

第一章 緒論

1-1 研究緣起

環氧乙烷 (ethylene oxide, EtO) 的用途十分廣泛，在工業上大部分用於化學合成的原料或中間體，如乙二醇醚、乙醇胺和其他化學物質⁽¹⁾；在各醫療機構及可拋棄式醫療器材的製造廠中，針對高溫、高濕敏感的醫療器材或器具等物品，環氧乙烷可用於低溫及乾燥消毒滅菌^(1, 2)。此外，環氧乙烷的其他用途尚包括火箭推進燃料、清潔劑等⁽²⁾。

實驗顯示環氧乙烷對動物具有致癌性，使鼠類暴露在含有環氧乙烷的環境中會導致單核細胞白血病、鱗狀細胞癌、大腦神經膠質瘤和胃癌^(3, 6)。流行病學研究顯示長期暴露在高濃度環氧乙烷的環境中會導致姊妹染色體交換 (Sister Chromatid Exchange, SCE) 和染色體變異的機率增加^(1, 4, 7)。國際癌症研究總署 (International Agency for Research on Cancer, IARC) 於 1994 年 2 月將環氧乙烷自第 2A 級的人類可能致癌因子 (Group 2A, probable carcinogenic to human) 提升至第 1 級的人類致癌因子 (Group 1, carcinogenic to human)⁽⁸⁾；為了保護現場作業員工的健康，目前各國大都有訂定環氧乙烷在作業場所的容許濃度 (Permissible Exposure Levels, PELs)，我國則於 1995 年 6 月修訂「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」，將環氧乙

烷的八小時工作日時量平均容許濃度自 10ppm 降低為 1ppm^(1,9)。

針對空氣中環氧乙烷的暴露,可應用的評估技術包括主動式及被動式採樣分析方法等,在文獻中雖有許多記載⁽¹⁰⁻¹⁸⁾,但其中仍存在不少缺點,如採樣設備太過繁重、分析方法需經實驗室進一步的衍生程序或需使用溶劑進行脫附、分析過程過於繁瑣,及使用之脫附溶劑毒性高等⁽¹⁹⁻²¹⁾。另一方面,近年來發展的固相微萃取(Solid Phase Microextraction, SPME)技術,由於免溶劑脫附,同時結合採樣與萃取等過程為單一步驟,所以具有操作方便、省時等優點⁽¹⁹⁻²¹⁾。因此,本研究擬利用固相微萃取發展新的時量加權平均採樣分析技術,希望針對空氣中環氧乙烷進行暴露評估,建立一套方便、安全且靈敏的方法。

1-2 研究目的

本研究之研究目的如下：

- 1.使用固相微萃取設備(Solid Phase Microextraction, SPME)並應用溴化氫(HBr)與環氧乙烷反應生成2-溴乙醇(2-bromoethanol)之原理,進行採樣設備之設計與分析方法之實驗室驗證。
- 2.探討各種影響因素,如溫度、濃度、濕度及風速等變項對本研究所設計採樣器之採樣率的影響。

3.與市售 3M#3551 環氧乙烷被動式採樣器進行實驗室及現場採樣平行比對。

第二章 文獻回顧

2-1 環氧乙烷的特性

環氧乙烷在常溫、常壓下為無色氣體，似醚味⁽²²⁾。化學文摘社登記號碼 (CAS No.) 75-21-8，聯合國編號 (UN Number) 1040，化學式為 C_2H_4O ，分子量 44.05 g/mole，熔點 -111，沸點 10.7，密度 0.8694 g/mL，在 20 時蒸汽壓為 1095mmHg(146 kpa)，簡稱 EtO，別名 1,2-Epoxyethane、Oxirane、Dimethylene oxide、Anprolene⁽²²⁾；其具有高揮發性、易爆及易燃之特性⁽²²⁾。

2-2 環氧乙烷的用途

大部分的環氧乙烷是做為工業上化學合成的原料及生產下游產品時的中間體使用，小部分用於製作乙二醇醚、乙醇胺和其他化學物質^(1, 23, 24)，因其界面活性力強，故常被當作清潔劑使用^(23, 24)。其他用途尚包括：消毒滅菌劑、煙草葉之成熟促進劑、火箭推進劑及水果之成熟促進劑、防黴劑等^(2, 23)。由於環氧乙烷具有很強的烷基化能力，它能和 DNA 產生不可逆的共價結合，使 guanine 的 N-7 位置烷基化成 N-7hydroethyl-guanine，此為不可逆的化學反應，進而破壞微生物莢膜，迅速擴散至微生物中，使其無法做正常的新陳代謝與生殖作用⁽¹⁾；但環氧乙烷對滅菌物品本身的物理性傷害小，故許

