與能源效率。

## 6. 政策建議：

- (1) 確立 CO<sub>2</sub> 之 IAQ 代理指標地位：肯定 CO<sub>2</sub> 在現行技術條件下，作為評估室內通風換氣與人員密度之關鍵代理指標，並用於啟動相應管理措施。
- (2) 發展本土化 IAQ 標準：整合我國建築、氣候、場所用途及公共衛

生需求，發展適用於臺灣各類場所之 IAQ 標準或分級管理指引。  
800 ppm CO<sub>2</sub> 可作為重要參考點之一，但非唯一依據。

- (3) 採「性能導向」分階段推動 IAQ 標準：
  - a. 短期評估「室內空氣品質管理法」，強化 CO<sub>2</sub> 等指標之監測與通報機制，擴大公告場所類型，並加強宣導及輔導改善。鼓勵運用智慧感測技術提升管理效能。
  - b. 中長期則研議將 IAQ 標準要求納入新建物及既有建物改善之相關建築技術規則或評估系統，並與節能減碳政策協同。
- (4) 整合多元改善技術與措施：政策應鼓勵通風改善、源頭控制、空氣淨化技術（如：高效過濾、紫外線殺菌）等多元手段之整合應用，並提供各類場所 IAQ 改善之技術指引。
- (5) 強化跨部會協作：IAQ 管理涉及多部會，應加強橫向聯繫與資源整合，共同提升我國室內空氣品質。

#### (四) WELL 標準與 IAQ 健康性能驗證：Jack Nunan

1. WELL 是一套以科學實證為基礎的標準，**核心目標是將建築空間轉化為促進人類健康與福祉的工具**。並非僅作設計建議，而是透過嚴謹的機制來驗證並確保建築能長期提供健康的室內環境。WELL 標準的獨特性展現在多層次的認證與管理流程中：
  - (1) 基礎門檻與追求卓越的雙軌結構：
    - a. 先決條件 (Preconditions)：認證的強制性基礎，是所有專案不分等級都必須達成的最低健康性能門檻。
    - b. 優化項目 (Optimizations)：專案可藉由達成這些選擇性的加分項目，挑戰更高認證等級（銅級至白金級），展現其在健康建築領域的卓越領導力。
  - (2) 性能結果導向的現場驗證 (Performance Verification)：為 WELL 的最終驗證環節，也是其與設計導向標準最大區別之處。所有專案都必須在完工且人員進駐後，由第三方專業人員進行現場實測，涵蓋空氣、水、光、聲學等面向。唯有實際數據達標，才能證明設計已成功轉化為真實的健康效益。
  - (3) 確保長期效益的持續性管理：WELL 認證並非一次性的。為維持有效性，專案必須在三年有效期內，提交年度性能數據（如：空氣品質報告），並在期滿後重新認證，以保證建築內長期、持續性健康營運。
2. 「空氣」概念的科學實踐與關鍵指標：透過多層次策略，全面降低使用者面臨的室內空氣污染物威脅。
  - (1) 基礎防線：強制性，為確保最基本的呼吸健康，所有專案必須滿足以下要求：

- a. A01 基礎空氣品質：設定關鍵污染物的嚴格限值。
    - i 懸浮微粒： $PM_{2.5} \leq 15 \mu g/m^3$ ； $PM_{10} \leq 50 \mu g/m^3$ 。
    - ii 揮發性有機化合物 (VOCs)：嚴格管制甲醛、苯、甲苯等多種高風險物質的濃度。
    - iii 其他氣體：監控一氧化碳、臭氧及氫氣等潛在威脅。
  - b. A02 無菸環境：徹底執行室內無菸政策，源頭杜絕二手菸危害。
  - c. A03 通風效率：確保新鮮空氣的供應量符合 ASHRAE 62.1 等國際公認的通風標準。
  - d. A04 施工污染管理：在建造過程中採取防護措施，避免粉塵與污染物殘留於室內及通風系統中。
- (2) 進階策略：選擇性優化項
- a. 暖通空調系統 (HVAC) 的多層次防禦：
    - i 高效過濾 (Filtration)：採用 MERV 13 或更高等級的濾網，高效捕捉細懸浮微粒。
    - ii 微生物控制 (Microbe Control)：在冷卻盤管等潮濕區域安裝紫 UVC，主動抑制黴菌與細菌滋生。
    - iii 增強通風 (Enhanced Ventilation)：導入基於 ASHRAE 241 等先進標準的傳染病風險管理策略，在必要時提升換氣量以稀釋病原體濃度。
  - b. 數據監測與資訊透明化 (Monitoring & Awareness)：安裝連續空氣品質監測系統，並將即時 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 數據公開展示給使用者。賦予使用者知的權利，更能建立其對建築管理的信任感。
3. 整體性策略與市場價值
- (1) 源頭管理 (Source Control)：WELL 強調跨概念的整合策略。如：要求選用低揮發性的健康建材與傢俱，從源頭上減少室內污染物的釋放，與「空氣」概念形成互補，達成治標也治本效果。
  - (2) 轉化為可衡量的資產：
    - a. ESG 績效：WELL 為企業在 ESG 報告中的「S(社會)」面向，提供了強而有力的第三方績效證明。
    - b. 投資回報：澳洲研究數據發現，WELL 認證能顯著提升使用者在空氣品質、工作滿意度與健康方面的體驗，直接關係到企業吸引與留住頂尖人才的能力，並最終轉化為生產力與商業價值。

### 三、危害範式(Harm Paradigm)與 IAQ 健康風險量化

#### (一) 室內空氣品質新典範：從傳統通風到量化危害風險評估之應用—Dr. Max Sherman

傳統 IAQ 管理多依賴間接的通風率指標，其標準制定歷程多變，且缺乏對

多種污染物綜合健康效應的直接評估。**Sherman** 提出以「失能調整生命年」(DALYs)為核心的量化風險評估方法，藉此建立污染物濃度與其「危害強度」(Harm Intensity)之間的關聯性。分析結果顯示，在住宅室內環境中，總體慢性健康危害的貢獻度高度集中，主要由懸浮微粒(PM<sub>2.5</sub>)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)及甲醛(Formaldehyde)三種污染物主導，合計佔總健康負擔約九成。此發現挑戰了傳統上對總揮發性有機物(TVOC)等綜合指標的依賴。闡述危害範式如何應用於ASHRAE 62.2 修訂草案，其提出的雙軌制程序，不僅為傳統 IAQ 管理提供了科學解方與成本效益路徑，更為未來的環境健康政策奠定了重要基礎。

通風的概念源遠流長，最早的實踐者可追溯至自然界的群居昆蟲。白蟻透過建構複雜的蟻丘作被動式通風系統，精確調控巢穴內的溫濕度與氣體濃度；蜜蜂則採用機械式通風，以煽動翅膀產生氣流。生物本能揭露通風對維持特定環境的關鍵作用。人類對通風的需求始於用火。自古以來，從洞穴居所的簡易排煙道、古米諾斯文明的精巧建築設計，乃至古埃及的通風井，皆顯示出早期文明對排除燃燒產物、改善居住環境的認知。進入工業時代，健康考量變得更加明確，17世紀的英國已開始立法規範窗戶的設置；礦坑作業中，通風系統更是攸關生死的必要設施。這些歷史實踐雖奠定了通風科學的基礎，但也因缺乏統一的科學量尺，使其成效始終停留在經驗層面，從而開啟了現代通風標準化的漫長進程。

現代通風標準的制定始於19世紀，最初的動機為公共衛生與傳染病控制。南丁格爾(Florence Nightingale)等人主張高通風率以稀釋病原，此觀念主導了20世紀初的標準。隨著衛生條件改善，20世紀中葉，標準的焦點轉向「氣味控制」，通風率也因此大幅下修。此後，ASHRAE 62 標準歷經多次修訂，逐漸確立了以「可接受的室內空氣品質」為核心目標，其定義包含「健康危害」與「主觀可接受性」兩個層面，主觀可接受性著重感官感受，健康危害則以毒理與流病資料為依據。

儘管歷經百年演進，現行通風標準在科學實踐上仍面臨兩大根本性挑戰：

1. 間接路徑的侷限：標準多採「規定最低通風率」的間接方法，而非直接針對室內實際的污染物濃度與來源進行處理，導致通風效率與健康效益之間缺乏直接關聯。
2. 單一限值的盲點：採用「單一污染物、單一限值」的方法，無法評估多種污染物共暴露下的健康效應，且各國限值因政治經濟考量而異，缺乏一致的健康風險基礎。

為克服傳統方法的侷限，以「危害範式」作為 IAQ 評估的新框架，其核心是將不同污染物對健康的影響，轉化為可量化、可比較的統一指標。

1. **失能調整生命年 (DALYs)**：採用世界衛生組織廣泛使用的「失能調整生命年」作為健康危害的量化單位。DALYs 綜合了因疾病導致的「失能」與「早逝」所損失的健康生命年。藉由此指標，可將不同來源（如交通事故、吸菸、污染物暴露）的健康負擔進行比較。
2. **危害強度與總危害評估**：總健康危害( $H_{total}$ )被定義為各污染物濃度( $C_i$ )

與其固有危害強度 ( $I_i$ ) 之乘積的總和：

$$H_{\text{total}} = \sum_i (C_i \times I_i)$$

其中，「危害強度」是基於毒理學與流行病學數據計算而得的、特定於每種污染物的參數，代表單位濃度該污染物所能造成的 DALYs。

3. **危害貢獻分析與關鍵污染物鑑別：**透過對 45 種常見室內污染物的危害強度及其普遍濃度進行分析，研究得出以下結論：
  - a. **主要污染物貢獻：**總體慢性健康危害的貢獻高度集中。懸浮微粒 (PM<sub>2.5</sub>)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)及甲醛(Formaldehyde)合計占總健康負擔約九成，其中 PM<sub>2.5</sub> 單獨貢獻近三分之二。<sup>1</sup>
  - b. **區域性污染物：**臭氧與氫氣等污染物，僅在特定條件下（都會區或特定地質環境）具重要性，其在整體平均危害中的佔比較低。
  - c. **TVOC 概念重構：**揮發性有機物(VOCs)的危害強度差異可達數個數量級，如：高濃度乙醇的危害遠低於低濃度的六價鉻。因此，將所有 VOCs 濃度加總為總揮發性有機物作為單一指標，其科學基礎薄弱且可能嚴重誤導風險判斷。<sup>2</sup>

根據分析，典型住宅的平均 IAQ 健康負擔約為每十萬人年 2,200 DALYs，其危害程度與吸菸造成的全國平均健康負擔相當。

危害範式為修訂通風標準提供了科學依據。在 ASHRAE 62.2（住宅通風標準）的修訂草案中，已提出一個基於此範式的全新程序。此雙軌制程序立基於兩大互補原則：一為處理主觀感知的「舒適性原則」，二為處理客觀風險的「健康保護原則」。

1. **氣味控制（舒適性原則）**
  - a. **目標：**控制人體體味等引起不適的氣味。
  - b. **方法：**要求最低室外氣通風量須達到每人 3.5 L/s。CO<sub>2</sub> 濃度（約對應 1600 ppm）並非健康危害指標，而是作為人體生物性污染物（Bioeffluents）的簡易替代指標（Proxy），用以判斷通風量對於稀釋此類污染物的充足性。
2. **危害預算（健康保護原則）**
  - a. **目標：**將關鍵污染物造成的總健康危害控制在可接受範圍內。
  - b. **方法：**建立一個基於 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 和甲醛三種關鍵污染物的「危害限值方程式」。設計者需證明其建築設計能使這三種污染物的加權總危害值低於目標值。此方法提供了極大的設計彈性，鼓勵業界採用強化過濾、源頭控制等更多元的策略。

為有效保障國民健康，室內空氣品質管理策略必須進行典範轉移—從遵循傳統の間接通風指標，邁向一個以量化健康風險為基礎的科學實踐新時代。「危害

<sup>1</sup> 本分析聚焦於慢性健康危害，故未納入主要造成急性危害的污染物，如一氧化碳 (CO)。

<sup>2</sup> 解釋為何市售 TVOC 感測器雖可作為特定污染事件的「異常偵測」工具，卻不適合作為評估整體空氣品質優劣的指標。

範式」及其 DALYs 工具，使我們能夠首次以統一的尺度評估並管理來自多種污染物的綜合健康衝擊。研究明確指出 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 與甲醛是住宅室內環境最主要的慢性健康危害來源，此結論為未來的法規制定、建築設計與產品開發提供了清晰的優先次序。此一轉變，將引導建築與產業界的創新方向，從過去依賴通風進行「被動稀釋」的單一策略，轉向包含低逸散建材、高效過濾與智慧感測的「主動式源頭控制與整合性淨化」之多元策略，為實現更健康、更永續的室內環境開創了新的可能性。

若將危害範式應用於臺灣仍需要進一步的研究支持：

1. **本土化數據建置**：報告引用的危害數據多基於國際研究。針對台灣的氣候、建築、生活型態進行大規模調查，建立本土的污染物濃度基線與「危害強度」參數，以確保風險評估的準確性。
2. **污染物協同效應研究**：目前的總危害評估模型為相加計算，尚未考慮多重污染物之間可能存在的加乘或拮抗作用。此為未來毒理學與環境醫學研究的重要方向。
3. **監測技術與成本**：低成本、穩定可靠的即時感測器仍是普及化的瓶頸。未來需投入更多資源於相關技術的研發與驗證。
4. **法規與應用範疇擴展**：如何將危害範式從住宅擴展至我國法規所轄的各類公眾場所，並設定符合國情的「可接受風險水準」(DALYs 目標值)，將是政策制定上的一大挑戰。

#### 四、IAQ 的智慧治理：從數據驅動到目標導向

##### (一) 智慧建築資料導向的 IAQ 維運策略：Kourtney Null

1. **摘要**：隨著全球建築管理朝向永續與智慧化發展，IAQ 已成為衡量建築效能與使用者福祉的關鍵指標。傳統以能源效率為單一主軸的暖通空調維運模式，已難以滿足現代建築對健康環境與可預測性維運成效的整合性需求。如何透過資料導向維運 (Data-driven Maintenance, DDM)，有效整合 IAQ、永續與合規，並從中找出可行的管理轉型建議。傳統 HVAC 維護著重於設備的「點狀檢修」，而資料導向維運則轉向對整體環境的「全時監測」與「根因分析」，更符合高動態、自動化調控的現代建築需求。室內空氣品質不再是附屬品，而是與能源效率、永續指標並列的核心績效指標。其表現直接影響租戶滿意度、人員生產力，並最終反映在物業的資產價值上。
2. **傳統為戶與資料導向維運比較**：

