

論文

作業環境二氧化碳監測結果應用探討

陳春萬¹ 吳至涵¹ 杜宗明¹ 陳俊瑋¹

¹ 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

摘要

研究目的為透過實際測定數據來探討二氧化碳監測之意義與應用，並結合法規與文獻探討二氧化碳監測之預期意義。依據職業安全衛生法要求，事業單位在作業場所必須進行二氧化碳濃度監測，就現有二氧化碳監測要求規範下，事業單位如何進行二氧化碳監測並將監測結果轉化為有意義的數據提供作業環境管理參考。研究方法將透過特定場所及模擬實驗暴露腔進行長時間監測二氧化碳濃度變化，依據二氧化碳濃度隨時間變化情形，檢討二氧化碳監測時應注意事項，最後再依據監測數據及文獻資料，探討如何應用監測結果來改善作業環境。研究結果發現二氧化碳監測數據會受時間與空間之影響，應該擬定適當監測策略，才能顯示環境中有意義的二氧化碳濃度狀況。而常見之二氧化碳監測數據為監測人員呼氣所產生之二氧化碳於環境中累積情形，文獻顯示最高濃度約為3,300ppm，平均濃度約為2,250ppm，發生在學生上課教室內。二氧化碳監測數據不應只應用於「勞工暴露狀況評估」，除非作業場所在人員呼氣外仍有其它二氧化碳發生源，二氧化碳監測結果連結於容許濃度標準才有意義，事業單位也應將二氧化碳監測數據應用於「掌握勞工作業環境實態」之另一目的，應用此來管理作業場所通風換氣狀況，若超過設定濃度，就應該對作業場所之換氣狀況進行評估改善，符合作業場所對於新鮮空氣換氣之要求。

關鍵字：二氧化碳、作業環境監測、新鮮空氣換氣率

民國 104 年 2 月 12 日投稿，民國 104 年 2 月 12 日修改，民國 104 年 5 月 5 日接受。

通訊作者：陳春萬，勞動部勞動及職業安全衛生研究所，電子信箱：wann@mail.ilosh.gov.tw。

前言

就有害物預防規則而言，一般先確認是否使用或產生有害物，進而採取適當措施，最後再採取評估方式，以確認是否低於容許濃度。

二氧化碳 (carbon dioxide, CO₂) 是一種有害物，作業場所的二氧化碳來源為燃燒 (含引擎) 或製程的副產品，也有部分製程必須使用二氧化碳當作原料或介質，例如：使用燃燒加熱、使用柴油引擎、有化學工業之氧化反應、有發酵反應等作業場所都有可能產生二氧化碳副產品；而碳酸汽水廠、生物產業培養箱等都可能使用二氧化碳。這些狀況下作業場所若無適當控制，CO₂濃度可能很高，將可能超過影響人體健康之CO₂濃度。CO₂來源除了作業場所使用原料及製程之副產品外，作業人員呼吸所產生二氧化碳也可能會影響到環境二氧化碳濃度，是否進一步影響人員健康，並無明確文獻。

對於CO₂之監測，預期會受到許多人之重視，因為依據職業安全衛生法 (已下簡稱職安法) 勞工作業環境監測實施辦法要求，事業單位在特定作業場所必須進行二氧化碳濃度監測[1]，二氧化碳一般使用直讀式儀器來進行監測，執行困難度不高，監測機構應該都會要求及協助事業單位進行監測。而法規要求進行CO₂監測之作業場所為設有中央管理方式之空氣調節設備之建築物室內作業場所，將隨著產業的發展及作業人員對環境的要求而增加，室內作業場所大多有空調，不少採用中央空調方式進行，依據職安法都需要進行CO₂監測。再者職安法修法適用所有產業後，新適用之產業 (如服務業) 之作業場所可能都是設有中央空調之室內作業場所，也都需要進行CO₂監測。另一方面，除了職安法之CO₂監測要求外，室

內空氣品質要求、溫室氣體議題等也都讓人關注CO₂濃度問題。對於作業場所CO₂監測問題將會受到更多之重視。

二氧化碳監測允許使用直讀式儀器來進行監測[1]，可想像CO₂監測只會測定特定時間及位置，將此CO₂濃度監測數據來代表作業場所整體CO₂狀況，可能失於偏頗。過去勞動部勞動及職業安全衛生研究所 (已下簡稱勞安所) 為了解作業場所CO₂濃度與通風換氣關係，曾測定一般辦公區域之CO₂濃度[2]，每個監測空間監測10點，約每5~8平方公尺監測一組數據，連續監測25秒取其平均，上下午各監測一次，部分場所監測數據平均、標準差與其比值整理如表1，不同位置監測數據標準差約為平均之3-5%，部份高達10%。案例2與3上下午監測數據差異超過100ppm。若依此數據說明作業場所CO₂狀況，可能會受到質疑，特別是接近讀者所設定之CO₂濃度值時 (如1,000ppm)。當然此監測數據屬研究性質，監測人員為通風研究人員，未取得合格之監測人員資料，並無相當之作業環境監測訓練與考照。

表1 作業場所CO₂監測數據整理[2]