多醫療院所及可拋棄式醫療器材製造廠，針對高溫、高濕敏感的醫療器材或器具等物品（如許多塑膠和橡皮製品及眼科之儀器），常使用環氧乙烷進行低溫及乾燥消毒殺菌的方法^(7, 25)。雖然近年來陸續出現了數種低溫消毒滅菌技術，例如離子束輻射滅菌法、氣漿法、臭氧滅菌等方法⁽¹⁾，但考量了滅菌技術的適用物品種類與被消毒滅菌醫療器材用品材質的相容性、消毒滅菌效果及經濟成本效益後，環氧乙烷低溫氣體消毒滅菌法目前仍是醫療院所和可拋棄式醫療器材製造廠最常使用的氣體消毒滅菌法⁽¹⁾。

2-3 目前環氧乙烷之相關規範

目前國際上各國施行環氧乙烷之八小時工作日時量平均容許濃度如下所示：

1. 美國工業安全衛生師協會（ACGIH）⁽²⁶⁾、美國職業安全衛生署（OSHA）⁽²⁷⁾：1ppm、美國國家職業安全衛生研究所（NIOSH）⁽²⁸⁾：0.1ppm（15分鐘暴露上限為5ppm）。
2. 英國和法國為5ppm；日本為50ppm⁽¹⁾。
3. 我國於1995年6月修訂『勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準』，將環氧乙烷的八小時工作日時量平均容許濃度自10ppm降低為1ppm，（15分鐘短時間暴露容許濃度為2ppm）^(1, 9)。

2-4 環氧乙烷之可能暴露途徑

(一) 醫療院所及可拋棄式醫療器材製造廠

可能直接接觸到環氧乙烷的人員為醫療院所及可拋棄式醫療器材製造廠之操作環氧乙烷氣體消毒滅菌鍋爐和搬運已完成消毒滅菌動作之醫療產品的現場作業員工，其暴露途徑可概分如下：

1. 滅菌鍋爐門之襯墊失效，當進行消毒滅菌時，環氧乙烷滅菌氣體從隙縫外洩，使現場作業員工暴露在含有環氧乙烷的作業環境下。
2. 鍋爐滅菌消毒及排氣動作完成後，開鍋後滅菌鍋爐內仍有較高濃度之環氧乙烷存在，研究顯示甚至可高達 4000ppm⁽²⁹⁾。
3. 現場作業員工將以消毒滅菌的醫療器材從滅菌鍋爐取出，或搬運至儲放場所，殘留於醫療器材上的環氧乙烷造成人員暴露。
4. 曾有文獻指出雖經過一段長時間曝氣後，殘留於醫療器材上環氧乙烷濃度仍有 2-11ppm⁽³⁰⁾，若儲放醫療器材的場所通風不良，亦會造成人員的暴露。
5. 已消毒滅菌後含有環氧乙烷的廢氣未經妥善處理即排放。
6. 現場鍋爐操作人員未依照安全操作程序運作，而發生環氧乙烷氣體外洩造成人員的暴露或其他危害。

(二) 化學工廠

在工業上以環氧乙烷作為化學合成的原料或中間體的工廠，製程

區通常為戶外空間且相關製程都是在自動監控的密閉管線系統中進行操作，此環境下，除非是系統中發生外洩情況，否則現場作業員工直接接觸到環氧乙烷的機會是非常小的。故此類作業場所內自設的空氣中環氧乙烷濃度監測裝置的監測數據顯示都遠低於容許濃度，即勞工之日常暴露值未超過法令標準規範⁽³¹⁾。