評估面向	傳統維護	資料導向維運 (DDM)
資料可視性	約 0.006% (週期性、片面)	100% (即時、全面)
維運模式	被動反應、故障後修復	主動預測、預防性介入
決策基礎	預設排程、人為判斷	基於即時數據與智慧分析

人機關係	人力主導，工具輔助	人機協作，數據賦能
------	-----------	-----------

3. **資料導向維運 (DDM) 效益包含：** IAQ 與節能常被視為權衡取捨，但資料驅動的策略將其轉化為創造價值的「機會」。
  - (1) 提升數據透明度：建立可追溯的 IAQ 管理基線，支持永續建築評等（如：NABERS, WELL）。
  - (2) 優化風險管理：自動辨識劣化趨勢，從「被動報修」轉為「主動預防」。
  - (3) 提升營運效率：透過即時派工與快速診斷，提升技術人員的工作價值與服務品質。
4. **案例說明：**
  - (1) 案例一：墨爾本 CBD 混合用途建築群：該建築群擁有超過 1,000 個可變風量系統，導入 DDM 系統後，在 18 個月內執行了 550 筆以上由數據驅動的維護任務。系統解決 VAV 洩漏、閥門故障及感測器失靈等過去難以追蹤的問題，其儀表板更整合了熱舒適度、IAQ 指標與任務數據，為資產管理者提供了清晰的決策依據。
  - (2) 案例二：布里斯本高樓辦公室，資料整合分析發現單一控制策略的盲點。原先為節能優化冷水系統，反而導致建築在高濕度月份長期處於相對濕度 >60% 的狀態，增加黴菌滋生風險。證明監測多變項交互作用的重要性。
5. **DDM 並非要取代人力，而是賦權前線人員。成功模式具備以下特點：**
  - (1) 賦權與參與：邀請技術人員參與系統設計，確保流程的實用性，並提升其專業價值感。
  - (2) 建立回饋循環 (Feedback Loop)：技術人員的現場操作與標註，成為持續訓練機器學習模型的重要數據，讓系統決策越來越精準。
  - (3) 數據作為工具：數據不僅用於「智慧派工」，也成為「績效驗證」的客觀工具，讓優質服務得以量化。
6. **策略建議：**
  - (1) 將 IAQ 管理常態化：推動 IAQ 指標納入建築日常營運的標準作業流程，與能源、水資源管理同等重要。
  - (2) 建立智慧維運標準：鼓勵公私部門建立「持續性維護績效指標」，引導市場從投資硬體轉向投資數據應用與服務品質。
  - (3) 促進生態系協作：建立由技術人員、設施管理者、業主共同參與的 IAQ 治理框架，促進「共同設計、共同負責」的產業文化。
7. **Kourtney Null 呼籲：**「是時候停止只在維護系統，我們要開始管理環境。」唯有將室內空氣品質視為建築營運的核心價值，並透過資料導向的思維導入持續優化的機制，才能真正實現健康、永續與高效能的智慧建築環境。

## (二) IAQ 評估策略與制度挑戰：Jeremy Stamos

1. **摘要：** IAQ 管理應依照具體目標選擇正確策略。「執行了某些測量，並不代表空氣品質合格」，盲目依賴儀器或抽樣數據，反而產生虛假的安全感。真正有效的 IAQ 管理，需仰賴調查者對建築結構、空調系統與污染動態的深入理解，以問題解決為導向出發。

### 2. IAQ 管理三大策略比較：

方法類型	目的	優點	限制與風險
事件調查 (Incident Investigations)	回應異味、投訴或健康問題	能有效找出污染源並解決實際問題	成功仰賴調查者的建築知識與診斷能力
定期評估 (Periodic Assessments)	滿足合約、法規或例行審查要求	遇異常可即時發現	多數時候代表性低、效益差、誤導性高
連續監測 (Continuous Monitoring)	透過低成本感測器持續追蹤污染趨勢	可偵測間歇事件，支持趨勢分析與警報反應	受限於感測器種類、解析度與部署策略不明確

### 3. 實務觀察與案例警示：

- (1) 「空氣從哪裡來，往哪裡去？」一氣流路徑追蹤是調查關鍵。Stamos 以實例說明：如誤設的排氣管導致餐廳進氣口引入臭氣，問題的根本皆在於建築知識與現場觀察，而非單靠儀器偵測。
- (2) 定期評估之失效案例：某熱帶地區建築因 CO<sub>2</sub> 測得 1000 ppm 即被建議增加通風、降至 800 ppm，結果導致濕度失控、黴菌滋生，反而造成更大健康風險。顯示僅憑片段數據作決策極具風險。
- (3) 連續監測的潛在誤判：香水濃度觸發 VOC 警報、無 HEPA 過濾的背負式吸塵器導致 PM<sub>2.5</sub> 異常飆高。感測器部署位置距離污染源太遠。

### 4. 制度性問題與結構性挑戰：

- (1) 數據 ≠ 品質：測到 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、TVOC 並不等於了解污染「成因」與「風險」。
- (2) 標準缺位：感測器應如何佈點？多少密度？多久更換？目前業界仍缺乏共識。
- (3) 人才落差：「IAQ 評估」執行者並不具備 HVAC 與建築整體認知，難以進行跨系統問題診斷。
- (4) 合約導向壓過風險導向：年度 IAQ 測量報告流於形式，為報告而測，不問為何而測。

## 5. 政策與技術建議：

- (1) 將 IAQ 管理納入「目標導向型治理」：評估前應明確此次監測欲解決何種問題？而非套用制式清單。
  - (2) 推動 IAQ 調查人員專業認證制度：要求具備建築通風、空氣動力學與污染物行為之基本知識。
  - (3) 建置實證導向的連續監測架構：包含：感測器精度要求、校正機制、放置與數據解讀準則。
  - (4) 推行多部門合作機制：IAQ 應整合建築、能源、健康、維運部門，建立治理責任與通報機制。
  - (5) 建立「良好 IAQ」共識與公信標準：不僅止於「合格」，而應推動以健康與舒適為核心的指標架構。
6. 結論：IAQ 管理的未來，不在於「測得更多」，而在於「解決得更準」。唯有從專業、系統與場域出發，逐步建立目標導向與實務連結的 IAQ 管理體系，才能真正保護建築使用者的健康與安全。

## 肆、關鍵污染物監測與前瞻技術

### 一、虛構案例解析：IAQ 監測複雜性與風險驗證

#### (一) 先進 IAQ 監測技術與風險評估應用：Dr Claire Bird

IAQ 是影響健康、舒適與生產力的關鍵因素，隨著建築密閉性提高與氣候變遷、新興病原體等環境挑戰日益嚴峻，傳統 IAQ 監測與管理方式已面臨重大考驗。透過專家提出的虛構案例，揭示錯誤或不足的監測如何導致森林大火、交叉感染、水損後微生物污染等多重風險被低估，凸顯精準監測對標準制定、風險管理與公共衛生防護的重要性。案例深入分析傳統監測方法（如：單點 CO<sub>2</sub> 感測器或培養法）的侷限，並強調整合多參數感測、分子生物技術（如：qPCR 與基因組定序）與數據驅動策略的必要性。IAQ 管理應從依賴被動監測的合規導向，轉型為可驗證、可預警的風險驗證框架，以因應日益複雜的室內環境風險。

為具體說明 IAQ 風險的複雜性，以一則虛構案例進行情境分析，描述機械工程師 Jack 與機械承包商 Jill 在同一棟建築物內所遭遇的不同風險。

#### 1. 情境一：複合性空氣污染事件——森林大火與病原體暴露

Jack 是一名氣喘患者。某日因室外森林大火，導致環境中 PM<sub>2.5</sub> 濃度急遽升高。辦公室的設施管理人員關閉了建築外氣進風口以阻擋污染物，卻忽略在密閉條件下，室內污染物（如：人體呼出的 CO<sub>2</sub> 與生物氣膠）會迅速累積。此情境突顯了以下問題：

- (1) 監測失效：建築物僅依賴一個安裝於天花板死角且未經校準的 CO<sub>2</sub> 感測器。由於 CO<sub>2</sub> 密度大於空氣，其讀數無法反映人員呼吸區的真實濃度，導致通風不足的風險被嚴重低估。

- (2) 交叉感染風險：單點、失準的監測系統，不僅提供錯誤的安全感，更是導致 Jack 在密閉空間中交叉感染的直接原因。
  - (3) 標準應用的不足：儘管 ASHRAE 241 等標準已提出「等效潔淨空氣率」的概念，但該公司並未在關閉外氣後，啟動輔助空氣淨化設備以彌補通風量的不足。顯示標準雖已存在，但實際應用與應變能力仍有待加強。
2. 情境二：水損後微生物污染風險
- Jill 在一處兩週前曾發生水災的地下室進行空調箱維修。儘管該區域已完成表面修復，但其成效與潛在的微生物風險充滿不確定性。此情境揭示了傳統培養法的誤判，若僅採用傳統的大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 培養法作為污水污染指標，可能產生兩種誤導性結果：
- (1) 偽陽性：環境中存在非人類來源的大腸桿菌，因而削弱了其作為人類污水指標的特異性。
  - (2) 偽陰性：許多環境微生物處於可生存但不可培養狀態 (Viable but Non-Culturable, VBNC) 狀態，在標準方法培養基上無法生長，從而導致風險被錯過。例如：艱難梭菌 (*Clostridium difficile*) 的孢子能在環境中存活數月，遠比大腸桿菌更持久。
- 如利用分子生物學方法的優勢：採用 qPCR 技術檢測人類腸道中高豐度的特定標記物，如：擬桿菌 (*Bacteroides*) 與高豐度存在的噬菌體 (Cross-Assembly Phage, crAssphage) 病毒，可提供更準確、更具特異性的人類污水污染評估。透過比對現場樣本與原始污水的標記物拷貝數，可量化修復成效，為雇主提供更可靠的安全依據。
3. 情境三：院內感染與抗藥性問題，Jack 與 Jill 後續皆因併發症入住加護病房，並不幸遭遇院內感染。此情境進一步延伸了 IAQ 的風險範疇：
- (1) 環境病原體庫：醫院環境中的灰塵、地毯及 HVAC 系統是病原體（如：麴菌 *Aspergillus*、青黴菌 *Penicillium*）與抗微生物藥物抗性 (Antimicrobial Resistance, AMR) 基因的儲藏庫。不當的清潔方式（如：使用未配備高效濾網的吸塵器）可能導致污染物再懸浮，引發二次感染。
  - (2) 主動環境監測的必要性：應對院內感染，需要從被動治療轉向主動環境監測。可定期檢測 HVAC 系統風管、濾網及地面灰塵，利用 qPCR 或基因組定序技術，不僅能識別特定高風險病原體，還能監測 AMR 基因的傳播，為感染控制提供預警。
  - (3) 污水監測的公共衛生價值：如同在 COVID-19 疫情期間的應用，對建築或社區的污水進行定期監測，可作為追蹤特定病原體傳播趨勢的早期預警系統，為公共衛生部門與建築管理者提供提前一至兩週的應變時間。
4. 先進監測技術與方法學探討：

- (1) 化學污染物監測：
    - a. 感測器選擇：低成本感測器適用於趨勢監測，但準確性有限。光離子化偵測器(PID)與火焰離子化偵測器(FID)提供更高靈敏度，但功能各異。例如：PID 需選用正確能量的燈管才能有效檢測甲醛 (11.7 eV) 等低電離能化合物；FID 雖能檢測半揮發性有機物，卻對氧化態的揮發性有機物不敏感。
    - b. 黃金標準：氣相層析質譜儀 (GC-MS) 仍是實驗室分析的黃金標準，能提供最精確的定性與定量結果。被動式採樣器則適用於無干擾的長期平均濃度監測。
    - c. 整合判斷：同時監測 PM<sub>2.5</sub>、CO 與 NO<sub>x</sub> 等多種燃燒副產品，有助於準確判斷污染來源。
  - (2) 生物氣膠與微生物監測：IAQ 評估應擺脫對傳統培養法的過度依賴，積極納入 qPCR 與 DNA 定序等分子技術。qPCR 可快速、高靈敏度地檢測特定微生物標記，即使其 DNA 來自非活體細胞，仍可作為污染殘留的有效指標。DNA 定序能提供微生物群落結構的全貌，有助於理解環境生態的變化。
5. 風險管理策略與整合性政策建議：為將風險管理從被動應對提升至主動預防，並強化建築環境韌性，提出涵蓋「法規標準」、「實踐驗證」與「技術創新」三個層面的整合性策略：
- (1) 完善標準與法規 (Standards & Regulations)：建立清晰、可執行的規範，作為所有實務工作的基礎。
    - a. 修訂建築技術規範：應將濕度控制、微生物風險預警機制及針對森林火災等極端氣候事件的應變設計，正式納入建築技術規範。
    - b. 建立災後驗證標準：制定針對水患、火災煙燻或黴菌污染事件後的環境恢復驗證標準，內容需包含特定污染物（如：微生物 DNA）的定量指標。
    - c. 訂定設備性能門檻：為室內空氣品質監測儀器訂定最小性能標準、校準要求與保養週期，以確保數據的品質與可靠性。
  - (2) 強化實踐與驗證流程 (Practice & Verification)：將「標準」轉化為「行動」，確保風險管理的有效落地。
    - a. 確立「驗證優於通風」原則：管理的核心應從「遵循設計」轉向「驗證成效」。所有管理措施皆須透過科學監測數據來確認其有效性。
    - b. 結合數據與維護記錄：有效的 IAQ 風險評估，必須結合「量測數據」與「管理行為」進行判斷，而詳實的維護履歷（如濾網更換、水患處理）即是此評估的基礎。
    - c. 建立人員專業門檻與訓練：應為 IAQ 相關承包商、實驗室及