空間 案例	平均每人 所占空間 m ³ /人	上午			下午		
		平均	標準差	標準差/ 平均	平均	標準差	標準差/ 平均
1	13.6	1070.2	35.7	3.3%	1099.0	54.7	5.0%
2	14.7	960.4	29.2	3.0%	1072.0	91.5	8.5%
3	25.1	719.6	50.8	7.1%	981.0	27.6	2.8%
4	17.4	612.8	30.6	5.0%	600.8	22.1	3.7%
5	16.9	541.7	42.1	7.8%	617.3	58.5	9.5%

類似此實際作業場所監測結果，監測時作業場所並未限制人員活動與進出，也只監測上下午各特定時間，由於不確定因素太多，所以二氧化碳非常難達到平衡，報告雖已記錄空間大小與監測當時室內人數，但未監測換氣狀

況，因此數據使用於環境管理有其限制。

CO₂監測有其影響因素，例如每位人員所佔空間大小、空間換氣狀況（含換氣量與混合狀況等），本研究為了解換氣率與CO₂狀況，利用案例2與4空間非使用時間（下班後），進行通風換氣監測，結果如表2。進氣量監測計算之通風量每小時換氣次數（Air Change Per Hour, ACH）為6.0與6.8，但是實際採用追蹤氣體監測所計算之ACH僅為1.5及3.2，為了解空間內障礙物影響CO₂累積與分布情形，設計實驗驗證CO₂濃度受障礙物影響，障礙物阻礙越多部分區域CO₂累積嚴重，致使平均換氣率會下降，當然也會受到進風口與出風口位置之影響[2]。

表2 作業場所通風狀況與換氣率數據[2]

空間案例	進氣監測之總進風量(m ³ /hr)	室內空間容積(m ³)	進氣量監測計算之ACH	追蹤氣體監測計算之ACH
2	1326	219.9	6.0	1.5
4	586	86.7	6.8	3.2

作業場所CO₂濃度會隨著時間及空間而變化，一般都是假設監測數據為平衡狀況下之CO₂濃度，依此來探討空間與通風會影響CO₂濃度狀況，但是實際狀況為何，需透過研究一段時間連續監測CO₂濃度，包括特定場所及模擬實驗箱，藉由特定環境CO₂濃度隨時間變化情形，探討CO₂監測時應注意事項。

CO₂監測結果應用常受到質疑，職安法要求事業單位應建立含採樣策略之作業環境監測計畫來落實CO₂監測目的[1]。以擬定策略有效推估勞工作業時間內實際暴露狀況，以減少使用CO₂監測數據以掌握作業環境實態之目的，可降低不必要得成本。例如多點採樣代表整體作業場所，監測特定時間來表示環境CO₂濃度已達穩定的情況，依此假說推測CO₂直讀式儀

器監測數據可代表勞工暴露狀況，但較少人利用CO₂數據建立相關策略應用，掌握環境實際狀態並提供環境管理參考。研究依據監測數據及文獻資料，探討CO₂監測之預期意義，探討現有CO₂要求規範下，事業單位如何進行CO₂監測，是否能夠應用CO₂監測數據改善作業環境狀況。

文獻回顧

1. 文獻上CO₂監測數據

由於室內空氣品質法於100年公布實施，其中規範二氧化碳八小時平均容許濃度為1,000ppm[3]，室內二氧化碳濃度如果太高將會對人體造成危害，因此近年來有許多關於室內空氣品質（Indoor Air Quality, IAQ）之二氧化碳的監測。

環境中CO₂監測數據最多為醫院監測數據，病患人數多寡對於醫院CO₂濃度影響很大，一般在門診區或特殊病房之特定時間會有較高CO₂濃度，當然也與醫院空調設計有關[4-7]。例如於某一醫院新院區CO₂平均940ppm，舊院區平均1,200ppm[5]。又例如南台灣某一所區域教學醫院，CO₂濃度分別如下所述，病房(1,273.8±36.7ppm)、加護病房(1,063.8±88ppm)、血液透析室(1,453.8±89ppm)、復健科(1,015±56.3ppm)、病歷課(1,012.5±41ppm)、批掛課(1,392.5±12ppm)[7]。

CO₂監測濃度較高之場所為車廂與教室內，應該都是短時間有許多人聚集一起，每個人所佔空間較少，若無有效的對外換氣，CO₂將會嚴重累積。實際在台北捷運、公車、長途客運之車廂內監測CO₂濃度範圍為1,257~2,330ppm[8]，而另一研究在長途客運量測CO₂

濃度甚至高達3,000ppm[9]。

教室CO₂較容易累積，但是在一般教室不會太嚴重[10,11]，係因一般教室採開窗方式通風CO₂，但冬季就可能超過1,000ppm[11]。若是採用空調方式之圖書館、電腦中心、演講廳等CO₂累積就較為嚴重[11-14]，例如在某大學7間授課教室監測結果，有3間教室平均超過1,000ppm，最高濃度都超過3,000ppm，最高達3,268ppm[13]，3間教室都是坐滿學生，每位學生所佔面積為1-2.6平方公尺。另有研究在中小學電腦教室進行CO₂監測，連續監測數據可知CO₂濃度隨著學生進入教室開始增加，下課後下降，監測之10間教室，只有一間有段時間CO₂濃度變化不大（達到平衡狀況），有5間教室CO₂平均濃度超過1,000ppm，其中2間高達1,929及2,248ppm，二間教室都有冷氣，顯然對外換氣量不足，該研究實際監測某一教室，增加排風扇後平均濃度由2,200ppm下降為600-800ppm[14]。