(三) 戶外

當呼吸到污染的空气或汽機車排放之廢氣時，因其含有大量之乙烯，在體內會氧化成環氧乙烷^(23, 32)。

(四) 抽煙吸入

過去文獻指出抽菸有暴露到環氧乙烷的可能^(23, 32)。

2-5 環氧乙烷毒性作用與健康危害

(一) 動物實驗

文獻指出環氧乙烷具有致癌性，使 Fischer 鼠暴露在環氧乙烷濃度為 10、33 或 100ppm 環境中一星期中暴露 5 天，每天暴露 6 小時持續 2 年，結果發現 Fischer 鼠產生了白血病及間皮瘤等症狀^(3, 4)，另外的研究中也發現將 Fischer 雄鼠暴露在含有環氧乙烷濃度為 50 或 100ppm 環境下，一星期中暴露 5 天，每天暴露 7 小時持續 2 年，Fischer 雄鼠亦發生白血病、間皮瘤及神經膠質瘤等症狀^(4, 5)；

環氧乙烷的暴露亦可能造成 B6C3F1 鼠類肺部病變、子宮腺癌、乳腺癌及淋巴腺癌產生^(4, 6)。其他的相關文獻也指出暴露在環氧乙烷環境下會造成生殖毒性及致畸胎性的危害，如懷孕母體在吸收了環氧乙烷之後，經由母體血液傳入胚胎中，在懷孕初期可導致胚胎的死亡，在懷孕末期則會造成胎兒在結構或功能上的異常^(1, 7)。

(二) 流行病學資料

許多流行病學研究的文獻顯示環氧乙烷與白內障、白血病、造血系統及胃癌有關^(1, 7, 33)，其為一致癌性物質^(1, 7, 34, 35)，長期暴露在高濃度環氧乙烷之環境下會導致姊妹染色體交換 (Sister Chromatid Exchange, SCE) 染色體變異的增加^(1, 4, 7)及女性自發性流產率的增加^(1, 7, 34)。

(三) 中毒症狀

環氧乙烷可經由呼吸道、皮膚或食入而使人體中毒，早期徵狀為噁心、麻木、腹內壓迫感、頻尿、嘔吐、神經異常甚至死亡⁽³⁵⁾。

1. 吸入

會刺激鼻子、喉嚨、肺，並且造成噁心、嘔吐、腹痛、呼吸困難、咳嗽、暈眩、精神異常、肺水腫、昏迷、甚至死亡⁽³⁵⁾。

2. 皮膚接觸

引起水泡、浮腫、灼傷、凍傷、嚴重皮膚炎、壞死⁽³⁵⁾。

3. 眼睛接觸

刺激眼睛，造成灼傷或壞死⁽³⁵⁾。

4. 食入

會有喉嚨痛、噁心、嘔吐、腹瀉、痙攣等現象，嚴重者會死亡⁽³⁵⁾。

一般的急性中毒症狀為黏膜刺激、味覺和嗅覺的喪失、噁心、虛弱昏迷、呼吸困難、發紺及肺水腫⁽¹⁾；慢性健康危害效應除輕微精神症狀外，還包括生殖毒性^(1, 4, 7)、細胞遺傳和突變性^(1, 4, 7)及致癌效應等^(1, 7, 34, 35)。

2-6 目前環氧乙烷採樣方法簡介

(一) 空氣中環氧乙烷的採樣方法，包括主動式及被動式等，至今已有一些公告方法提供參考，分述如下：

1. OSHA method 49⁽¹⁰⁾

為被動式採樣，利用 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器進行空氣中樣本收集，使環氧乙烷與溴化氫反應生成 2-溴乙醇，以 tetrahydrofuran 作為脫附溶液，再利用 gas chromatograph / electron capture detector (GC-ECD) 進行分析，分離管柱為 stainless steel, 10 % SP-1000 on 80/100 Supelcoport。

2. OSHA method 50⁽¹¹⁾

為主動式採樣，利用塗敷有溴化氫 (HBr) 的活性碳管以 100 mL/min 採樣率進行空氣採樣，使環氧乙烷與溴化氫反應生成 2-溴乙醇，以 dimethylformamide (DMF) 作為脫附溶液，再利用 GC-ECD 進行分析，分離管柱為 glass column packed, 10 % SP-1000 on 80/100 Supelcoport。

3. NIOSH method 1614⁽¹²⁾

為主動式採樣，利用塗敷有溴化氫 (HBr) 的活性碳管以 50 150 mL/min 採樣率進行空氣採樣，使環氧乙烷與溴化氫反應生成 2-溴乙醇，以 dimethylformamide (DMF) 作為脫附溶液，再利用 GC-ECD 進行分析，分離管柱為 3m x4mm glass; 10 % SP-1000 on 80/100 Chromosorb WHP。