認證機構設定最低專業標準，並對第一線操作人員提供個人防護具使用與風險辨識之必要訓練。

- (3) 推動技術整合與創新應用 (Technology & Innovation)：透過先進技術，提升監測的精度、廣度與預警能力。
  - a. 強化監測策略與數據判讀：
    - i. 感測器的配置須考量空間氣流、污染物特性與人員活動熱區，並佈署於合適位置與高度，以避免數據誤判。
    - ii. 建議採用多參數監測策略，同步比對 CO<sub>2</sub> (通風指標)、PM<sub>2.5</sub> (微粒指標)、CO、NO<sub>x</sub> (燃燒指標) 等數據，以提升污染來源的判斷精度。
  - b. 活化既有設施作為監測載體：
    - i. 空調濾網：可作為長期、整合性的污染物累積採樣點，用以分析環境變化趨勢。
    - ii. 建築污水：定期監測廢水中的病毒或微生物指標，可作為社區或大型建築感染風險的早期預警系統。
  - c. 開發智慧型回饋整合系統：鼓勵開發能與建築管理系統 (BMS) 連動的智慧型 IAQ 感測與回饋機制，實現自動化、即時性的風險調控。
6. 結語：安全的室內空氣品質並非偶然，而是科學設計、精準監測與嚴格執行的必然成果。面對日益複雜的環境挑戰，管理思維必須從「符合標準」的被動管理，升級為「驗證安全」的主動策略，從而實現數據驅動的精準風險控制。

## 二、傳統 IAQ 指標之再檢視：CO<sub>2</sub> 與相對濕度

### (一) 室內 CO<sub>2</sub> 指標的應用與迷思解析：Andrew Persily

1. 核心概念與常見迷思：二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 因其與人體活動的直接關聯，已成為評估建築通風的常用工具。人體是室內最主要的 CO<sub>2</sub> 來源，其產生速率與活動量成正比，使 CO<sub>2</sub> 成為一個穩定、易於測量的「人體活動標記物」及示蹤氣體。

**圍繞著 CO<sub>2</sub> 存在著幾個關鍵誤解：**

- (1) CO<sub>2</sub> 是普適性的室內空氣品質 (IAQ) 指標。事實上，它無法代表來自建材的 VOCs、來自土壤的氬氣或室外污染源。
- (2) 濃度低於 1000 ppm 即代表空氣品質良好或符合 ASHRAE 標準。這是對標準的片面解讀，此數值更多是歷史上與「體味可接受度」相關的通風參考，而非健康限值。
- (3) 高於 1000 ppm 的 CO<sub>2</sub> 濃度會直接危害健康與認知。科學證據不一致且不充分，常見室內濃度遠低於職業安全衛生所訂定的暴露限值 (8 小時平均 5000 ppm)。高 CO<sub>2</sub> 環境所引發的不適症狀，主因通

常是「通風不足」導致各類室內污染物累積，而非 CO<sub>2</sub>本身的直接毒性。

## 2. CO<sub>2</sub> 的主要應用集中在通風管理與侷限性

- (1) **需求控制通風 (Demand Control Ventilation, DCV):** 這是 CO<sub>2</sub>最成熟的應用。系統透過監測 CO<sub>2</sub>濃度來判斷室內實際人數，並自動調節引入的室外風量，以滿足人均通風需求。此技術能有效應用於會議室、禮堂等使用模式多變的空間，避免通風不足或過度通風造成的能源浪費。
- (2) **短期評估工具:** 可用於初步評估通風狀況、估算換氣率，或作為篩選空氣傳播高風險空間的輔助指標。但執行者需充分理解其數據解讀的限制。
- (3) **作為 IAQ 指標的侷限性:** CO<sub>2</sub>僅能間接反映與「人」相關的污染物（如：生物氣膠、體味）的稀釋程度。因此，CO<sub>2</sub>濃度低不等於整體 IAQ 良好，兩者關係可能因淨化設備、室外污染源等因素而呈現脫鉤甚至反向的變化。

## 3. CO<sub>2</sub> 對人體的影響：從體感到感染風險

- (1) **健康與認知:** 一般室內 CO<sub>2</sub>濃度對健康的直接影響微乎其微。部分研究指出在約 1000 ppm 時可能對決策能力有輕微影響，但結果尚未有一致性結論，仍需更多研究支持。高 CO<sub>2</sub>濃度與病態建築症候群的關聯，主要歸因於通風不足。
- (2) **體味感知:** CO<sub>2</sub>濃度與人體氣味的感知強度有顯著關聯。早期研究發現，為使多數人能接受室內體味水平，約需每人每秒 7-9 公升的潔淨空氣，換算後的 CO<sub>2</sub>濃度約比室外高出 700 ppm，是 1000 ppm 參考值的歷史淵源，它反映的是「體味可接受度」，而非健康基準。
- (3) **空氣傳播感染風險:** CO<sub>2</sub>可作為評估「再呼吸空氣」比例的指標，即空間中已被他人呼出的空氣份額。理論上，此空氣可能含有病原體。因此，監測 CO<sub>2</sub>可作為一種定性工具，用於初步篩選通風不良的高風險空間（如：疫情期間建議的 800 ppm）。但必須注意，CO<sub>2</sub>與傳染性氣膠在環境中的行為模式截然不同，後者會受過濾、沉降、紫外線等因素影響而被清除，兩者不可混為一談。

## 4. CO<sub>2</sub> 作為通風評估的技術性工具：利用 CO<sub>2</sub>濃度估算通風量，本質上是應用示蹤氣體技術（可參考 ASTM E741、D6245 及 ISO 相關標準）。此方法有其嚴謹前提，若條件不符，結果誤差可能很大。

- (1) **核心方法:** 基於質量平衡原理，分析人員在場時 CO<sub>2</sub>濃度的上升曲線（瞬態分析）、濃度穩定時的平台期（穩態分析），或人員離開後濃度的衰減曲線，來反推空間的換氣率（Persily & Dols (1990) 的辦公大樓研究即為一經典案例）。

- (2) 關鍵假設：該技術通常假設空間為一個「單一且均勻混合」的區域，且人體是唯一的 CO<sub>2</sub> 來源。在現實中，這些假設往往難以完全滿足。
  - (3) 實用工具：可利用如 NIST 開發的 QICO<sub>2</sub> 線上工具<sup>3</sup>，輸入目標通風率、空間與人員參數，來估算在特定條件下應有的 CO<sub>2</sub> 理論濃度，再與實際測量值進行比較<sup>4</sup>。
5. 標準制定演變與專家觀點
- (1) ASHRAE 標準演變：ASHRAE 自 1981 年起即在附錄中提及 CO<sub>2</sub> 與通風的關係，並在 1989 年版標準中以 1000 ppm 對應 7.5 L/s/ 人的通風率，此舉後續被廣泛誤解為健康限值。為此，1999 年後的版本移除了該數值，轉而強調其與體味的關聯。現行 2022 年版則明確將其應用於 DCV 系統的設定點計算，並再三申明 CO<sub>2</sub> 不應作為 IAQ 或健康的直接限值。
  - (2) 其他重要標準：ASTM Standard D6245-2024 標準指南，詳細說明了室內 CO<sub>2</sub> 濃度與 IAQ 及通風的關係、人體 CO<sub>2</sub> 產生率的估算，以及如何使用 CO<sub>2</sub> 評估和控制建築通風。
  - (3) 學術界觀點：Mendell 等人於 2022 年的研究明確指出，許多現存的 CO<sub>2</sub> 指南缺乏足夠的科學實證，並批評了「對所有建築類型採用單一限值」、「使用長時間平均值」以及「僅憑單次測量驗證通風」等不科學的做法。
6. 監測實務的關鍵建議：在建築這類動態環境中，單點、單次的測量價值有限。應進行重複測量以了解濃度變化趨勢。感測器需定期校準，因其讀值會隨時間漂移。測量時需結合人員活動時程與室外 CO<sub>2</sub> 濃度等背景資訊進行解讀。在報告數據時，應納入測量不確定性。尤其在大規模部署時，需規劃完善的數據管理與解讀策略，並在向公眾展示數據時，提供清晰的背景說明以避免誤解。
7. 附註重點：
- (1) CO<sub>2</sub> 與 VOC 的協同效應：目前尚無明確證據顯示，CO<sub>2</sub> 與揮發性 VOCs 或其他污染物之間存在顯著的生理協同毒性。不過，高 CO<sub>2</sub> 時表示通風不良若伴隨高溫、高濕等物理環境，可能會加劇人體的不適感。
  - (2) 體味來源與 CO<sub>2</sub> 關聯性：儘管人體氣味來源複雜，但作為代表性的生物污染物（包含產生氣味的物質），其整體產生速率與人體代謝產生的 CO<sub>2</sub> 速率大致成正比關係。
  - (3) CO<sub>2</sub> 與其他 IAQ 參數的關係：CO<sub>2</sub> 濃度與懸浮微粒、VOCs、生物氣膠等其他污染物的關係是動態的。有時因人流、活動及通風變化而呈正相關；但有時可能因室外污染源引入或室內空氣淨化設備的

<sup>3</sup> 網址: <https://pages.nist.gov/CONTAM-apps/webapps/CO2Tool/#/>

<sup>4</sup> Persily 2022, DOI: 10.1111/INA.13059 及 Persily & Polidoro 2022, NIST Technical Note 2213 )

運行，導致兩者濃度呈現無關或反向變化，這再次凸顯了 CO<sub>2</sub>作為單一 IAQ 指標的侷限。

8. **結論：**CO<sub>2</sub>是一個有效反映「人流量」與「通風稀釋效率」的指標，但絕非萬能的 IAQ 綜合評判工具。其監測與應用必須基於明確的技術目的，並結合空間、通風系統、人員活動、室外條件及測量不確定性等完整背景資訊進行綜合解讀，才能發揮其最大價值，避免被誤用或過度詮釋。

## (二) CO<sub>2</sub> 作為 IAQ 管理指標之政策建議：Max Sherman

1. **CO<sub>2</sub> 濃度區間管理建議：**為有效利用 CO<sub>2</sub>作為通風效率的實用指標，以下列濃度區間作為管理與介入的參考依據。此區間旨在作為通風狀態的警示，而非健康風險的絕對閾值。

CO <sub>2</sub> 濃度區間	管理意涵	建議措施
室外背景 約 400 ppm	比較基線	作為最小濃度參考
≤ 1000 ppm	通風良好、氣味可接受	無需額外處置
1000–1600 ppm	控制氣味與初期污染物累積	確保通風系統正常
1600–2500 ppm	通風不足警示	檢視系統效能，適度增強換氣或疏導人數
≥ 2500 ppm	通風嚴重不足、潛在健康風險	應立即強化通風或調整人流，並調查原因
≥ 5000 ppm	職業暴露限值參考	不應出現於一般室內環境
≥ 30,000 ppm	可能造成急性健康危害	應立即疏散並檢討通風與安全設計

2. **CO<sub>2</sub> 指標之政策應用原則：**CO<sub>2</sub>指標為具成本效益的「早期通風問題發現工具」，能夠間接預警因通風不良導致的其他污染物累積風險。基於此定位，政策應用上應遵循以下原則：

- a. 建議採行事項：
  - iii. 將 CO<sub>2</sub> 作為氣味控制與通風監測之管理參數。
  - iv. 適用於需求導向通風控制 (DCV) 系統中，以估算人均換氣量。
  - v. 作為評估通風設備效能是否異常的初步篩檢工具。
  - vi. IAQ 政策應整合污染物控制、節能設計與使用者感知等多面向，尋求效益平衡。

- b. 建議避免事項：
  - i. 不宜將 CO<sub>2</sub> 單獨視為 IAQ 合格與否的唯一依據。
  - ii. 不建議作為空氣傳染風險控制的直接指標。
- 3. **結論與未來展望**：CO<sub>2</sub>指標具有操作簡便與即時性優勢，應視為管理 IAQ 系統效率與通風策略之工具，惟不宜作為單一健康風險判斷基準。未來應持續推動本土化監測研究，強化對不同類型空間與活動模式下的污染物風險識別，發展出兼顧健康、舒適與節能的多目標室內空氣品質治理模式。

### (三) CO<sub>2</sub> 濃度與健康與認知效能關聯：Pawel Wargocki

#### 1. CO<sub>2</sub> 之特性與濃度分布

- (1) CO<sub>2</sub> 基本特性與室外背景濃度：CO<sub>2</sub> 在低濃度下無味，然而，在高濃度（如：鋼瓶逸出之純 CO<sub>2</sub>）時，人體會本能感知其強烈酸味。這種嗅覺感知現象僅在高濃度下才會發生，對一般室內環境中的 CO<sub>2</sub> 濃度無影響。全球室外 CO<sub>2</sub> 濃度持續上升，目前約為 424 ppm，預計未來十年將增加 25 至 27 ppm。如若全球未能有效執行減排措施，預估本世紀末大氣 CO<sub>2</sub> 濃度可能超過 1200 ppm。室外 CO<sub>2</sub> 濃度存在季節性及地域性差異。
- (2) 室內 CO<sub>2</sub> 濃度特性與來源：一般室內 CO<sub>2</sub> 濃度通常低於 5000 ppm，但在特定條件下（如：通風不良且人員密集的短時間內）可能達到此值。學校、住宅（尤其是臥室）等場所較高濃度的報告，對敏感族群的影響需特別關注。辦公場所 CO<sub>2</sub> 濃度多數遠低於 1000 ppm。探討室內高濃度 CO<sub>2</sub> 暴露時，應將其視為潛在健康風險因子，而非單純的通風指標，尤其是在長時間停留的環境中。室內 CO<sub>2</sub> 的主要來源為人體呼吸代謝，燃燒行為及其他特定程序亦可能貢獻。室內 CO<sub>2</sub> 濃度受多重因素影響，具有高度變異性，且遠大於室外 CO<sub>2</sub> 濃度，與空間容積、換氣率、人員數量、年齡、性別、活動強度、代謝率等因素密切相關。
- (3) 特殊環境之 CO<sub>2</sub> 濃度：在某些工業製程（如：發酵工業）及特殊密閉作業環境（如：潛艇、潛水作業），CO<sub>2</sub> 濃度可能遠高於一般室內環境。發酵工業中 CO<sub>2</sub> 濃度可達 8%（80,000-100,000 ppm）；核潛艇內一般維持在 1% 以下，部分舊型潛艇空氣循環系統中的濃度可達 3%（需主動移除）；潛水員的面罩內，CO<sub>2</sub> 濃度也可能達到 2%。在這些特殊情境下，人員可能會短時間暴露於極高濃度的 CO<sub>2</sub>。