在一般場所監測二氧化碳之濃度一般都不高，例如在辦公大樓監測CO₂濃度來看，大部分都低於1,000ppm，該研究也指出所監測之中央空調室內場所，有效換氣率平均約為50.5%，範圍在35-65%之間[15]。較為特殊的情況為餐廳監測結果，分別監測各6家的火鍋店、牛排店、燒烤店、速食店，只有2家火鍋店CO₂平均濃度超過1,000ppm[16]，餐廳場所除了呼吸之CO₂外，還有瓦斯爐等可能產生CO₂之危害源，此類場所也許更應謹慎管理。

2. CO₂監測濃度探討

由研究實際監測數據及台灣一般室內場所監測數據可知，CO₂濃度超過3,000ppm文獻較少，文獻上所測得最高濃度為3,300ppm[13]，平均濃度最高為2,250ppm[14]，較常發生在授

課教室內，乃短時間聚集許多上課學生且通風換狀況不良所致。CO₂監測結果不但可以應用於判斷是否超過勞工作業場所容許暴露標準[17]，也能應用於評估通風換氣的標準，這將能夠使CO₂監測結果發揮最大效用。在1996年NIOSH一篇健康風險評估報告中就提到在一家運動醫學與整型醫院監測手術頭罩內CO₂濃度[18]，每一種頭罩類型平均都超過5,000ppm，最高達11,700ppm，就單一次測定來看，部分狀況低於5,000ppm但最高達28,500ppm，不過該研究也監測人員所在之室內場所，CO₂僅400-600ppm。職安法要求在設置有中央管理空氣調節設備之建築物室內作業場所必須監測CO₂[1,19]，乃是害怕人員呼出的二氧化碳及有CO₂逸散源逸散加上因通風不良造成CO₂嚴重累積，危害到人體。

本研究於歐美主要安全衛生機構網站搜尋結果發現，英國（HSE）、日本（厚生勞動省）、美國（OSHA及NIOSH）都有CO₂暴露限值設定，各國設定之8小時時量平均（Long-term exposure limit (8-hr reference period) 暴露限值都是如HSE所設定之5,000ppm（工作場所暴露限值，Workplace exposure limits, WELs）[20]，也就是作業場所若有CO₂逸散可能且未適當控制，這些機構認為仍可能使工作者超過暴露限值，可能造成傷害，因此仍需進行監測。

CO₂逸散源可能不只是人員呼氣之CO₂，可能還有其他危害源，OSHA網站就提出運送罐裝CO₂人員因CO₂外洩、冰箱維修人員因冰庫內乾冰揮發等造成CO₂過度暴露之職業災害案例。在OSHA網站提到CO₂為美國體積量第23多之化學物質，可能造成暴露之場所有碳酸飲料、碳酸、滅火器、氣霧罐、爆炸物等製造廠，在污水處理設施、焊接保護、冷氣機組、油井的酸化和分離、溫室生長促進等也會使用

CO₂，釀酒、植物發酵、石灰窯、氨氣生產、燃燒、麵包店、穀物倉庫、發射井、潛艇、潛水作業、礦業等作業很可能會產生CO₂副產品，這都有可能造成CO₂濃度嚴重累積並超過管制標準[21]。

在NIOSH之CO₂建議容許濃度（REL）製定說明書中就提到實際測定文獻很少，曾有報告於啤酒釀造作業、草料儲槽內、漁船漁艙內等特殊場所有可能累積高濃度CO₂，實際測試數據啤酒釀造廠作業場所，5天連續監測啤酒釀造作業場所的勞工暴露之CO₂濃度，8Hr-TWA為1.08%（最高1.95%），3分鐘平均最高8%，6分鐘平均最高6.5%。在儲筒內草料上方30公分處，因自然發酵6天後CO₂濃度最高78%，上方5尺濃度為3%，但使用風扇吹散草料儲筒之CO₂，只要13分鐘濃度就由78%降為13%，另一篇報告指出在放草料2天後，儲筒內CO₂濃度為30-40%；而漁船回港打開魚艙時，CO₂濃度為1-40%[22]。

在HSE網站也提出在CO₂壓縮儲存工廠、工廠內CO₂管線、潛水員空氣呼吸器、室內燃燒等，都可能暴露高濃度CO₂，特別是HSE提到大型電廠因應氣候變遷議題，採取將CO₂捕集並壓縮儲存以減少排放，若意外洩漏將會造成嚴重傷害，因此HSE提出檢討報告，推測可能意外及預防方法。該報告中引用美國EPA所收集整理資料，自1975年到2000年，共有51件消防CO₂系統意外洩漏造成之嚴重意外事件，造成72人死亡，145人受傷。類似案例也曾在台灣發生過[23,24]。