4. 勞委會採樣分析建議方法 CLA5018⁽¹³⁾

為主動式採樣，利用塗敷有溴化氫 (HBr) 的活性碳管以 50 150 mL/min 採樣率進行空氣採樣，使環氧乙烷與溴化氫反應生成 2-溴乙醇，以 dimethylformamide (DMF) 作為脫附溶液，再利用 GC-ECD 進行分析，分離管柱為 fused silica WCOT, DB-WAX; 30m x0.53mm ID 1.0µm。

(二) 其他方法：

1. 3M company determination of ethylene oxide in air^(14, 15)

為被動式採樣，利用 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器進行空氣中樣本收集，使環氧乙烷與溴化氫反應生成 2-溴乙醇，以 tetrahydrofuran 作為脫附溶液，再利用 GC-ECD 進行分析，分離管柱為 J&W DB225 (50 % cyanopropylmethyl-50 % methylphenyl polysiloxane), 0.25 μ m film thickness, 0.25mm I.D., 15m capillary。

2. 環氧乙烷熱脫附採樣分析技術⁽¹⁶⁾

為主動式採樣，利用低流量幫浦以 60 mL/min 之採樣率進行空氣採樣，使空氣通過填充有 Carbosieve III 吸附劑 (600mg) 之採樣管，將環氧乙烷捕集後，以 100 高溫將採樣管中的環氧乙烷脫附出來，用液態氮將分析樣本冷凝濃縮於冷凝管，再以超高純度氦氣為載流氣體將脫附出來的環氧乙烷送至 gas chromatograph / flame ionization detector (GC-FID) 分析，分離管柱為 Supelcowax 10 (60m \times 0.25mm \times 0.25 μ m)。

3. 環氧乙烷之自動熱脫附/氣相層析儀分析方法⁽¹⁷⁾

為主動式採樣，利用低流量幫浦以 50 mL/min 採樣率進

行空氣採樣，使空氣通過填充有 Spherocarb 吸附劑之採樣管補集環氧乙烷，將採樣管置入自動熱脫附裝置將環氧乙烷脫附出來，再以高純度氮氣為載流氣體將脫附出來的環氧乙烷送至 GC-FID 分析，分離管柱為 Supelcowax 10 (30m × 0.25mm , film thickness 0.25 μ m)。

4.其他方法

其他尚有 Crystal Diagnostics AirScan 被動式採樣器、Eto Chem Chip 比色法及 Photoacoustic infra-red detection 直讀式儀器等採樣分析方法⁽¹⁸⁾。

然而上述方法皆需實驗室進一步之衍生程序或需溶劑脫附，不免有分析程序繁雜、所使用的溶劑毒性高及廢液產生的問題產生，因此發展一套方便、安全且靈敏之採樣分析技術有其必要性。理想的樣本前處理技術應具有分析程序簡單容易、處理時間快速、減少溶劑的使用及價格較低廉之設備等優點。許多文獻皆指出固相微萃取 (Solid Phase Microextraction, SPME) 技術具有此優點及特色^(18, 21)，故本研究擬利用此技術發展新的空氣中環氧乙烷採樣分析技術。有關 SPME 之詳細介紹及相關應用將詳述於下節。

2-7 固相微萃取 (Solid Phase Microextraction, SPME) 之介紹及其在被動

式採樣之應用

2-7-1 固相微萃取

傳統樣本前處理技術如索式萃取法、液相-液相萃取法等，這些方法不但使用大量高純度之有機溶劑，花費高額金錢，並對環境造成二次污染，其繁瑣的步驟更浪費分析者的時間，亦造成標的分析物之流失；而固相萃取法則易發生吸附劑孔隙阻塞的問題，影響分析結果的準確性^(19, 21)。

1990 年時，加拿大學者 Pawliszyn 教授之研究室發展出固相微萃取，結合了取樣、萃取及濃縮等過程，將之合併為單一步驟，並可直接注入儀器分析，且具有裝置簡單、攜帶方便、採樣時間短、萃取時間短、處理速度快、可重複使用、不需大量樣本、不需溶劑脫附及偵測極限佳等優點^(19, 21)。