#### 2. CO<sub>2</sub> 對人體生理與健康之影響

- (1) 人體 CO<sub>2</sub> 生理調節機制：人體的循環系統中自然含有 CO<sub>2</sub>，這是細胞呼吸作用的代謝副產品，並通過碳酸氫根離子進行運輸。體內

的緩衝系統與調節機制能夠精確維持血液 pH 值在 7.3 至 7.5 的狹窄範圍內；若 pH 值失衡（如酸中毒），將對健康構成極大威脅。CO<sub>2</sub> 主要通過肺部氣體交換，濃度可達 4-6%，此過程有助於維持體內的酸鹼平衡。若肺功能異常，腎臟會啟動代償性酸鹼調節，CO<sub>2</sub> 也可儲存在骨骼中。長期暴露於過高的 CO<sub>2</sub> 濃度（如潛艇人員案例）可能對骨質密度產生不利影響。

- (2) 高濃度 CO<sub>2</sub> 對健康的影響：若在特定職業暴露情境下，室內濃度達 5000 ppm，則能對健康及認知功能產生影響。高濃度的 CO<sub>2</sub> 暴露與酸中毒和高碳酸血症有關，這對慢性阻塞性肺病（COPD）等肺部疾病患者風險較高。當人體遭遇 CO<sub>2</sub> 濃度升高時，會啟動呼吸調節機制以加速 CO<sub>2</sub> 的排除。若 CO<sub>2</sub> 積累過多，導致酸鹼失衡，則可能引發類似血液中毒的生理病理變化。研究指出，母體 CO<sub>2</sub> 濃度若顯著升高（如約 700 ppm 的增幅），可能導致胎兒血液 pH 值下降，但人體具備一定的代償機制，可部分緩解此效應。
- (3) 低濃度 CO<sub>2</sub> (<5000 ppm) 之潛在影響：目前科學證據尚無法證實會對人體造成明確的健康危害。部分研究顯示，在 2900 ppm 的濃度下，可能會出現心率增加等生理反應。當 CO<sub>2</sub> 濃度達到 3000 ppm 時，可能出現代償性過度換氣，但尚未觀察到顯著的健康影響。5000 ppm 限值通常視為避免顯著生理不適的參考標準，而非預防所有生理活動變化的閾值。少數動物研究結果顯示，低濃度 CO<sub>2</sub> 可能引發發炎反應。人類的研究結果尚待確認。近期研究指出，2000-4000 ppm 的二氧化碳暴露與發炎指標的上升有關。其他研究觀察到，短時間內暴露於 2500 ppm 的 CO<sub>2</sub> 後，健康成年人的嗜中性球活化指標上升，並觀察到特定認知測試的表現下降。可能與嗜中性球活化影響腦部的能量供應有關。這些結果需要進一步研究以確認其與實際長期暴露的關聯及臨床後果。

### 3. CO<sub>2</sub> 對心智表現與生產力的影響

- (1) 特定決策模擬研究顯示，即使是 1000 ppm 或更低濃度的純 CO<sub>2</sub> 暴露，也可能影響特定決策任務的表現。此結果曾在哈佛大學的辦公室認知功能研究中有相似結果，但其他獨立實驗室未能完全複製此結果。NASA 的研究僅在有限數據下低濃度下觀察到影響。飛行模擬器研究顯示當 CO<sub>2</sub> 濃度低於 500 ppm 時，可能會對表現產生影響。
- (2) 目前多數研究的共識為在 5000 ppm 的純 CO<sub>2</sub> 暴露條件下，對典型的認知測試尚無顯著影響。研究結果不完全一致，部分研究報告指出，2000-2500 ppm 濃度下可能出現初步的生理反應。對感知空氣品質及常見室內空氣品質相關症狀而言，低濃度 CO<sub>2</sub> 通常不會產生顯著影響。

#### 4. CO<sub>2</sub> 研究的複雜性與未來展望

- (1) CO<sub>2</sub> 作為指標的限制與共暴露問題：CO<sub>2</sub> 的效應常與其他室內污染物或人體生物排放物(bioeffluents)混淆。因此，在解讀室內 CO<sub>2</sub> 監測數據時，應審慎區分其作為通風換氣效率指標的角色，以及其本身作為單一污染物時可能產生之直接健康效應，避免將所有與高 CO<sub>2</sub> 濃度相關聯的負面感知或健康問題，皆單純歸因於 CO<sub>2</sub> 本身。新加坡的研究指出，在移除生物性揮發物後，1500 ppm CO<sub>2</sub> 濃度對肺功能指標的影響僅在生物排放物存在時才顯著，突顯了其他污染物的潛在協同作用或主導作用。目前的模型中，低於 1500-2000 ppm 的純 CO<sub>2</sub> 尚未見顯著的認知損害。
- (2) 個人微環境與重複呼吸現象：人體存在顯著的「重複呼吸」現象，不僅吸入自身呼出的 CO<sub>2</sub>，還吸入其他多種由人體代謝產生的 VOCs。這種情況可能使得個體長時間暴露於高於背景值的 CO<sub>2</sub> 濃度。加州研究透過個人監測儀與活動日誌證實這現象。此外，戴口罩雖能防範病原體的傳播，但口罩內的 CO<sub>2</sub> 濃度亦會顯著升高（可達 1-2%），這一現象值得進一步研究。
- (3) 未來研究方向：CO<sub>2</sub> 是否具間接調節效應，或與其他污染物協同作用，進而影響健康與生產力，這是極為複雜且具挑戰性的研究課題。歷史上，Pettenkofer 等學者將 CO<sub>2</sub> 作為通風指標，評估室內其他污染物的累積。CO<sub>2</sub> 不應被視為唯一或可獨立改變的污染物。應繼續關注 CO<sub>2</sub> 與其他室內污染物的共同暴露對健康的影響，並深入探討對敏感族群的長期低濃度暴露的影響，尤其是在睡眠與學習方面。

#### 5. 演講者對相關提問之回應摘要

- (1) 兒童影響：關於二氧化碳（CO<sub>2</sub>）對兒童影響的研究尚不充分，且關於純 CO<sub>2</sub> 對兒童睡眠質量的影響結果尚無一致結論。對兒童而言，低於 900-1000 ppm 的 CO<sub>2</sub> 濃度可作為通風指標，且可能具有益處；然而，較高濃度的 CO<sub>2</sub> 或低通風量則可能對兒童健康產生潛在的不良影響，特別是對學童等敏感群體的影響需要額外關注。
- (2) 重複呼吸與共同暴露：在複雜的室內暴露情境中，對呼吸道指標(如 FEV<sub>1</sub>) 具有一定影響，但對各類單一污染物的定量歸因仍然困難。二氧化碳常作為重複呼吸與通風效率評估的簡便工具，但，人體的生物排放物（如：VOCs）可能對睡眠品質造成影響，這些因素應一併考慮，並在評估室內空氣品質時納入考量。
- (3) 居住密度與認知功能：高密度擁擠的空間中，除了 CO<sub>2</sub>，壓力等其他因素也會對反應速度及認知功能產生影響。研究模擬在機艙環境，在高密度乘客和較低通風條件下，乘客對環境條件的感知更差，並且壓力生物標記有顯著變化。表示擁擠空間中除了二氧化碳的濃度

外，壓力等環境因素同樣會對認知表現造成影響。

- (4) 研究結果的協調：部分研究（如 COGfx）顯示，降低二氧化碳濃度與改善認知指標之間存在相關性，然而，研究的暴露條件複雜，二氧化碳通常作為整體空氣品質的指標，並非純 CO<sub>2</sub> 效應的唯一代表。將認知效應單純歸因於 CO<sub>2</sub> 可能忽略了其他共存污染物或生物排放物的影響。因此，未來需要進一步研究，以釐清 CO<sub>2</sub> 在室內環境中作為協同因子或增敏劑的角色，並明確區分純 CO<sub>2</sub> 效應與作為通風或污染指標的 CO<sub>2</sub> 作用。
- (5) PM, VOCs 與生產力：相關研究相對較少。已有研究觀察到高 PM<sub>2.5</sub> 濃度可能對認知表現產生不利影響，並指出 PM 濃度與學童缺課率之間存在一定的相關性，但 PM 對學習成效的直接影響尚不明確。早期研究指出，移除教室內的 PM 對學習成效未顯著改善，可能與氣態污染物未發生改變有關。研究已開始關注 PM 對睡眠品質的影響，並且探討其如何間接影響認知功能及工作效率。

#### (四) 室內相對濕度與健康關聯性：Mark Jones

現行國際 IAQ 標準側重於化學與生物污染物，普遍忽略相對濕度等關鍵物理參數。濕度對健康的直接影響極其顯著，卻未獲應有重視。完整的 IAQ 策略，必須是溫度、濕度、通風與污染物的整合性管理。

1. **相對濕度（RH）的科學基礎與風險**：相對濕度定義為在特定溫度下，空氣中實際水蒸氣含量與其飽和水蒸氣含量的百分比。高濕度 (> 70% RH)：易導致黴菌滋生與建材表面冷凝，引發過敏及呼吸道問題。低濕度 (< 30% RH)：增加空氣傳播疾病的機率、損害呼吸道防禦功能，並增強病毒的存活能力。根據自 1985 年發布的”Sterling Chart”，將相對濕度控制在 40% 至 60% 的區間，已被證實能有效抑制多種微生物與過敏原的活性，其影響範圍包括：細菌、病毒、黴菌、塵蟎、呼吸道感染、鼻炎與過敏性氣喘、化學交互作用及臭氧產生。
2. **濕度對人體生理與健康的影響**：人體約由 55% 至 75% 的水分組成，水分在體內扮演著輔助消化、輸送氧氣、調節體溫、潤滑關節、製造荷爾蒙等多重關鍵功能。環境濕度直接影響人體的水平衡，低濕度環境易導致人體脫水，引起疲倦、暈眩、腦霧、疲勞、注意力不集中及學習能力下降。吸入乾燥空氣會嚴重損害呼吸道的黏膜纖毛清除功能。此功能是人體抵禦外來微粒的第一道防線。在濕度低於 40% 的環境中，呼吸道黏液流動性顯著下降，導致其清除病原體的功能受損，增加感染風險。反之，在 40% 至 60% 的濕度環境下，黏膜纖毛能有效清除入侵的病原體。全球季節性流感的高峰期，皆發生於需要室內供暖的冬季。室外冷空氣經加熱後，室內相對濕度會顯著降低，與流感傳播的高峰完全吻合。數據顯示，全球每年約有十億例季節性流感，導致 30 萬至 65 萬人死亡。控制濕度是預防流感傳播的重要手段。

3. **濕度對空氣中病原體傳播的物理影響**：新冠肺炎疫情後，科學界已確認呼吸道病毒主要透過氣膠傳播。環境濕度直接影響帶有病毒的呼吸道飛沫微粒的大小與懸浮時間，2013 年的研究發現，當相對濕度超過 40% 時，病毒的傳染性會急遽下降。：
  - (1) 40% RH 環境：飛沫微粒直徑約 40 微米，在空中懸浮約 6 分鐘。
  - (2) < 20% RH 環境：飛沫微粒會迅速蒸發縮小至約 1 微米，使其在空中懸浮時間延長至 21 天，大幅增加傳播風險。
4. **社會經濟影響與公共衛生公平性**：低濕度環境與生產力下降、病假率增加、病態建築症候群(Sick Building Syndrome) 等問題密切相關。在醫療院所，僅對手術室和加護病房等關鍵區域進行濕度控制，不足以應對全院的感染控制。若能將一般病房與康復區的濕度也維持在 40%~60%，將能有效降低醫院內的二次感染率，縮短病患康復時間。在學校與辦公場所，適當的濕度控制能提升認知能力與學習效率，研究指出其生產力增幅可達 7%。
5. **加濕技術方案與相關規範**：主流的加濕技術可分為兩大類
  - (1) 等溫加濕 (Isothermal Humidification)：透過將水加熱至沸騰產生無菌蒸汽。主要包含：
    - a. 浸入式電極加濕器：透過電流通過水中電極產生蒸汽，特性為服務需求較高、精度與反應速度較低。
    - b. 電熱式加濕器：利用電熱元件加熱水體，特性為服務需求較低、精度與反應速度較高。此法整體能耗較高，約為每小時每公斤水 750 瓦。
  - (2) 絕熱加濕 (Adiabatic Humidification)：利用水分蒸發吸熱來增加空氣濕度，同時具有附加的蒸發冷卻效益。具體技術包括加壓水噴霧、壓縮空氣與水霧化器、超音波、離心式、蒸發式濕膜等。此法能源效率極高，能耗可低至每小時每公斤水 4 瓦，且經適當設計（如搭配 RO 逆滲透與 UVC 殺菌）後同樣能達到無菌要求。

在規範方面，澳洲的醫療準則因考量無菌要求，仍傾向於指定使用傳統的蒸汽加濕，且各州規範不一（新南威爾斯: 35-60% RH；昆士蘭: 30-60% RH；維多利亞: 30-70% RH）。然而，在歐洲（VDI6022-2018 標準）及美國（ASHRAE Standard 170），更節能的絕熱加濕技術已被廣泛接受並應用於醫療環境。
6. **結論與建議**：相對濕度是影響室內空氣品質、人體健康與舒適度的核心要素。暖通空調 (HVAC) 產業應積極行動
  - (1) 建立共識：建立「濕度是影響健康的關鍵因子」之產業與社會共識。
  - (2) 加強監測：在建築物，特別是醫院、學校及安養機構中，普及相對濕度的監測。
  - (3) 推廣應用：透過適當的濕度控制，稀釋室內污染物濃度、維持健康