上述狀況可能會產生高濃度之CO₂，確實需要採取適當措施降低CO₂暴露，也需要採取監測措施，確保暴露低於容許濃度。對於CO₂監測之應用，文獻搜尋國外主要安全衛生機構網站上，除了危害預防管理之容許濃度外，也

提到環境管理之建議濃度及應用於緊急應變之警告濃度二種。

關於環境管理之建議濃度，有網站指出CO₂超過1,000ppm就應該注意通風，例如OSHA網站也介紹CO₂監測應用於室內空氣品質[25]，該技術指引提到，CO₂可當作是室內其他有害物之指標，CO₂監測為初步篩選工具，可判斷是否供應足夠之新鮮外氣與室內環境中新鮮外氣是否均勻分布。提到若二氧化碳濃度超過1,000ppm就表示室內換氣率不夠，可能會增加頭痛、疲勞和眼睛喉嚨不適等抱怨情形，因此建議設定1,000ppm為二氧化碳濃度上限，但也表示超過此限制並不表示該建築物空氣就有危險性，人員不可以在此環境下工作，而是低於此濃度限制，有助於提高大部分室內人員的舒適性。

關於緊急應變之警告濃度，在HSE網站有一研究探討應用CO₂與CO數據監測使用燃燒器之室內場所[26]，也就是應用為警告限值(alarm levels)，於可能產生毒性氣體之評估，當CO₂或CO濃度超過一定限制時，代表燃燒器效率需要調整，不然可能會有CO累積情形，也就是在CO急速累積前採取措施避免可能危害。該研究引用英國BS7967-5(2010)-可攜式燃燒氣體分析儀測定非住家中使用燃燒爐時測定一氧化碳和二氧化碳之指引，建議若CO超過10ppm或CO₂超過2,800ppm時，就應該採取適當管理措施，包括：

- 1.應再進行風險評估。
- 2.燃氣和燃油燃燒器具應關閉，在可行條件下，和不必要的電器隔離。
- 3.人員應該從受影響的空間疏散。
- 4.在可行情況下，打開門窗引進新鮮外氣。

國內過去曾有實際監測在使用瓦斯熱水器之門窗密閉房間之CO₂、CO及O₂濃度[27]，

連續測試數據可知，CO₂快速上升，每分鐘約上升3,300ppm，而CO初期上升很慢，約在20-40ppm會有一個反轉而快速上升，研究中所使用之瓦斯熱水器較一般燃燒效率較高，主要廢氣為CO₂，當O₂濃度太低時，燃燒效率變差CO才會快速上升。

研究方法

本研究為了瞭解CO₂長時間下累積情形，在特定場所及模擬實驗箱，進行長時間CO₂監測，透過連續監測數據了解環境因素對CO₂濃度之影響。監測儀器為TSI 982，偵測範圍為0-5,000ppm，監測前儀器送至通過ISO 17025之校正實驗室校正。並利用儀器紀錄系統進行長時間CO₂濃度紀錄。測定場所包括會議室、餐廳、辦公室及行駛轎車內。研究模擬實驗箱規格為0.91公尺（m），0.79m，0.60m，體積0.431立方公尺（m³），實驗時利用CO₂鋼瓶產生CO₂，設定每分鐘30、60、90、120毫升，利用壓縮空氣系統（空氣來源戶外新鮮空氣）供應新鮮空氣，設定每分鐘30、40、50公升，氣體流量以質量流量控制器控制，實驗前以乾式流量校正器校正系統流量，將二氧化碳及壓縮空氣打進模擬實驗箱，並使用二氧化碳偵測儀偵測模擬實驗箱內的二氧化碳濃度變化。

本研究探討CO₂監測之意義及可能應用，透過文獻整理以瞭解台灣CO₂的監測狀況，並至先進國家安全衛生網站搜尋有關CO₂之相關資料，了解各國家對於CO₂安全衛生的關注及對於CO₂監測要求。本研究最後就法規、各國規定、監測數據等，探討國內對於CO₂監測之要求意義，並探討職安法下，事業單位如何要求進行CO₂監測及如何應用監測數據來提供作業環境管理之參考。

結果與討論

1. 長時間CO₂監測數據

研究在特定場所長時間監測CO₂濃度，就此了解CO₂隨時間變化情形，在辦公室、餐廳包廂及轎車內特定點（定點）監測結果如圖1，CO₂濃度會隨著室內環境條件及人員暫留狀況不同而改變。1-A狀況為一般有中央空調的大辦公室，約40人在4,800m³空間上班（約120m³/人），上班1小時後CO₂濃度約達平衡。1-B狀況為獨立小辦公室，空調為分離冷氣機，2人在約36m³空間上班（約18m³/人），第2人進入辦公室後約30分鐘濃度偏高並達平衡。1-C狀況為餐廳獨立包廂，空調為分離冷氣機且有3部電風扇輔助通風，20人在約240m³空間用餐（約12m³/人），用餐人員分批進入包廂，進入後約20至30分鐘達到平衡，穩定濃度達1,400ppm。1-D狀況為乘坐3人之休旅車（空間估計寬1.8m、高1.1m、長2.7m，估約1.8m³/人），換氣為冷氣內循環，車內原有1人，另2人進入車內時帶入CO₂監測儀器，CO₂濃度急速上升，5分鐘就高達2,600ppm（約上升1,000ppm），仍未達平衡。由這些CO₂連續數據來看，空間內CO₂濃度將隨著不同狀況而改變，若只監測特定時間之CO₂濃度，將可能低估或高估CO₂濃度。