固相微萃取 (Solid Phase Microextraction, 簡稱 SPME) 之裝置如圖 2-8-1 所示⁽²⁰⁾, SPME 將披覆於熔融矽膠之固定靜相纖維 (fiber) 與一不鏽鋼管以耐高溫之環氧樹脂黏著，再將之與注射裝置 (holder) 結合，組裝完成一個固相微萃取元件⁽²¹⁾。目前，固相微萃取的萃取纖維與手動裝置已由 SUPELCO 公司商品化，依據標的分析物的性質而選擇適當之萃取纖維進行樣本萃取，萃取纖維種類具多種選擇，如表 2-8-1 所示。

固相微萃取技術可區分成直接固相微萃取 (direct SPME) 及頂空固相微萃取 (headspace SPME) 兩種⁽²⁰⁾。直接固相微萃取法為將萃取纖維完全浸入樣本基質中；而頂空固相微萃取法則利用頂空之氣相介入萃取系統中，當萃取系統中的液相、頂空氣相及固定靜相吸附纖維 (fiber) 達到平衡時進行萃取，此法可避免分析物質吸附在萃取纖維上，對纖維造成傷害 (如：血液、油質樣本及污穢的水樣本等)⁽³⁶⁾。

2-7-2 影響 SPME 頂空萃取的因素

影響固相微萃取頂空萃取之因素大致有下列幾項^(19, 20, 48)：

1. 披覆固定靜相 (SPME 之萃取纖維) 種類。
2. 樣本與頂空氣相的體積。
3. 周圍環境的溫度。
4. 樣本吸附、暴露時間及熱脫附時間。
5. 樣本體積及樣本攪拌程度。
6. 添加鹽類及酸鹼值的影響。

2-7-3 固相微萃取的應用

固相微萃取前處理技術在近幾年已逐漸被廣泛使用在各領域中，其適合聯結氣相層析儀 (Gas Chromatography, GC) 氣相層析質

譜儀 (Gas Chromatography / Mass Spectrometry, GC/MS) 或高效能液相層析儀 (High –Performance Liquid Chromatography, HPLC) 等儀器進行定性定量分析。應用範圍包括：有機氯農藥檢測^(37 39)、揮發性有機化合物^(40 46)、環境分析 (空氣、廢水、土壤等)、食物及藥品分析、刑事科學^(36, 47, 48) 等。

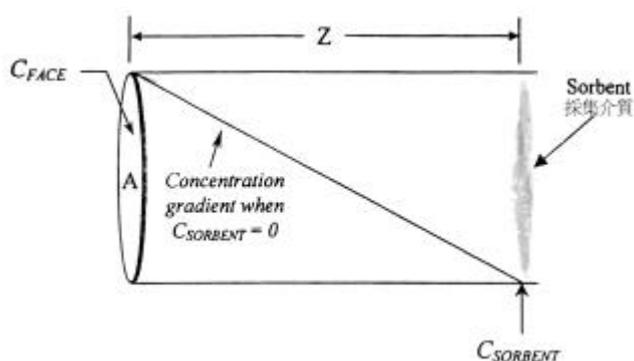
2-7-4 被動式採樣

所謂被動式採樣是靠物理現象中的擴散或滲透原理，對氣體或蒸氣採樣。被動式採樣具有許多優點，包括：成本低、無須校正、使用容易、較不影響配戴者之活動及可進行大規模採樣等^(49~53)。Fick's First Law 是設計擴散式被動式採樣器的理論依據，使採集的對象在不受紊流影響的空間進行分子傳送 (Molecular Diffusion Transport)
(20 , 49 , 50 , 52 , 53)。

Fick's First Law :

$$dm/dt=(DA/Z)(C_{air}-C_{sorbent}) \dots\dots\dots (1)$$

- dm/dt : 物質傳遞速率 (weight/time)
- dm : 空氣或蒸氣採集量 (weight)
- dt : 採樣時間 (time)
- DA/Z : 採樣器之採樣率 (cm³/time)
- D : 空氣或蒸氣擴散係數 (cm²/sec)



A：採樣器之開口面積 (cm²)⁽⁴⁰⁾ (如上圖)

Z：採樣器之擴散徑長(cm)⁽⁴⁰⁾ (如上圖)

C_{air}：空氣或蒸氣濃度 (weight/cm³)