的室內環境，並有效降低感染風險。

## 7. 綜合討論摘要

- (1) 科學詮釋的複雜性：濕度對病原體傳染性的影響複雜且非線性。它同時改變帶病毒微粒的物理懸浮時間與病原體本身的生物存活率，兩者效應需分開評估。
- (2) 雙向風險與技術權衡：濕度控制存在雙向挑戰與技術權衡。控制低濕度可防範流感與院內感染；但在高濕度地區，降低濕度（減少換氣）與稀釋室內化學污染物（增加換氣）的策略相互衝突，形成兩難。
- (3) 系統性挑戰與策略需求：室內濕度控制是一個系統性挑戰，需在氣候、建築、換氣策略及多重健康風險之間尋求最佳平衡。這凸顯了現行技術與設計常規的侷限性，亟需發展更全面的整合性策略。

## 三、IAQ 表面與空氣污染監測之新技術

### (一) 室內環境清潔效能與表面污染的科學實證及應用 — Dr. Richard Shaughnessy

1. 清潔的制度定位與防疫功能重塑：清潔作業常被視為維護外觀與舒適性的附屬成本，然而研究顯示，錯誤的清潔方式（如以吸塵方式處理黴菌）可能加劇污染與健康風險。建築表面即使外觀整潔，仍可能殘留高濃度微生物與有機污染物。應重新將清潔定位為「預防性健康介入策略」，作為建築感染風險控管與環境健康維護的第一線措施。
2. ATP 清潔指標應用與標準依據
  - (1) 原理與實務優勢：ATP（腺苷三磷酸）為反映表面生物負載之有效工具，可指示微生物總量與有機殘留程度，具備快速、低成本（每樣本約新臺幣 60–90 元）、現場即時性等優勢，適合用於日常品質監控與作業回饋。
  - (2) ATP 監測已納入下列國際標準，作為清潔成果驗證工具之一：IICRC S500（水損修復）、IICRC S520（黴菌修復）、IICRC 感染控制標準草案（預定發佈）
  - (3) 不同廠牌儀器間的變異係數（CV）差異顯著，應避免跨儀器比較。抽樣方式、頻率與位置亦應標準化，避免誤判清潔成效。
3. 實證研究：ATP 與學生健康缺勤之關聯：評估 ATP 作為即時監測工具後，進一步探討其與實際健康結果之間的統計關聯性。美國一項涵蓋 50 所學校、逾 45,000 筆學生健康紀錄之研究發現（研究橫跨 6-7 年）研究首次以統計實證建立清潔介入與健康效益之直接關聯，並證實 ATP 值可作為表面微生物與有機污染物總負載之代理指標，提升其在政策應用之依據。：

表一：美國學校課桌 ATP 值與健康缺勤關聯分析（Shaughnessy et al.,

2021)

指標類別	改善前	改善後 (介入通風與清潔)
課桌 ATP 中位值	400–600 RLU	顯著下降
通風量	約 10–12 cfm/人	約 15 cfm/人 (符合 ASHRAE 標準)
腸胃道相關缺課率	偏高	明顯下降 (具統計顯著性)
呼吸道症狀缺課率	偏高	降低 (具近顯著性)

4. **熱點污染與病毒傳播風險**：在校園實測中發現，多人輪替共用桌面之病毒檢出率高達 65%，其中腺病毒 29%、鼻病毒 37%、冠狀病毒 15%；相較之下，單一學生專用座位病毒檢出率則普遍低於 20%。此結果證實高接觸區域若未落實頻繁與標準化清潔，將顯著提升傳染風險。

表二：美國學校桌面呼吸道病毒檢出率 (Shaughnessy et al., 2021)

桌面使用情境	任一呼吸道病毒 檢出率	腺病毒	鼻病毒	冠狀病毒
單一學生使用	約 20% 以下	11%	12%	5%
多人輪替使用 (hot-desking)	高達 65%	29%	37%	15%

5. **污染的動態平衡—清潔頻率的科學依據**：表面污染的再累積速度，作為清潔頻率規劃之科學依據。

- (1) 表面污染物的再累積週期：研究發現，清潔後的表面在 2–4 天內，其微生物數量與群落結構即可恢復至接近背景污染水準。
- (2) 實務操作指引：為維持低生物負載，學校桌面等高接觸表面至少每 2–4 天應進行一次有效清潔，並可依實際使用密度與人員流動特性進行動態調整。

#### 6. 黴菌修復驗收挑戰與創新解方

- (1) 修復驗收難題：IICRC S520 雖要求災後修復達成「正常微生物生態」，但目前欠缺明確、量化可驗證之基準，致使完工判定標準不一、爭議頻仍。
- (2) 前瞻解決方案：Mold Classification Tool：由 Shaughnessy 團隊與耶魯大學共同開發之工具，結合高通量 DNA 定序與資料比對，可分析灰塵樣本中超過 20,000 種微生物，建立「正常」與「異常」微生物生態模式，應用於災後復原驗證與健康基線確認，具備高科學性與實務可行性，亦可取代 ERMI 指數等爭議性工具。

#### 7. 結論與政策建議

- (1) 清潔作業應納入建築健康管理架構，作為感染控制策略之一。
- (2) ATP 為即時有效之監測工具，可作為清潔作業流程與頻率優化之

參考依據，非健康終端指標。

- (3) 建議將清潔人員制度性定位為建築健康維護專責角色，並提供訓練與作業標準支持。
- (4) 建立「表面—空氣」整合性防治思維，表面清潔與通風應被視為一個整體的健康策略，同步規劃、互補施行，以達到最大效益。
- (5) 鼓勵跨領域整合清潔標準與健康風險評估實證，作為政策設計與法規更新依據。

## (二) 開發以呼吸道微生物群為基礎之室內空氣感染風險評估標記：方法驗證與應用展望 — Henry Oswin

1. **摘要：**針對現有室內感染風險評估方法在實務應用中的侷限，開發並驗證一種以人體呼吸道微生物群為基礎的空氣生物標記。該標記利用液滴式數位 PCR (ddPCR) 進行絕對定量，可高靈敏地偵測空氣中來自人體之懸浮微粒總負荷。實證結果顯示，其濃度與通風效率、人員密度及活動量高度相關，並能在醫療場域中有效區分潛在風險熱點。尤其在 SARS-CoV-2 陽性環境中，標記濃度與病毒濃度呈顯著正相關，顯示即使不直接檢出病原體，亦可推估空氣中感染風險。此技術克服 CO<sub>2</sub> 監測在高效過濾環境下的適用性限制，為高風險場域提供一套可標準化的、具政策潛力之風險指標。
2. **新型生物標記與傳統方法比較：**本研究開發的生物標記，旨在提供一種能穩定、靈敏地量化空氣中人體呼吸道來源懸浮微粒總量的方法，從而為風險評估提供更可靠的基礎。

評估方法	優點	限制
CO <sub>2</sub> 濃度監測	即時、便宜、反映通風與人員密度	與微粒濃度非絕對相關，受過濾系統影響
直接病原體定量	高專一性，直接確認病原體	靈敏度低，易受採樣影響，無法反映總微粒負荷
呼吸道微生物標記 (本研究)	高靈敏度，反映總呼吸道微粒負荷，可標準化	非直接測量病原體，需結合其他資訊判斷感染性

3. **研究方法**
  - (1) **生物標記之選定：**選定人體呼吸道中的常在微生物菌群作為生物標記，其優勢在於高濃度（唾液中可達 10<sup>6</sup> – 10<sup>8</sup> copies/mL）與高專一性潛力。研究針對細菌之 16S rRNA 基因設計引子，標記呼吸道常見菌屬，如：嗜血桿菌屬(Haemophilus)與鏈球菌屬(Streptococcus)。
  - (2) **檢測技術之選擇與考量：**為實現對生物標記的絕對定量，採用 ddPCR 技術。該技術具備極高的精準度與靈敏度，且其穩定性與現

行病原體檢測主流平台 PCR 技術一致。考量到 DNA 分子結構在氣膠化過程中相對蛋白質更為穩定，故選擇 DNA 作為標的。

#### 4. 研究結果與討論

- (1) 生物標記有效反映場域物理特徵：在醫院應用中，急診的生物標記濃度顯著高於加護病房，而信號最強的區域為狹小且通風較差的救護車等候區。此結果證實，該生物標記對人員密度與通風效率具高敏感度。克服 CO<sub>2</sub> 監測在設有高效過濾系統的現代建築中，可能與真實微粒濃度脫鉤的限制，提供更可靠的暴露評估指標。
- (2) 生物標記作為病原體相對負荷量之指標：在 SARS-CoV-2 陽性樣本中，病毒濃度與生物標記濃度呈現高度正相關。說明即使該生物標記不直接測量病毒，卻能對應空氣中病毒的相對負荷量。此方法彌補直接定量因空氣中濃度過低而難以穩定測量的缺點，為評估空氣傳播風險提供更穩健的替代指標。
- (3) 提出「相對致病潛力」之量化概念：研究中一位已知感染者床邊的採樣點，其「SARS-CoV-2 濃度 / 生物標記濃度」的比值顯著偏高。將此比值定義為相對致病潛力 (Relative Infectiousness Potential)，量化「帶有病毒的氣膠」在「整體呼吸道來源氣膠」中的佔比，提供更細區分不同感染者的傳播潛力或不同空間的即時風險。

#### 5. 結論與應用展望：在環境科學與公共衛生領域具重要應用價值

- (1) 作為空氣採樣研究之標準化工具：可作為內參標準，用以校正不同採樣設備與分析流程間的系統性偏差。
- (2) 評估空間中呼吸道微粒負荷：提供直接、量化的方法，評估特定空間因人員活動所產生的呼吸道微粒污染程度。
- (3) 驗證空氣傳播感染風險模型：提供可靠的實測數據，用以驗證、校準並優化現有的感染風險評估模型。

總體而言，此技術提供一種無需病原體存在即可評估空氣傳播潛在風險的創新工具，對改善建築通風策略及制定公共衛生政策具深遠意義。

### (三) 雙功能煙霧警報器與 IAQ 偵測整合技術：Savinda Lekamge

1. 摘要：探討以低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器整合煙霧警報器，實現火災預警與 IAQ 監測雙重功能之可行性。傳統 PM<sub>2.5</sub> 監測設備成本高昂，研究評估煙霧警報器原始感測模組的適用性，並進一步驗證內嵌低成本感測器的有效性。結果表明，雖煙霧警報器原始模組不適用於低濃度 PM<sub>2.5</sub> 監測，但整合低成本感測器後能有效偵測 IAQ 變化。報告亦討論了感測器變異性、數據校正策略及實務應用挑戰，為提升室內空氣監測覆蓋率與效能提供參考。
2. 研究目的：煙霧警報器於 IAQ 監測的潛力
  - (1) 如何將低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器導入既有建築煙霧警報器的可行性，以提高監測覆蓋率並為納入相關法規。現行法規已對煙霧警報器的

設置與使用方式有所規範，遂利用煙霧警報器作為介面，評估其成為 IAQ 監控系統一部分的可能性。

- (2) 煙霧警報器本質上具備粒子感測功能，但其設計主要針對火災產生的高濃度顆粒，與一般室內環境需監控的低濃度 PM<sub>2.5</sub> 在目標上有顯著落差。研究團隊分析了兩種主流煙霧警報器：離子型（使用放射源）與常見的光電型（以紅外線偵測粒子光散射，機制與部分 PM<sub>2.5</sub> 感測器相似）。

### 3. 研究方法與過程：

- (1) **煙霧警報器原始感測模組評估：**為評估煙霧警報器作為空氣品質監測工具的可行性，研究團隊拆解其電路並外接電壓輸出設備，以追蹤其輸出與實際粒子濃度的關聯。實驗在自建密閉實驗箱中進行，使用低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器 Plantower 作為對照，並模擬多種煙霧來源（包括燃燒尤加利葉、蚊香、火柴與線香），觀察各感測器的反應。
- (2) **內嵌低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器方案評估：**基於原始模組的限制，研究進一步評估將低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器內嵌於煙霧警報器中的方案。

### 4. 主要研究結果與討論：

- (1) **煙霧警報器原始模組的適用性：**實驗結果顯示，煙霧警報器原始感測模組僅在粒子濃度達到約 4,200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 時才有明顯反應。此濃度遠高於室內空氣品質對 PM<sub>2.5</sub> 的建議標準（約 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），因此，僅以煙霧警報器原始感測模組進行空氣品質監測並不適宜。
- (2) **內嵌低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器之可行性：**將低成本感測器內嵌於煙霧警報器的方案則顯示出較高可行性。透過與精密儀器比對，證實此整合系統可在室內 PM<sub>2.5</sub> 標準濃度範圍內提供有效讀值，並能反映不同粒子來源（如：燃燒蠟燭、蚊香、線香等）所產生的濃度變化。
- (3) **低成本感測器之變異性：**研究亦指出，不同來源的粒子對低成本感測器的反應略有差異，在感測靈敏度上仍具變異性。

### 5. 提升數據準確性之策略：

- (1) **建立修正係數資料庫：**建議建立一套依據燃燒來源分類的「修正係數資料庫」。此資料庫可用於補正不同來源的化學成分對感測器響應的差異性。
- (2) **比對數量濃度與質量濃度：**建議未來針對「數量濃度」與「質量濃度」進行同步比對。有助於減少因感測器內建演算法轉換數據而導致的潛在誤差。
- (3) **優化光學偵測原理：**對於光學偵測，不同光波長（如紅外線與可見光）與不同粒徑之間的感測靈敏度存在差異。此特性或可作為未來感測器優化的方向。

### 6. 實務考量與專家意見：

- (1) 感測器安裝位置：感測器安裝於天花板或牆面等不同位置，讀值準確性可能受到室內氣流混合程度及與污染源距離的影響。
  - (2) 微粒沉降與混合：微粒的沉降特性與室內空氣的混合程度皆會影響監測數據的代表性。
  - (3) 感測粒徑範圍的侷限性：目前低成本感測器無法涵蓋 PM<sub>1</sub> 的完整資訊，但其對 PM<sub>2.5</sub> 濃度的監測已具有顯著的實用價值。
7. **結論與展望**：研究驗證將低成本 PM<sub>2.5</sub> 感測器嵌入煙霧警報器的技術可行性。此「雙功能」方案不僅有望大幅提升 IAQ 監測覆蓋率、降低監測成本，更有潛力結合智能建築系統，實現基於 IAQ 數據的智能通風控制，從而革新火災警報機制並改善室內空氣品質。後續研究仍需針對感測偏差、數據校正方法、長期穩定性以及在不同真實場域應用效果，進行更深入的探討與驗證。