另研究在二間會議室進行CO₂長時間監測，空間都是約300m³，結果如圖2，狀況2-A為開窗代替冷氣，有9人開會，狀況2-B為中央空調冷氣，有10人開會，二種狀況人數都不多，CO₂濃度都不高，狀況2-B之CO₂累積明顯高於狀況2-A，推測應是空調方式之影響，中央空調冷氣作用下限制了通風換氣狀況，造成CO₂累積。狀況2-C有30人聽演講以開窗代替冷

氣，狀況2-D為有50人聽演講並使用分離式冷氣機，二者人數都很多，CO₂累積非常明顯，狀況2-C約60分鐘後達到平衡約1,000ppm，狀況2-D雖然已經110分鐘CO₂濃度仍未達平衡，最高達2,500ppm。

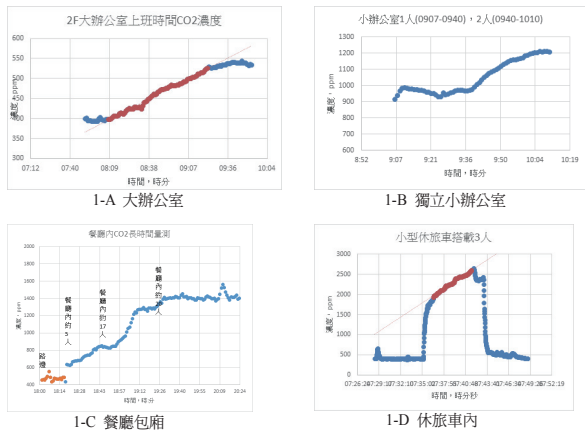


圖1 特定場所長時間監測CO₂濃度變化情形

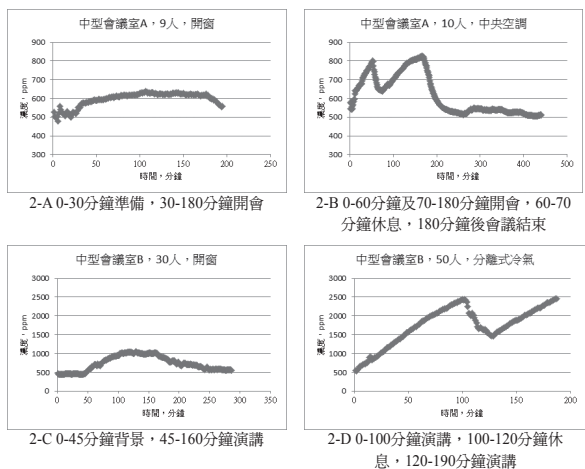


圖2 會議室CO₂濃度變化情形

由實際監測數據來看，CO₂濃度會隨著時間而改變，隨著人員進入作業場所後，CO₂濃度將隨著時間增加而增加，最後達到平衡，平衡濃度會受作業場所通風換氣狀況及內部人數之影響。平衡濃度為一般對於CO₂監測結果之認知，但是由長時間監測數據來看，要能顯示平衡狀況，應該要有適當監測策略，特別是高累積狀況，若只是針對特定時間進行監測，應

無法判斷是否已達平衡，其所代表意義有限，以此來評估環境狀況不是很恰當。建議應該增加監測之時段，理想上應以直讀式儀器全程監測勞工在作業環境下工作，實務上則監測二次以下，時間間距10分鐘以上，建議數據差異太大，應該增加監測次數且應將所有監測時間及濃度數據都呈現，以提供判斷之參考。

2. 模擬實驗監測數據

模擬實驗箱通風量及CO₂產生量實驗條件如表3，表中數據為校正後之流量，換算ACH為4.7-7.6。A50空氣流量下CO₂累積數據如圖3，隨著CO₂流量增加（C30增加至C120），最後平衡濃度增加。而CO₂流量為C120時，改變空氣流量（換氣率）下CO₂累積數據如圖4，隨著空氣流量降低，最後平衡濃度增加，達到平衡時間也稍微增加，A30狀況下平衡濃度高達4,500ppm。將C30、C60、C90、C120狀況在不同空氣流量下CO₂濃度變化情形整理如圖5，最後平衡濃度會隨著CO₂及空氣流量改變而改變，如前所述，隨CO₂流量增加或空氣流量減少而增加平衡濃度。測試結果符合學理之原則，二氧化碳釋放量與模擬實驗箱內二氧化碳濃度與背景濃度差值成正比；換氣比率越高則濃度越快達到穩定，換氣比率增加也使得二氧化碳濃度與背景濃度差值降低。對於理論之探討將於另篇論文中探討。

表3 作業場所CO₂監測數據整理

CO ₂ 代號	流量(mL/min)	空氣代號	流量(m ³ /min)
C30	36.3	A30	33.5
C60	67.8	A40	44.5
C90	100.1	A50	54.5
C120	131.6		