C_{sorbent}：採集介質表面之空氣或蒸氣濃度 (weight/cm³)

運用費氏第一定律 (Fick's First Law) 時，有二項假設：

- 1.環境中空氣或蒸氣之濃度相同於採樣器開口處的濃度，C_{air} = C_{face}
- 2.採集介質表面之空氣或蒸氣濃度為 0，C_{sorbent} = 0⁽²⁰⁾。

2-7-5 理論採樣率

擴散式被動式採樣器之採樣率可由下式計算：

$$R=DA/Z \text{ (2)}$$

R：理論採樣率

D：擴散係數

A：採樣器開口面積

Z：擴散路徑長

依據文獻之記載，如果將 SPME 之萃取纖維向後抽回固定距離，則此纖維即可成為一被動式採樣設備⁽⁵⁴⁾，而此被動式採樣器之採樣器開口面積 A=0.00086cm²⁽⁵⁴⁾，擴散路徑長 Z=0.3cm⁽⁵⁵⁾。

環氧乙烷在空氣中之擴散係數 (D), 可由下式計算⁽¹⁸⁾ :

$$D_{AB} = \frac{0.00143 \times T^{1.75}}{PM_{AB}^{1/2} [(\sum V_A)^{1/3} + (\sum V_B)^{1/3}]^2} \dots\dots\dots (3)$$

where D_{AB} : 分析物在空氣中的擴散係數 (cm²/s)

T : 溫度 (K)

M_A 、 M_B : 空氣及分析物之分子量 (g/mol)

$M_{AB} = 2[(1/M_A) + (1/M_B)]^{-1}$

P : 壓力 (bar)

$\sum V$: 原子擴散體積總和

A : 空氣

B : 分析物

由公式 (3) 可知, 擴散係數會因環境溫度的改變而改變。因此環氧乙烷在 4 °C 下之理論採樣率為 0.0235 (cm³/min), 在 25 °C 時為 0.0273 (cm³/min), 在 35 °C 時為 0.02831 (cm³/min)。

影響被動式採樣器採樣的因素包括^(49, 51) :

1. 採樣器之物理形狀 : 即採樣器截面積、長度等。
2. 吸附劑之物理及化學特性 : 即捕集效率、脫附效率穩定性等。
3. 暴露濃度及時間。
4. 溫度、濕度、風速及大氣壓力。
5. 採樣時採樣器的擺設方向。

2-7-6 採樣器的反應時間

被動式採樣器的反應時間可由下列公式表示⁽⁵⁶⁾：

$$T = \frac{(\text{mass hold up})}{(\text{diffusive transport rate})} = \frac{(C_o / 2)LA}{(DAC_o / L)} = \frac{L^2}{2D} \quad (4)$$

其中 C_o ：空氣或蒸氣濃度 (weight/cm³)

D ：氣態環氧乙烷之擴散係數 (cm²/sec)

A ：被動式採樣器之開口面積 (cm²)

L ：被動式採樣器之擴散徑長 (cm)

本研究中，3M #3551 被動式採樣器之 $L=1\text{cm}$ ， $D=0.1554\text{ cm}^2/\text{sec}$ ，經上述公式 (4) 計算後得到 3M #3551 被動式採樣器之理論反應時間約為 3.22 秒，只要濃度暴露持續超過 3.22 秒，該暴露狀況即可正確地被採樣器所記錄；而 SPME 被動式採樣器之 $L=0.3\text{ cm}$ ， $D=0.1554\text{ cm}^2/\text{sec}$ ，同樣經上述公式 (4) 計算後得到 SPME 被動式採樣器之理論反應時間約為 0.3 秒，只要濃度暴露持續超過 0.3 秒，該暴露狀況即可正確地被採樣器所記錄。經理論反應時間公式計算得知 SPME 被動式採樣器的反應時間較 3M #3551 被動式採樣器短。

第三章 研究方法與材料

3-1 研究架構

本研究的研究架構如圖 3-1-1 所示。研究中利用固相微萃取(Solid Phase Microextraction, SPME)組件中之 Carboxen/Polydimethylsiloxane (CAR/PDMS) 萃取纖維經頂空萃取法裹覆溴化氫 30 秒後，組裝成被動式採樣器⁽¹⁸⁾，然後利用動態標準氣體製造系統，於實驗室中模擬實際暴露狀況，並將 3M #3551 及 SPME 環氧乙烷被動式採樣器同時置於暴露腔內，分別在 0.5ppm、1ppm、2ppm 及 10ppm 的濃度下暴露六小時，樣本收集完畢後則以氣相層析質譜儀 (GC/MS) 分析。除了實驗室模擬外，研究中亦同時將 3M #3551 及 SPME 被動式採樣器進行現場平行採樣比對。