#### 四、過濾與淨化技術的革新

##### (一)澳洲空氣過濾器標準 AS/ISO 16890：Philipp Schluter

1. **從保護設備到守護健康**：空氣過濾技術長期以來主要著眼於機械設備保護。澳洲舊有標準 AS 1324 沿用自 1970 年代，其核心在於評估濾網對設備系統的防塵效果，較少考量人體健康風險。PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 被證實對呼吸與心血管系統具高度危害性，濾網標準必須轉型以符合健康導向與科學化需求。澳洲自 2023 年底正式採用 AS/ISO 16890，導入粒徑分布與靜電中和測試的現代化分級機制。
2. **標準比較及新標準修正處**：

項目	AS 1324 (舊)	AS/ISO 16890 (新)
測試條件	加載粉塵後評估平均效率	潔淨狀態測試分級效率 (ePM)
顆粒範圍	未明確定義	PM <sub>1</sub> / PM <sub>2.5</sub> / PM <sub>10</sub>
效能分類	F5~F9 模糊區間	ePM <sub>x</sub> (依效率 50~95% 分級)
靜電影響	無考量	使用 IPA 中和電荷後測試
誤差容許	穿透率 ±15% 誤差	儀器精準化、實驗室須符合 ISO 17025
應用導向	工業設備保護	健康防護、IAQ 管理、節能設計

- (1) 分級效率(Fractional Efficiency): 評估濾網對不同粒徑懸浮微粒的真實去除能力，並對應 WHO 健康指標。
- (2) 靜電中和測試：短效靜電濾材有「初期高效」假象，確保產品貨真價實，長期穩定。

- (3) 容塵量與壓損標準化：協助評估「長期持有成本」，提升濾網生命週期比較的可比性。

### 3. 政策與設計應用建議

- (1) 依不同建築場域建議濾網效能分類如下：

場域類型	依 AS 16890 建議濾網等級
醫療院所	ePM <sub>1</sub> ≥ 70%
學校/辦公室	ePM <sub>2.5</sub> ≥ 65%
商場/餐飲	ePM <sub>10</sub> ≥ 80%
工業廠房	coarse ≥ 60% (或依粒徑源強調範)

- (2) 空調系統節能設計
- 初始壓損較低但壽命短者，總能耗反而較高。
  - 建議使用容塵量大、壓差上升緩慢之產品（如 V 型濾網）。
  - 能源評估應依濾網全壽期考量（參照 Eurovent 能耗分級）。
- (3) 運轉與維護注意事項
- 濾網安裝密合度應納入查驗，避免旁通氣流導致實效下降。
  - 袋式濾網應垂直安裝，避免濕氣累積與纖維磨損。
  - 建議設置可校正之微粒監測設備，搭配濾網汰換時機預測。
  - 建立 SOP 與人員培訓，確保維護人員具備正確安裝與更換知識，落實管理。

### 4. 推動建議

- 技術引進：鼓勵製造商依 AS/ISO 16890 進行產品標示與第三方驗證，提升市場資訊透明度。
  - 標準整合：評估我國 CNS 12689 等濾網測試規範參考 ISO 16890 更新，納入 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub> 去除效率與靜電中和機制。
  - 政策導入：於公有建築、綠建築標章與醫療院所指引中，逐步導入以 PM 分級為基礎的濾網選用準則。
  - 國際接軌：強化與歐洲 ASHRAE、ISO 技術委員會對話，掌握最新標準變化趨勢。
5. **結語**：AS/ISO 16890 標準的導入象徵空氣過濾技術邁入以「健康效益」與「真實效率」為核心的時代。透過分級效率評估、靜電中和測試及容塵壽命設計，新標準提供更具科學性與應用價值的選型依據。

## (二) HEPA 濾網配置對教室內空氣傳染風險之即時監測與分析 — Mohamed Mahmoud

- 研究背景與模型**：本研究提出一套創新的「半徑解析感染風險模型」，可即時估算室內空氣中病原體的感染風險及最大安全佔用時間。相較於傳統基於均勻混合（well-mixed）假設的 Wells-Riley 模型，本研究結

合實測氣膠濃度資料與計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬，建立一套具時空解析度之感染風險與通風成效評估工具。

2. **實驗設計與初步發現：**於一間自然通風不良之教室進行，22 位受試者僅進行說話活動。研究團隊透過 TSI-OPC 光學粒徑計連續監測氣膠濃度，並運用 CFD 模擬分析氣膠於室內空間之流動與聚集行為。模擬結果顯示，在無外部通風條件下，室內感染風險呈高度空間異質性，感染者周圍風險為遠端區域之三倍以上，而位於教室中央之感測器位置風險則被傳統模型低估約 20%。
3. **濾網效能評估指標與配置計算：**研究導入「清淨空氣供應率」(Clean Air Delivery Rate, CADR)作為量化 HEPA 濾網效能之重要指標。以教室場域（體積約 185 m<sup>3</sup>）為例，若欲達成每小時換氣 5 次(Air Changes per Hour, ACH=5)，則所需總 CADR 至少應達 925 m<sup>3</sup>/h。假設單台 HEPA 濾網之 CADR 為 300 m<sup>3</sup>/h，則至少需配置 3 台濾網方可達成目標換氣效能。
4. **HEPA 濾網配置情境模擬與分析：**為分析 HEPA 濾網配置對感染風險與氣膠濃度之影響，研究模擬以下兩種情境：
  - a. **1 台 HEPA 濾網：**安置於教室中央，於 25 分鐘後 OPC 感測器所測得之細懸浮微粒總濃度（0.3–2.5 μm）下降約 15–20%。氣膠濃度變化呈現緩慢累積後略為下降，整體濃度仍接近高風險暴露門檻。此配置下感染風險（Pi 值）僅由 0.14 降至約 0.12，最大安全佔用時間未顯著延長，改善範圍亦主要集中於濾網鄰近區域。
  - b. **3 台 HEPA 濾網：**採對角線與中央對稱方式配置，總 CADR 超過 900 m<sup>3</sup>/h。OPC 感測器顯示，氣膠濃度於 10–15 分鐘內快速下降，25 分鐘後總濃度下降幅度可達 45–55%，與 CFD 模擬預測結果高度一致。此情境下感測器位置之感染風險值可降至約 0.10–0.11，最大安全佔用時間亦明顯提升。
5. **配置策略與結論：**模擬指出，在受人體熱源產生之自然對流影響下，HEPA 濾網應優先配置於「氣流死角」、「冷區」或「邊牆空腔」等位置，可提升濾網捕捉效率，並達成較佳之能效與空氣品質改善成效。單台 HEPA 濾網於密閉或高人數空間中之效果有限，實務應用中應透過 CADR 計算與 CFD 模擬進行配置規劃。搭配本研究所建構之即時感染風險評估模型與最大安全佔用時間計算工具，得以精確評估所需濾網數量、最佳配置位置與風險控制策略。
6. **應用與展望：**可應用於學校、辦公室、醫療院所等高密度使用空間之室內空氣品質改善、空調系統強化或智慧淨化策略規劃。未來可進一步結合即時氣膠監測資料，自動調節 HEPA 濾網風量或運轉時機，以實現節能與感染控制並重之目標。

### (三)體味作為室內空氣污染物：淨化技術的科學驗證與展望 — Dino Pisaniello

1. **背景與挑戰：**體味是影響室內空氣品質及使用者滿意度的關鍵因素，其主要來源為皮膚與呼吸道散發的 SVOCs。這些主要是醛類與羧酸的氣態分子，在極低濃度下即可被人體感知，但傳統的 HEPA 濾網對其幾乎無效。因此，目前最普遍的控制手段是透過大量引進室外新風來稀釋，導致空調系統能源消耗居高不下。
2. **科學基礎：從「揮發物組學」(Volatilomics) 鎖定目標：**本研究的基礎建立在「揮發物組學」之上，這是一門分析生物體散發的所有揮發性化合物的科學。每個人的健康與飲食狀況都會形成獨特的氣味「化學指紋」。透過這門科學，研究得以從數百種人體散發物中，精準鎖定造成「令人不悅」氣味的關鍵化學物質，為後續的淨化實驗提供了明確的標的物。
3. **實驗設計與初步驗證：**
  - (1) 研究採用多種技術的複合式空氣清淨機，包含：電子束輻射 (Electron Beam Radiation): 用高能量分解污染物；MERV 13 濾網: 過濾中高效微粒；催化劑過濾器 (Catalyst Filter): 使用霍加拉特劑 (Hopcalite) 等催化劑來加速化學分解。
  - (2) 核心方法與目標：讓含有特定體味化學物質（如與汗臭、腳臭相關的異戊酸、與老化氣味相關的壬烯醛等）的空氣單次通過淨化設備，並利用 GC-MS 進行前後成分比對，以量化其去除效率。
4. **研究初步結果：**多模式淨化系統對於目標醛類、羧酸，具有顯著有效的去除能力。這項正面的初步結果，是成功的概念驗證，也表明透過先進的空氣淨化技術來主動控制體味是可行的。
5. **結論與展望：**相較於被動地以高通風量稀釋，主動採用多模式空氣淨化技術是解決室內體味問題具有潛力。未來的研究將擴大測試範圍並進行實地驗證。最終目標是為建築設計與節能策略提供可靠的科學依據，打造一個無需犧牲空氣品質即可實現高效節能的健康室內環境。

## 伍、建築科學與政策實務

### 一、澳洲政策實務：從頂層設計到示範計畫

#### (一)維多利亞州「清新室內空氣路徑計畫」的推動實施報告 — Daniel West

1. **計畫緣起、目標與合作機構：**「維多利亞州清新室內空氣路徑計畫」預計時程為 9 個月至 2 年，合作夥伴包括維多利亞州政府相關部門、Lidia Morawska 教授、墨爾本大學、昆士蘭科技大學 (QUT)、Woolcock 呼吸與環境服務研究所 (AWES)、澳洲聯邦科學與工業研究組織

(CSIRO) 及蒙納許大學等。室內空氣品質與建築設計間的關聯，仍存在知識與標準上的落差。人們大部分時間於室內活動，建築環境對健康有重大影響。

計畫目標產出更多實證知識，明確定義「清新室內空氣路徑」在維多利亞州的意涵，並將學習成果廣泛分享。聚焦於政策領導、社會參與、指引與標準的制定、應用相關知識，並建構一個支持性的整體環境。

計畫三大具體目標如下：

- (1) 設計並實施可實質改善室內空氣品質的介入模式。
  - (2) 展示藉由安裝介入設備所帶來的變化，並證明相關投資的效益。
  - (3) 發展一套能供政府相關單位決策參考的全面政策架構。
2. **研究方法、範圍與監測設計：**由於成本與規模的限制，本計畫並非直接研究空氣品質改善是否帶來顯著的健康成效。研究的核心重點將圍繞介入措施的以下四個方面產生實證知識：可接受性(Acceptability)、可行性(Feasibility)、成本效益(Affordability / Cost-Effectiveness)、擴散性(Scalability)。

針對現有公共空間進行改造，驗證是否能有效改善空氣品質，並探討使用者對改造的接受程度、維持此空氣品質水平的可行性與條件、模型的適用性及干預措施的可持續性。

在監測設計上，預計在約 200 個空間中安裝 CO<sub>2</sub>感測器、PM 監測設備。期望能即時收集數據，並對外公開，以了解空間使用情況與使用者的反應。主要目的是確認是否能達到較低的 CO<sub>2</sub> 平均濃度及懸浮微粒基線值，並以此為背景數據發展應對計畫。雖然不直接評估健康成效，此計畫將評估這些變化對空間使用的實際影響，並對照現有標準（如：Yerrell, Sotous, ASHRAE 等）分析達標情況及影響因素。

3. **技術考量、設備應用**
- (1) 準確且低成本的 CO<sub>2</sub> 感測器，特別適用於單一區域空間。
  - (2) 無需依賴大型 HVAC 系統的介入措施，運用如：可移動式 HEPA 空氣淨化裝置、吊頂式空氣淨化器或自然通風。
  - (3) 以高頻率收集數據，以精確掌握空氣品質的動態變化。
  - (4) 項目不預設特定的技術路徑，目標是通過工程評估，找出在特定空間中最有效的干預方法。
4. **場域選擇：**選定如大學等具代表性的公共空間作為示範場域，並與當地管理者密切協調。場域須符合以下條件：有高風險族群存在、具有顯著改善空氣品質的潛力、設施管理者與使用者願意積極參與計畫。此外，考量公共空間的性質、研究結果的普遍性、室外空氣交換率及現有通風狀況等工程與研究標準。介入措施將依據建築的現況條件進行調整，在技術可行性與場域配合度之間取得平衡。
5. **經濟效益模型與場域選擇邏輯：**建立一套健康經濟學模型，以評估影響，

連結室內空氣品質的改善與以下具體效益：

- (1) 減少呼吸道疾病的感染風險。
- (2) 降低因病缺勤天數。
- (3) 改善長期健康狀況（如：降低因暴露於 PM<sub>2.5</sub> 導致的非傳染性疾病風險）。
- (4) 提升健康調整生命年（QALYs）。
- (5) 創造經濟效益，提高生產力、降低家長因孩童生病而產生的照護負擔。此模型亦將納入干預措施的成本效益分析，包括安裝成本、能源消耗變化及後續維護費用。

選址的邏輯依據包括以下六個關鍵因素：

- (1) 疾病傳入該空間的風險。
- (2) 人員在該空間的平均使用時間。
- (3) 空間的容納人數與人員密度。
- (4) 人員必須於空間活動的強制性（如：學生於教室、員工於辦公室）。
- (5) 因疾病可能導致的經濟影響與損失。
- (6) 健康損失的社會代價(Health Utility)。

#### 6. 場域示例、應用可能性與時程規劃

學校、托育中心與辦公室為擇定的關鍵示範場域，因風險較為明確，且相關數據易於觀察與收集。地方政府所管轄的各類場域則因其空間多樣性，有助於研究成果的外部推廣與應用，符合政府期望透過少量試點以驗證方案的目標。