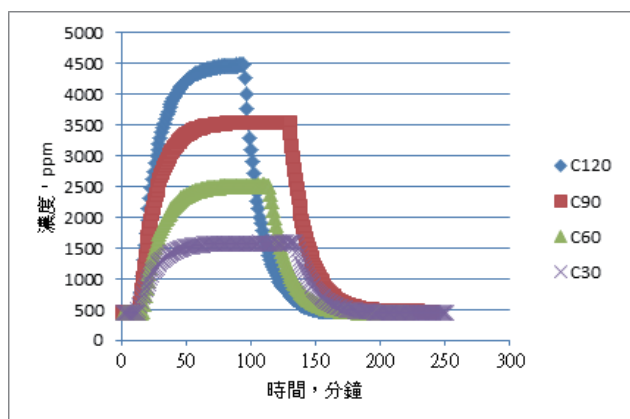


圖3 空氣流量A50時不同CO₂流量CO₂濃度變化圖

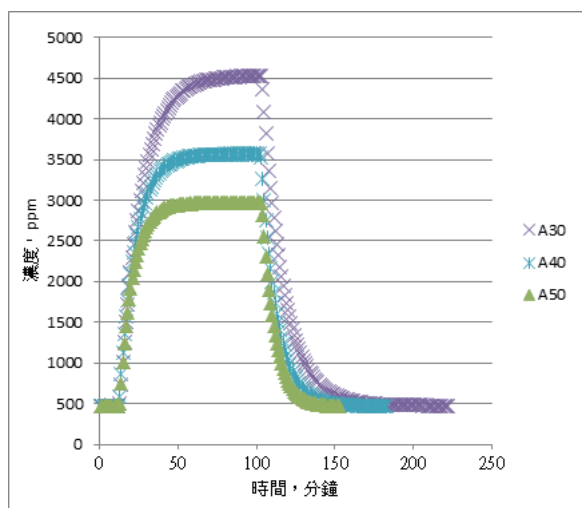


圖4 C120下改變空氣流量時CO₂濃度變化圖

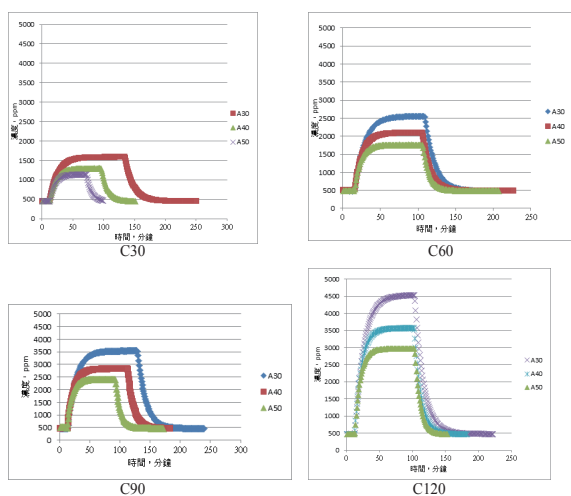


圖5 改變空氣流量下CO₂濃度變化圖

模擬實驗可知，CO₂產生量與空氣換氣率會影響平衡濃度，換氣率則影響達到平衡時間，而模擬空間小換氣率高，因此達到平衡時間非常迅速。受限於現有設備，實驗並未繼續測試更極端之狀況，現有系統採用純CO₂，流量為每分鐘500毫升，並以流量控制器控制流量以進行實驗。實驗所能控制之C30條件依比例推測可模擬個人空間為3.6m³下呼吸狀況（實驗箱0.431m³，一般人CO₂產生量為每分鐘300ml計算（潮氣容積為500ml，每分鐘12次，呼氣CO₂濃度5%計算），一般場所個人所佔空間應都大於此狀況（轎車內狀況較為特殊），CO₂平衡濃度應會較低，若是降低換氣率，平衡濃度將會增加。未來將繼續透過實驗或電腦模擬來評估達到平衡時間之影響因素及何種條件下平衡濃度才會超過5,000 ppm。

3. 我國CO₂監測規定之探討

台灣職安法係為防止職業災害，保障工作者安全及健康所制定，為防止勞工因作業場所所有害物所引起之危害，雇主應確保勞工有害物之危害暴露低於有害物容許濃度標準；該法也規定指定之作業場所，要求雇主進行作業環境監測[19]。

就危害預防觀點，CO₂為作業場所可能危害物質，應該避免造成勞工傷害，因此作業場所可能產生CO₂逸散時，應該採取適當措施，降低可能風險，並進行CO₂監測，了解是否意外洩漏或是逸散累積超過危害濃度，監測結果可應用於意外洩漏之緊急應變或是逸散累積之控制措施改善等。職場上大量CO₂意外洩漏，可能造成嚴重傷害，因此各國莫不警告事業單位注意此危害，台灣也發生過數起CO₂大量洩漏之意外，也曾呼籲事業單位注意防範，事業單位應該遵守局限空間安全操作規範，避免

意外並採取適當緊急應變措施。對於CO₂逸散累積超過危害濃度，台灣與先進國家一樣定有八小時日時量平均（8Hr-TWA）容許濃度標準（PEL；Permissible Exposure Limit）5,000 ppm[17]，也就是要確保勞工暴露不可超過此濃度。我國職業衛生管理對於CO₂之監測要求，一般認知就是依此策略擬定，也就是CO₂之監測有其必要性，屬於職業衛生監測計畫之一環。