3-2 研究對象之選取

本研究於實驗室中利用動態標準氣體製造系統模擬不同之暴露狀況，評估經美國安全衛生署 (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) 認可之 3M #3551 被動式採樣器與本實驗室所開發之 SPME 環氧乙烷被動式採樣器的相關性，並選取台灣中部某一醫療器材製造廠進行採樣器之現場平行比對。包括消毒滅菌鍋爐開鍋時之搬運勞工、抽樣檢驗人員等的個人採樣，及廠區內的區域採樣等，

皆為研究中的樣本收集來源。

3-3 現場勘查及採樣策略

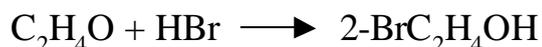
研究中經現場勘查後，依據所收集的資料擬定採樣策略，現場勘查之主要內容包括下列：

1. 醫療器材製造廠基本資料。
2. 廠區硬體操作之時程安排之相關資料，以利配合其各種不同操作之時程進行採樣時程之安排。
3. 操作員工的職務分配、工作內容、工作地點與時間等資料，用以瞭解員工概略之可能暴露情形，進而界定研究族群。

3-3-1 3M #3551 的採集方法

3M #3551 的樣本採集分為個人及區域採樣兩部分，在勞工空氣樣本採集部分，將採樣器繫於勞工上衣領呼吸帶範圍內進行採樣(如圖 3-3-1 所示)；在作業現場空氣樣本採集部分，則在作業現場選取可能有環氧乙烷暴露的場所架設採樣器組(如圖 3-3-2 所示)。研究中亦同時在每次採樣時進行旅運及現場空白試驗。採樣完成之後立即以 Teflon 止洩帶密封 置入冰桶低溫保存，攜回實驗室後放入 4 冰箱中冷藏，以待上機分析。其採樣原理則是利用採樣介質中塗敷的溴化氫 (HBr) 將空氣中環氧乙烷吸附在採樣介質中，使其反應生

成 2-溴乙醇 (2-bromoethanol), 反應式如下 :



3-3-2 SPME 環氧乙烷被動式採樣器之採集方法

SPME 被動式採樣器為本實驗室近兩年來所開發之新的採樣方法^(18, 20), 在採樣器製備方面, 先取 2mL 之 48% 溴化氫 (HBr) 至 4mL 樣本瓶中進行攪拌, 攪拌一段時間後將萃取纖維以頂空法裹覆溴化氫 30 秒, 隨後立即以 Teflon 止洩帶密封並低溫保存。進行現場採樣時, 先撕開萃取纖維密封之止洩帶, 將萃取纖維置入 Teflon 管中, 一端以橡膠封蓋 (內層為 Teflon 止洩帶) 密封, 另一端則以墊片固定萃取纖維, 墊片距離採樣器開口為 1 公分, 萃取纖維採樣開口面與 Teflon 管口面平行, 詳如圖 3-3-3 所示; 環氧乙烷空氣樣本採集部分及採樣原理與上述 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器相同。

3-4 分析方法

3-4-1 分析儀器設備及試藥

3-4-1-1 儀器

1. 氣相層析儀 : PE-AutoSystem XL
2. 質譜儀 : PE-TurboMass

3-4-1-2 設備

1. 分離管柱 column : SPB-1701 , 30m \times 0.32mm \times 0.25 μ m
2. 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器
3. 固相微萃取纖維 SPME fiber : SUPELCO 57318
Carboxen/Polydimethylsiloxane (Car/PDMS)
4. 固相微萃取手動裝置 SPME holder : SUPELCO 57330-U
5. 氣體採樣袋 sampling bag : 29.9cm \times 45.7cm, 10L, SKC 231-08,
USA
6. 空氣壓縮機 automatic silent compressor : S.A. 50/24 AL , Werther
international
7. 零級空氣產生機 zero air generator : Whatman 76-818 , USA
8. 注射針幫浦 Harvard syringe pump , model II , USA
9. 暴露腔 : 42cm (L) , 14cm (OD.) , 13cm (ID.) , 玻璃圓柱管 ,
慶發玻璃