項目時程規劃如下：

- (1) 初期評估與監測：建立基線數據，包括在模型安裝但未啟動干預前的空氣品質狀況。
- (2) 介入實施與調整：緩慢引入干預模型，並採用迭代方法，持續監測、評估效果，進行必要的調整與改進。
- (3) 後期監測與成效評估：系統評估干預措施的整體成效。
- (4) 整合研究發現：將所有數據、經驗與通風有效性及可行性研究結果整合，撰擬最終報告。

7. **結語**：引用 Lidia Morawska 教授的觀點：「清新空氣，是公共衛生轉型中最容易達成的切入點。」也是本研究的初衷與核心驅動力。期望藉此計畫為社會帶來實質的知識貢獻，並對公共健康產生積極正面的改變。

## (二) Jason Monty 教授有關室內空氣品質（IAQ）管理的實務觀點與政策建議

### 1. 推動空氣淨化優先於傳統暖通空調系統

傳統 HVAC 系統的設計目的主要為溫濕度調節，對於細懸浮微粒、病原體與化學污染物的處理能力有限。其研究發現，傳統「混合式通風

系統」容易導致污染物於空間內均勻擴散，反而增加傳播風險。即使場域內設置多台空氣清淨機，若須仰賴人工操作或受噪音干擾，往往難以達到持續有效的淨化效果。

Monty 教授因此主張，空氣淨化設備應與感測器與自動控制系統整合，讓設備能根據實際條件自動運作，人員僅需定期更換濾網。疫情期間可採用 HEPA 濾網提升過濾效率，一般情況則建議使用 MERV 13 等級濾網，以兼顧效能與節能。他也強調應導入具熱回收功能(Heat Recovery Ventilation, HRV)的外氣引入設備，以提升通風效能並降低能源消耗。

## 2. 建立低成本監測與自動控制模組：

Monty 教授參與的 BREATH 計畫聚焦於評估並優化既有建築的通風與監控系統。該計畫由墨爾本市政府主導，與 Cbus Property、AG Coombs 等產業夥伴合作，在市中心一棟辦公大樓測試三種不同通風模式（位移通風、天花板過濾器與自然通風），結果顯示位移通風系統可降低 COVID-19 傳播風險達 83%，並減少 20% 能源消耗。此成果已作為改善辦公與商用空間設計的重要依據。

此外，他亦參與領導由維多利亞州政府出資、Burnet Institute 主導的「Pathway to Clean Indoor Air」計畫，投入 987 萬澳元，針對學校、職場與公共空間進行 IAQ 改善。計畫導入 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、溫濕度與人流量感測模組，並整合自動開關控制與可替換濾網系統（視場域採用 HEPA 或 MERV 13），並進行為期一年的實地採樣與成效評估。Monty 教授負責工程設計與部署，計畫涵蓋超過 200 個場域，包括托育中心、健身房與圖書館，將為政策制定提供實證基礎。

3. **小型場域難以負擔大型設備與解決策略：**Monty 教授指出：「改善室內空氣品質不能僅聚焦於配備中央空調的大型場域。」許多托育、長照與社區機構面臨空間與財務限制，難以部署傳統 HVAC 系統。他建議政府應推動模組化、低成本的淨化設備方案，如附掛型空氣清淨機與熱回收新風系統等，以強化中小型場域的 IAQ 管理能力。
4. **推動教育體系與產業鏈技術轉移：**為補足中小場所缺乏專業服務與操作人力的斷層，Monty 教授與澳洲冷凍空調與暖通工程師協會(AIRAH)合作設計三日制密集訓練課程，針對技術人員與企業端提供實作型訓練，內容包含空氣品質監測、設備安裝與維護、濾網應用原則與小型場域整合實例等，藉此推動 IAQ 專業知識在產業內普及。
5. **從技術到政策的落差：架構「落地能力」機制：**Monty 教授指出，澳洲雖有建築設計相關規範（如換氣率要求），但缺乏針對 IAQ 的強制性標準與執行架構。目前挑戰並非技術不足，而是缺乏協助中小場所「從零導入」整套 IAQ 解決方案的平台。他呼籲政府應與產業協力建立一套

可落地的支援機制，包括技術標準指引、設備導入諮詢與教育訓練體系，以真正促進 IAQ 政策落實於基層場域。

## 二、標準的在地化挑戰：澳洲 AS 1668.2 的演進與啟示

### (一) AS 1668.2 與 CO<sub>2</sub> 指標角色：室內空氣品質管理的誤區與制度定位 —

#### Sonia Holzheimer

1. **前言：**室內空氣品質是建築健康與公共衛生管理的重要面向。隨著建築節能、智慧控制與後疫情風險意識的興起，CO<sub>2</sub> 濃度在設計與政策中被頻繁引用為 IAQ 指標，其中「800 ppm」或「1000 ppm」常被視為通風品質良好的象徵。然而，在澳洲機械通風設計文件 AS 1668.2 中，CO<sub>2</sub> 的實際角色與其在大眾與部分工程實務中的認知，存在顯著落差。該文件委員會成員 Sonia Holzheimer 結合條文解析與制度演進，釐清誤用風險並提出制度化建議。
2. **AS 1668.2 文件定位與 CO<sub>2</sub> 指標角色**
  - (1) 文件定位：針對澳洲建築與氣候條件設計的最低機械通風設計文件，主要目標為透過新風供應達成體味控制與基本污染物稀釋效果。通風量設計依據如下：
    - a. 生理需求 (2.5 L/s/人)：稀釋人體呼吸所產生的 CO<sub>2</sub>，確保氧氣充足。
    - b. 舒適需求 (7.5 L/s/人)：控制體味，提升訪客感受滿意度 (達 80% 為目標)。
    - c. 如辦公空間文件通風量即為 10 L/s/人，為上述兩者合併所得。
  - (2) CO<sub>2</sub> 的實際定位與功能

在 AS 1668.2 中，CO<sub>2</sub> 僅出現於以下幾處條文或註解中：

    - a. 文件範圍章節：CO<sub>2</sub> 被列為通風系統有助控制的數種氣體之一，無特別賦予其健康指標地位。
    - b. 需求控制通風(DCV)條款註解：明確指出 CO<sub>2</sub> 僅作為「建立佔用率的代理參數(proxy for occupancy)」，其濃度變化僅用於估算人數進而控制風量。
    - c. 設定值數值(set point)：註明一般控制範圍為 600–800 ppm (2012 年版) 或 850 ppm (2024 年版)，作為 DCV 啟動依據，非空氣品質指標。
    - d. 附錄 A：表 A1 註解明確指出通風率設計係針對氣味控制，「刻意高於維持氧氣/CO<sub>2</sub> 安全濃度所需值」。
    - e. 附錄 F：再次強調 CO<sub>2</sub> 可作為控制工具，並警告若使用非通風方式降低 CO<sub>2</sub>，須同步考量其他污染物可能累積風險。

CO<sub>2</sub> 在該文件中的角色明確、特定，為通風控制工具，非空氣品質合規依據，更非健康閾值。

- (3) CO<sub>2</sub> 的侷限與誤用風險
- CO<sub>2</sub> 無法代表室內 PM、VOCs、病原氣膠或濕度等關鍵 IAQ 污染物。
  - 單一依賴 CO<sub>2</sub> 對空氣品質做出結論，將導致過度簡化甚至誤判風險。
  - 設計人員若將其視為「良好 IAQ 的象徵」，可能導致換氣不足、感染風險未控制等結果。

CO<sub>2</sub> 僅為估算佔用率的控制參數，誤用為 IAQ 標準將導致錯誤設計與政策失真。

3. 文件制度演進與歷史定位：文件名稱歷經「室內空氣品質」、「污染物控制」後回歸「機械通風要求」，反映其制度角色逐漸聚焦於工程設計定位，避免誤解為全面健康保障標準。

年份	關鍵發展	說明
1976	首版 AS 1668 發佈	聚焦通風要求與氣味控制
1991	架構穩定化	建立多空間排氣控制、通風率整體邏輯
2002	修訂版未納入 BCA	因吸菸條款爭議，未列入法規體系
2012	正式導入「有效戶外空氣」概念	可使用過濾後回風等達標
2024	改名為「文件」而非「標準」	名稱由 "Standard" 改為 "Document"，避免被誤認為健康標準

4. 功能適用範圍與制度限制：

(1) 功能優勢

- 制度穩定：提供超過 40 年可用之設計依據。
- 技術整合：能與建築法規與 HVAC 系統設計有效連動。
- 目標清晰：專注稀釋與氣味控制，不誤導健康承諾。
- 本土適用：為澳洲在地氣候與建築形態量身設計。

(2) 應用侷限

- 彈性條文應用率低：如性能設計、過濾減免等選項鮮少被使用。
- 未涵蓋濕度控制：高濕環境無相應設計要求。
- 不適用於感染控制：無空氣分區、壓力梯度設計依據，無法應對傳染病傳播風險。

5. 政策建議與制度補充方向

- 避免過度依賴現行文件作為 IAQ 評估依據，特別是將 CO<sub>2</sub> 誤用為通風充分與空氣清淨的指標。

- (2) 發展獨立 IAQ 或感染風險設計指引，借鏡 ASHRAE 241，採非強制性、風險導向架構。
- (3) 強化專業教育與技術導引，協助設計者理解文件條文內涵與適用邊界。

建立跨標準整合機制，如與《全國建築法規》(National Construction Code, NCC) 與《全國環境保護措施》(National Environment Protection Measures, NEPM) 接軌，提高 IAQ 整體治理效能。

6. **結論：**AS 1668.2 為一部務實、有效且具有高度工程適用性的通風設計文件，其核心價值在於提供穩定可行的最低通風參考量。但將其中的 CO<sub>2</sub> 控制設定值誤解為室內空氣品質之標準，已成常見且潛在風險極高的錯誤。未來 IAQ 制度若欲朝向健康風險管理進化，應考慮另建制度軌道，而非期待 AS 1668.2 擔負過多責任。

## (二)解讀新版通風文件 AS 1668.2 — Daniel McCaffrey

1. **核心變革：**AS 1668.2 於 2024 年最新版本廢除舊有的本地測試方法，全面採納更科學、更真實的國際過濾器效能標準 ISO 16890。
2. **舊標準數據失真與健康風險：**舊標準下的 F 等級過濾器效能數據嚴重失真。例如：標示 F8 (初始效率 80%) 的靜電濾網，在安裝 3 個月後效率可能驟降至 30%。可能導致嚴重的健康風險，例如：被廣泛使用的 F5 過濾器，對 PM<sub>1</sub> 過濾率僅 1%，幾乎沒有保護作用。
3. **新標準 (ISO 16890)—更誠實的測試，更健康的指標：**強制在消除靜電後才進行測試，以反映過濾器在真實使用中的最低機械過濾能力，避免效能虛報。粒徑全範圍評估：要求測試 0.3 至 10 微米的完整粒徑範圍，並根據不同粒徑微粒在真實大氣中的分佈比例進行加權計算，得出對 ePM<sub>1</sub>、ePM<sub>2.5</sub> 和 ePM<sub>10</sub> 的綜合過濾效率，與 WHO 標準同步。
4. **升級行動與量化效益：**建議將空調箱 (AHU) 濾網升級至至少 ePM<sub>2.5</sub> 50% 等級，其捕集 PM<sub>1</sub> 的能力比舊 F5 過濾器高出 40 倍。僅需採用此等級濾網，即可將外氣通風量從每人 10 L/s 降至 7.5 L/s，幫助節能。在典型辦公大樓中，考量到能源佔總成本的 70%，升級濾網因壽命延長 4 倍且能耗減半，最終可節省高達 43% 的總營運成本。

## 三、 建築設計、施工與維護的 IAQ 風險挑戰

### (一)安裝不良對於室內空氣品質的影響 — William Lane

澳洲現場經驗顯示，空調與通風系統若安裝不當，將顯著降低 IAQ 的改善效益。常見問題包含風管彎曲、接頭鬆脫、過濾裝置堵塞、系統維護不足等。此現象凸顯制度層面對安裝標準落實與技術人員專業培訓的不足，亦顯示最低價得標制度易導致施工品質不穩，為我國推動 IAQ 改善時應加以警惕。

## (二)建築環境中的濕氣、黴菌與設計疏失：微小決策的宏觀影響—Shelby Berg

1. **摘要：**高氣密性建築在提升節能效益的同時，也常伴隨濕氣滯留與黴菌滋生問題。整合環境微生物學與建築科學觀點，指出此問題源於微生物的強韌生存力、高氣密設計的物理悖論，以及設計、施工與維護階段的常見疏失。透過旅館、學校與醫療院所的案例分析，揭示微小決策如何引發巨大的健康風險。結論強調，應將濕氣管理納入建築全生命週期策略，並透過跨領域協作，打造節能與健康並重的室內環境。建築濕氣控制需納入早期設計考量，並以智慧監測與跨專業合作確保室內空氣品質。
2. **微生物的普遍性及其環境韌性**
  - (1) 真菌物種多達約 15 萬種，推估實際總數可能超過 400 萬種。其孢子廣泛分布於空氣中，建築空間難以實現「無菌」環境，控制策略應聚焦於限制其生長條件。
  - (2) 多數真菌具極高環境耐受性，能在火山、深海熱泉甚至車諾比核災區存活。例如：枝孢菌屬(*Cladosporium*)可抵抗高劑量輻射，顯示只要具備基本水分與養分，便能生長於建材表面。
  - (3) WHO2022 年發布的《真菌優先病原體清單》，煙麴黴(*Aspergillus fumigatus*)被列為「極重要」病原體，顯示其對健康風險已不可忽視。
3. **建築濕氣的來源與管理悖論**
  - (1) 人體活動如睡眠（每日釋出約 400 毫升水氣）、烹飪、沐浴與晾衣，均為主要濕氣來源。
  - (2) 高氣密性設計若無對應之機械通風系統，將導致濕氣滯留，形成「節能但不健康」的風險悖論。
  - (3) 在台灣等亞熱帶高濕環境中，開窗通風反可能提高室內濕度。HVAC 系統常處於「部分負載」運作模式，導致除濕效率下降，無法有效控制濕度。
4. **設計與施工疏失的案例原型分析**
  - (1) 旅館、集合住宅：排氣扇未配置對應進氣路徑，形成負壓，使排氣失效，濕氣集中於熱橋效應產生的冷凝點（如窗角、牆角），誘發黴菌。
  - (2) 學校、禮堂：HVAC 系統以滿載為設計依據，但實際多為部分負載運行，除濕不足。若因考量工程預算而調整設備規格，風險更高。
  - (3) 醫療院所：為節能調整 HVAC 設定，導致除濕效能不足，並在出風口、吊頂等清潔死角積塵結露，加速微生物孳生。