台灣規定必須進行CO₂監測之場所為「設置有中央管理方式之空氣調節設備之建築物室內作業場所」[1]，推測可能原因有四：

1. 監測之目的為評估特殊狀況下勞工暴露狀況：CO₂危害性較低，容許濃度標準為5,000ppm，中央空調場所換氣狀況較差（空調之室內場所一般不開窗，概念上屬於通風不充分之場所）可能超過此濃度。
2. 推測可能有大量CO₂逸散：如CO₂是一種產業界大量使用之化學物質，而且部分製程也會產生CO₂廢氣，當相關作業場所可能有大量CO₂逸散時，應該採取適當措施並進行環境監測，來確保工作者不會過度暴露CO₂。雖然有CO₂逸散之作業場所也須進行監測，以確保低於容許濃度，保護作業勞工的安全[17]。
3. 監測之目的為掌握勞工作業環境實態：人員呼吸所產生之CO₂常被當作是室內場所換氣狀況之指標，也就是可當作是環境管理之建議指標，利用CO₂容易監測之特性，當作作業場所之初步篩選條件。依規定作業場所必須要有適當之新鮮空氣換氣[28]，空調之室內場所無法使空氣充分流通，依規定必須達到適當新鮮空氣換氣標準，透過CO₂監測數據可呈現是否已達到所要求之換氣標準。
4. 監測數據應用於警告指標：環境中另一種

CO₂可能來源為燃燒廢氣，而燃燒廢氣伴隨CO₂及CO，CO低濃度就可能產生危害，低濃度監測較容易受環境影響，因此可透過CO₂及CO之監測來評估燃燒廢氣是否逸散至室內場所，在HSE研究報告[26]有此概念之作法。而在日本作業環境測定基準規定中，中央空調之建築物室內作業場所必須監測CO、CO₂、室溫及外氣溫濕度[29]，推測概念上應該也是如此，日本冬天必須使用暖氣，暖氣來源為燃燒爐加熱，若管理不當很可能產生高濃度CO造成傷害，因此必須進行室內外溫度、濕度、CO及CO₂之監測，當作是否燃燒廢氣影響室內場所之警告指標。

透過CO₂監測數據掌握勞工作業環境實態，應用此來管理作業場所通風換氣狀況。依此應用所連接之參考標準就不是PEL，而應該另外構思其他參考標準，例如新鮮換氣需求[28]。未來研究將繼續探討CO₂累積狀況與現階段新鮮空氣換氣要求之關係，透過模擬來探討在設施規則新鮮空氣換氣要求下，CO₂累積情形及符合此要求下可設定之管理標準。在未確定符合職安法之換氣需求之管理標準前，建議可先參考IAQ設定值，平均若超過1,000ppm就應該對於作業場所之換氣狀況進行評估，了解新鮮空氣換氣是否符合要求，進而了解換氣率及有效換氣率等並使用來管理作業場所環境[15]。

結論與建議

CO₂監測仍有其必要性，法規也有相關規定，但應用性應該不是只連接於容許濃度標準。若製程上有可能產生CO₂逸散，則監測可連接於容許濃度標準而應用於危害預防管理參考，但只有人員呼氣之CO₂，監測數據可應用於法規「掌握勞工作業環境實態」之目的，

應用此來管理作業場所通風換氣狀況，環境管理之建議濃度在仍未釐清與職安法通風換氣關聯前，可先參考IAQ設定，平均超過1,000ppm就應該對於作業場所之換氣狀況進行評估，了解新鮮空氣換氣是否符合要求。而進行監測時應注意CO₂濃度會隨時空變化而變化，應該擬定適當策略，真實的顯示室內作業場所平均之CO₂濃度，才能呈現更多環境狀況而應用於環境管理。