- (4) 材料熱特性不匹配：高熱質量的混凝土結構若搭配低隔熱的金屬窗框，易形成冷凝區，加劇濕氣累積與黴菌生長。

## 5. 結論與整合性解決方案

- (1) 濕氣與黴菌問題為多源性系統挑戰，應依建築用途、氣候區與使用習慣，量身設計整合性策略，不宜依賴單一技術。
- (2) 濕氣控制應與能源效率、結構設計、美學並列為設計核心，初期即納入材料選擇、熱橋分析與 HVAC 優化。
- (3) 促進建築師、機電設計與微生物專家的早期協作，提升預防性設計品質。
- (4) 推動具濕度感測、自動控制與維運回饋的智慧建築系統，導入性能導向之監測管理模式。
- (5) 建築應視為動態生態系統，其性能不僅關乎能源效率，更直接關聯居住者健康。將濕氣管理納入建築全生命週期設計與管理，已成為刻不容緩的任務。

### (三)建築外殼熱橋現象：對室內環境品質、能源效率及建築耐久性的影響分析 與對策 — Theresa Braunsch

1. **摘要：**熱橋（Thermal Bridge）會造成局部熱損、冷凝與黴菌滋生，並削弱結構耐久性，對建築能效與室內環境品質皆具負面影響。尤其在高效保溫建築（如被動式房屋）中，其相對影響更為顯著。透過熱影像、模擬分析與案例研究，說明熱橋的類型、機制與定量指標，並提出針對新建與既有建築的材料對策與節點處理原則。建議推動熱橋規範、高性能建材補助與技工教育，以實現兼具節能、健康與耐久性的建築品質。
2. **熱橋定義與機制：**熱橋指建築外殼中熱流集中區域，常見於材料交界、保溫中斷或轉角處，導致局部熱阻降低，成為熱損與冷凝的高風險點。
3. **類型與量化方式**
  - (1) 構造熱橋：如鋼樑、金屬件貫穿保溫層。
  - (2) 幾何熱橋：如牆角、屋脊等表面積突變處。
  - (3) 指標： $\Psi$  值（線性熱橋）： $W/(m \cdot K)$ ； $\chi$  值（點熱橋）： $W/K$ 。
4. **熱橋影響：**熱橋在高效隔熱建築中熱損可能占比達 30%；當內表面溫度低於  $12.6^{\circ}\text{C}$ （RH=58%），即有冷凝與黴菌風險；長期則可能導致建材受潮、結構劣化與維護成本上升。
5. **識別與模擬技術**
  - (1) 熱像儀（Thermography）可視覺化熱流路徑，協助現場檢測。

- (2) 模擬工具 如 WUFI® (Wärme Und Feuchte Instationär, 瞬態濕熱傳遞分析) 與 Flixo® 可用於節點熱橋模擬與冷凝預測, 有助設計階段預防與改進。

**6. 建築材料與設計對策**

- (1) 設計整合：預防性地導入熱橋分析於初期設計。
- (2) 建材選擇：使用 Schöck Isokorb® (熱斷橋型承重保溫元件)、結構保溫板 (SIPs)、三層玻璃、高效窗框等。
- (3) 節點處理：針對陽台、貫穿構造等高風險處，強化保溫連續性。
- (4) 既有建築：採用外牆保溫 (EWI)、內保溫或氣密修補作為補強手段。

7. **教育與施工落實**：有效熱橋控制仰賴技工理解設計意圖與節點處理技巧。透過簡化指引、現場示範與技能培訓，可顯著提升施工品質。

**8. 結論與政策建議**

- (1) 將熱橋計算與露點風險納入強制性規範。
- (2) 擴大高效保溫建材的補助與技術推廣。
- (3) 建立熱橋處理技工教育與認證制度。
- (4) 將室內環境品質納入建築性能驗證，強化交付監測。

**(四)被動式住宅中抽油煙機選擇對 PM<sub>2.5</sub> 濃度之影響與補充空氣策略分析—**

**Joel Seagren**

- 1. **背景說明**：在高氣密住宅中，抽油煙機的選擇對 IAQ 具關鍵影響。考量被動式建築通常配置熱回收通風 (HRV) 系統，設計階段即應整合污染控制與能源效率。完全平衡系統成本高，施工難度亦高，實務應用尚有限。
- 2. **污染物來源與健康風險**：烹飪時會釋放氣味、水蒸氣、PM<sub>2.5</sub>、VOCs 與 PAHs 等。PM<sub>2.5</sub> 可進入血液，無安全暴露門檻，應以風險最小化為管理原則。
- 3. **抽油煙機型式比較**

項目	再循環型	外排型
PM 控制效果	中位數約 30 µg/m <sup>3</sup> ， 回落需約 53 分鐘； 碳濾網效能會下降	中位數約 17.1 µg/m <sup>3</sup> ，20 分鐘內回落，有容錯性 (即使忘記開窗)
氣流速率影響	效果差異小	流速每增加 100 L/s，效率 增約 33%
裝置風險	無需補氣但難以有效 排出污染物	若無補氣，恐產生室內負 壓
系統考量	節能簡便	設計複雜，須平衡壓力與 補氣，寒區需考慮供暖負

		荷
污染擴散	易回流，甚至逆 HRV 氣流擴散	設計得當時，擴散風險較低

4. **補氣策略與負壓風險**：抽油煙機運轉（100 L/s）在 0.6 ACH 下可能產生 -50 Pa 壓差，超過德國 DIN（-8 Pa）與美國 IRC（-3 Pa）建議上限。補氣不足將導致燃燒器具廢氣倒灌、門扇開啟困難與設備壽命縮短。補氣方式如下：
- (1) 開窗補氣：具彈性但仰賴住戶操作。
  - (2) 非平衡風閘：易造成高負壓。
  - (3) 機械補氣系統：效果佳但成本高，雙向風閘開啟壓力達 65 Pa。
5. **實驗結果**：以多棟住宅煎蛋模擬（900W、7 分鐘、芥花油）並以 Sensirion SPS30 記錄 PM<sub>2.5</sub>，結果如下：
- (1) HRV 約 0.3 ACH 下，污染濃度可持續數小時超標。
  - (2) 外排型中位數約 17.1 μg/m<sup>3</sup>，20 分鐘內回落。
  - (3) 再循環型中位數約 30 μg/m<sup>3</sup>，回落需約 53 分鐘。
  - (4) 污染物可透過 HRV 系統擴散至其他空間。
6. **政策指引與設計建議**
- (1) 抽油煙機與補氣系統應納入設計初期規劃。
  - (2) 優先採用外排型，建議爐具距離為 50–60cm。
  - (3) 採「源頭控制 > 通風稀釋 > 過濾處理」之策略，HRV 濾網建議 F7+ 等級。
  - (4) 視建築是否配置燃燒器具，採平衡或單向補氣設計。
  - (5) 推動室內污染監測，建議使用低成本感測器。
  - (6) 寒冷區域補氣設計將增加 0.5–1.0 kWh/m<sup>2</sup>·年供暖負荷，應納入能耗評估。
7. **研究限制**：使用低成本感測器推估質量濃度，具一定變異性；尚未探討不同風速對 PM<sub>2.5</sub> 去除效率之直接關聯。
8. **結語**：高氣密建築中，抽油煙機選型與補氣設計對 PM<sub>2.5</sub> 控制至關重要。再循環型雖具能源優勢但效能有限，外排型搭配補氣機制可更有效保障 IAQ。建議建立抽排與補氣一體化設計原則，推動可監測、可操作的政策架構。

## (五)分離式空調系統之隱形污染與健康風險 — Panel Discussion

1. **摘要**：分離式空調系統內部濕潤、封閉、富含有機物的環境，極易形成黴菌、細菌及其生物膜(biofilm)，成為室內微生物污染的溫床。生物性氣膠不僅引發過敏、氣喘與慢性發炎反應症候群，同時也會降低熱交換效率，導致能源損耗。有效管理策略應從「被動清潔」轉向

「主動預防」，以 UVC 滅菌為核心，結合專業清潔、使用者維護與建築濕氣管理，將空調從污染源轉化為健康空氣的供應端。

## 2. 污染生態與雙重風險

- (1) 微生物生態：冷卻盤管於降溫除濕時產生冷凝水，結合空氣中的皮屑與塵埃，形成潮濕、密閉且營養豐富的环境。單台設備中微生物附著面積可達 4 平方公尺，常以抗清潔的生物膜形式存在，持續釋出污染物。
- (2) 健康衝擊：呼吸道過敏與氣喘惡化、長期高濃度暴露恐引發慢性發炎反應症候群，已有職業病例報告。
- (3) 能源效能衰退：生物膜形成阻礙熱傳導與氣流，導致壓縮機與風扇功耗增加、系統長期運轉效率下降，能耗上升。

## 3. 風險管理策略：分層控制體系

- (1) 基礎維護：使用者應定期清洗濾網，避免有機物堆積、對於生物膜污染，需進行標準化的專業深層清潔，如濕洗（Wet Wash）。
- (2) 工程控制：安裝 UVC 滅菌裝置，直接照射冷卻盤管，有效破壞微生物 DNA/RNA、搭配「乾燥模式」、「閃流放電」等內建技術輔助污染抑制。
- (3) 建築整合：控制濕氣源頭提升外殼氣密性、平衡室內壓差、預除濕外氣，將空調視為建築整體的一環，系統性解決濕度積累問題。

## 4. 結論與行動建議：空調污染管理應從傳統清洗思維，轉向以工程技術與建築設計為核心的預防模式，強化整體室內環境品質與健康保障。

- (1) 行動建議：
  - a. 風險導向法規：建立分離式空調衛生狀態分級管理架構，特別針對醫療、教育等高敏感場所設定強制規範。
  - b. 專業制度建立：推動空調深層清潔之技術指引與人員認證機制，並鼓勵 UVC 等主動預防技術納入標準設計。
  - c. 公眾教育強化：透過宣導資源，提升使用者對空調衛生與健康的認知與自主管理能力。
  - d. 支持前瞻研究：持續投入資源於生物性氣膠暴露與健康效應的量化研究，建立政策與標準制定的科學依據。

## 陸、心得與建議

本次會議主題包含室內空品污染物傳播模式、監測及淨化設備、室內空品建議值適用性探討並於會議中報告臺灣室內空品政策及未來方向、半定量室內空氣品質評核方法的建立與應用。相關會議結論及建議如下：

- 一、應將 IAQ 管理貫穿建築的全生命週期，從源頭的綠建材與低逸散設計，到施工安裝的品質確保，至營運階段的數據化、智慧化維護管理，建立一個可驗證、可追溯的完整連結。
- 二、除了考量場所類型與停留時間，應導入「主要風險污染物」的思維。例如，新裝修場所的管制重點應為甲醛；交通樞紐周邊應側重 PM<sub>2.5</sub> 與 NO<sub>2</sub>；而高密度人員聚集場所則以 CO<sub>2</sub> 作為通風效率的動態管理指標。基於科學證據的風險導向管理模式，將比傳統分類法更加精準、有效，並能引導業者將資源投入在關鍵改善項目上。
- 三、相關技術指引中明確定義 CO<sub>2</sub> 的角色為「觸發通風或淨化設備的代理指標」，而非「衡量空氣潔淨與否的健康指標」。如此可避免管理系統僅因 CO<sub>2</sub> 數據正常，而忽略了 PM 或揮發性有機物超標的風險，並能預防為降低 CO<sub>2</sub> 而過度通風，反而導致高濕度與黴菌問題。
- 四、推動從傳統依賴「通風稀釋」的單一思維，提升至鼓勵「通風、過濾、淨化」等多重技術整合的「等效潔淨空氣」績效管理模式，尤其應優先導入於醫療、教育及長期照護等高風險公共場所。參考 ASHRAE Standard 241 的核心精神「等效潔淨空氣率」性能要求，鼓勵透過高效過濾、UVC 殺菌等多重技術組合，達成實質的病原體去除效果。建立「感染風險管理模式」的應變計畫，提升應對未來新興傳染病的社會韌性，將被動管理思維轉化為主動預防框架。
- 五、建議研議國內法規與國際標準接軌，並強調 IAQ 改善與節能減碳的協同效益。例如，採用低壓損的高效率濾網（如 ISO 16890）、在高氣密建築中規範外排式廚房抽油煙機需搭配熱回收功能(HRV)或獨立補氣設計、建立建築濕度控制與防止熱橋冷凝的設計要求。藉此化解改善 IAQ 即耗能的迷思，創造健康與節能雙贏局面。

- 六、強化專業人員職能，建立系統性診斷與管理能力，培訓課程內容應強化學員對建築科學、空調系統（HVAC）原理、氣流路徑分析等「系統性診斷」的知識。並讓「共同設置專責人員」的彈性措施發揮實質效益。
- 七、推動將空氣淨化設備與低成本的 IAQ 感測器進行整合。此模式利用 PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub>、人流量等作為替代指標，建立「觸發型」的自動化淨化系統，當監測到室內空氣品質惡化時便自主啟動，降低對場所專責人員依賴，將其職責簡化為定期的濾網更換，確保防護不因人為疏忽而中斷，達成真正的自主管理。
- 八、參考澳洲維多利亞州的「清新室內空氣路徑計畫」模式，啟動本土的示範性試點計畫。優先於敏弱族群聚集場所，小規模導入此類自動化監測與淨化設備，以科學化方式，評估其在台灣的成本效益、民眾接受度與大規模擴散的可行性。藉由實證數據分析改善前後差異，作為未來政府研修法規、制定技術指引及擴大公告場所範圍的關鍵基礎資料。