誌謝

本研究承蒙勞動部勞動及職業安全衛生研究所103年度研究計畫（ILOSH103-H308）經費支持，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 勞動部。勞工作業環境監測實施辦法。臺灣省臺北市；2013。
- [2] 陳春萬、鍾基強：IOSH98-H310整體換氣指標與換氣率ACH關係之研究。動部勞動及職業安全衛生研究所；2000。
- [3] 行政院環保署。室內空氣品質管理法；2011。
- [4] 陳鴻嶽：醫院空調系統之規劃設計、建構、量測及室內空氣品質分析研究。國立勤益科技大學冷凍空調系碩士論文；2013。
- [5] 鄭安邑：醫院內候診區及加護病房室內空氣品質調查。輔仁大學公共衛生學系碩士論文；2014。
- [6] 徐玉琴：醫療院所室內公共區域空氣品質之研究。國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程研究所碩士論文；2013。
- [7] 薛志超：醫院室內空氣品質初步調查-在南部某區域教學醫院。大仁科技大學環境管理研究所碩士論文；2013。
- [8] 張耀鍾：空氣品質實地研究。國立台北科技大學環境規劃與管理研究所；2004。
- [9] 葉耀文：長途客運與捷運之車廂空氣品質研究及乘客意向調查。國立台北科技大學環境工程與管理研究所；2008。
- [10] 黃志明：國民小學普通教室內空氣品質(CO、CO₂、PM₁₀)—以臺南地區公立小學為例。國立成功大學建築研究所；1993。
- [11] 朴允鎬：學校及交通工具室內空氣品質調查與評估之研究。國立臺灣大學環境工程學研究所；1999
- [12] 洪增淵：演講廳之室內環境品質調查與分析。朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文；2004。
- [13] 馬雪惠：室內溫熱環境與總揮發性有機化合物之調查研究—以雲林科技大學為例。國立雲林科技大學營建工程系碩士論文；2014。
- [14] 粘金傳：室內二氧化碳濃度偵測分析研究—以彰化縣國民中小學電腦教室為例。大葉大學工學院碩士論文；2011。
- [15] 李彥頤：辦公空間室內空氣品質管制策略之研究。國立成功大學建築學系博士論文；2004。
- [16] 鍾育泰：餐飲業用餐區域室內空氣品質之探討。中華大學土木與工程資訊學系碩士論文；2007。
- [17] 勞動部。勞工作業場所容許暴露標準；2014。
- [18] Alan Echt, G.E, Burroughs, Steven W. Lenhart, Donald E, Booher. HETA 96-0060-2632 Cincinnati Sportsmedicine and Orthopaedic Center Cincinnati, Ohio; 1996.
- [19] 勞動部。職業安全衛生法施行細則；

- 2014。
- [20] Health and Safety Executive. EH40/2005 Workplace exposure limits--Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as amended), ISBN:9780717664467; 2011.
- [21] OSHA. OSHA Technical Manual (OTM) Section II: Chapter 3--Technical Equipment: On-site Measurements. Washington: The Institute; 1999.
- [22] The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Carbon Dioxide. Atlanta: The Institute; 1967.
- [23] Peter Harper. Assessment of the major hazard potential of carbon dioxide (CO₂);2010
- [24] U.S. Environmental Protection Agency. Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the Risks; 2000.
- [25] OSHA. OSHA Technical Manual (OTM) Section III: Chapter 2 Indoor Air Quality Investigation. Washington: The Institute; 1999.
- [26] Peter Walsh, Michael Hemingway, Duncan Rimmer. Review of alarm setting for toxic gas and oxygen detectors; 2013.
- [27] Po-Hung Lu, Chun-Wan Chen, Cheng-Ping Chang. Accumulation of CO from Gas Water Heater on Balconies. Journal of Occupational Safety and Health 2006; 14: 299-307
- [28] 勞動部。職業安全衛生設施規則；2014。
- [29] 日本厚生勞動省。作業環境測定基準；2007。

Research Articles

The Application for the Carbon Dioxides Concentrations in Workplaces

Chun-Wan Chen¹ Chu-Ha Wu¹ Tsung-Ming Tu¹ Chun-Wei Chen¹

¹ Institute of Labor, Occupational safety and Health, Ministry of Labor

Abstract

According to Enforcement Rules of the Occupational Safety and Health Act, a business unit has to detect carbon dioxide concentration in some workplace. It is often being questioned that whether this detection is necessary or not, because the detecting result shows that the carbon dioxide concentration is always under the standard. Although there are some arguments in carbon dioxide concentration assessment, the labors are familiar with the information about carbon dioxide. Therefore, it still needs to be discussed and taken it seriously. This research uses experiment to discuss the meaning of carbon dioxide assessment and its' application, and combining with legislation and literature to discuss the expected meaning of carbon dioxide. Otherwise, this research also offers a business unit as an operating environment reference that how to do carbon dioxide assessment and turn the research result into another meaning in the regulation of carbon dioxide assessment. This study tests a special situation in a long time, including in some particular place and simulation chamber, and observes the changing of carbon dioxide concentration. By following the changing of carbon dioxide concentration, it can confirm the notice of carbon dioxide assessment again. At last, combining with research data and literature, and discuss that how to use this assessment result to prove operating environment. The research shows that assessment data of carbon dioxide can be influenced when changing time and space. It should be formulated an appropriate strategy and it may be shown a meaningful result. Normally, the data of carbon dioxide assessment was defined by the accumulation of carbon dioxide that employee breathe in working place. In literature, the highest carbon dioxide concentration is 3,300 ppm, and the average carbon dioxide concentration is 2,250 ppm in the student classroom. It shows that the lone time average carbon dioxide concentration will not be over 5,000 ppm, and we

Accepted 5 May, 2015

Correspondence to: Chun-Wan Chen, Institute of Labor, Occupational safety and Health, Ministry of Labor,

E-mail: wann@mail.ilosh.gov.tw

can forecast that in working place may have the same result. It's meaningful that concerning another source of carbon dioxide in working place without employee's breathing, and it also can connect with assessment data and the standard of concentration. The other thing is carbon dioxide can be used that understanding labors' operating environment, and manage working place ventilation. If the concentration is over the standard, the business unit has to do carbon dioxide assessment again to make sure that whether the rate of exchange fresh air is corresponded with the standard.

Keywords: Carbon dioxide, Exposure assessment, Exchange rate of fresh air