3-4-1-3 試藥

1. 50000 μ g/mL Ethylene oxide in methanol : SUPELCO
2. 2-溴乙醇 2-Bromoethanol : 95 % SIGMA
3. 48 % (W/W) 溴化氫 Hydrobromic acid : LANCASTER
4. 正戊醇 1-pentanol : 99 % MERCK

5. 甲醇 methanol : 99.9 % MERCK
6. 二氯甲烷 methylene chloride : 99 % WAKO

3-4-2 樣本前處理

3-4-2-1 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器

將採樣完成後之採樣器注入 2mL 1 : 9 脫附劑 (二氯甲烷 : 甲醇比例為 1 : 9) 進行脫附^(14, 15), 脫附時間為 30 分鐘, 再以氣密針取其中 1mL 之樣本置於 2mL 樣本瓶中, 加入 5 μ L 之 1% (v/v) 正戊醇當內標⁽¹⁸⁾。

3-4-2-2 SPME 環氧乙烷被動式採樣器

配製一正戊醇濃度約為 30ppm 之採樣袋, 將完成採樣之 SPME 被動式採樣器之萃取纖維插入採樣袋中, 暴露在正戊醇內標 10 分鐘⁽¹⁸⁾。

3-4-3 氣相層析質譜儀分析條件

氣相層析儀 :

1. Injector Temp : 250
2. Carrier gas : He
3. Flow rate : 0.8mL/min

4. Temp program : 60 (2min) $\xrightarrow{30 / \text{min}}$ 180 (5min)

質譜儀：

1. Interface Temp : 260
2. Ion Source Temp : 260
3. Scan Model : Selected Ion Recording ,SIR
4. Solvent Delay : 2min

3-5 實驗方法

首先將萃取纖維 condition 後立即以 Teflon 止洩帶密封，取 48 % 之溴化氫 (HBr) 2mL 至 4mL 樣本瓶中，置入磁石進行攪拌，30 分鐘後將 SPME 之萃取纖維上之 Teflon 止洩帶撕開並插入裝有溴化氫之 4mL 樣本瓶中，以頂空萃取法裹覆溴化氫 30 秒，再暴露至含有環氧乙烷的環境下，使其生成 2-溴乙醇 (2-bromoethanol)，最後以氣相層析質譜儀進行樣本分析工作，流程如圖 3-5-1 所示。

3-6 分析實驗之品保品管規範

3-6-1 空氣中環氧乙烷分析之品保品管規範

1. 空白試驗

- (1) 旅運空白：攜帶另 1 組採樣器，並與其他採樣器以相同方式保存於 4 冰桶中，至現場採樣後再攜回實驗室 4 冰箱中

保存，途中不需開啟，保持完整密封，以確定樣本是否在攜帶過程中受到污染。

- (2) 現場空白：至現場採樣時需執行現場空白試驗，其作法是至現場後開啟採樣管，接著迅速以套蓋及石蠟膜或 Teflon 止洩帶密封，與樣本一起置於 4℃ 冰桶中送回實驗室，並保存於 4℃ 冰箱中以備分析。

2. 標準品檢量線

檢量線之相關係數 (R) 應達 0.995 以上。

3. 偵測極限

- (1) 方法偵測極限：以檢量線最低濃度 8.37 µg/mL，進行 7 次重複測定，以分析結果計算 3 倍標準差值 (standard deviation, SD) 計算方法偵測極限。
- (2) 儀器偵測極限：將空白樣本重複分析 7 次，取其 3 倍標準差值，再除以檢量線之斜率，得之。

4. 分析準確度

配製檢量線內一濃度樣本，連續分析 7 次，以下列公式計算分析結果之分析準確度應低於 10%。

$$\text{分析準確度} = (\text{實驗分析濃度} / \text{實際配製濃度}) \times 100\%$$

5. 分析精密度

配製檢量線內一濃度樣本，連續分析 7 次，以測試分析樣本之精密度，根據分析結果計算其變異係數 (Coefficient of variance, CV)，以 CV 表示，應低於 7 %。

3-7 統計分析方法

本研究的樣本分析結果以 Microsoft Excel 97 版進行運算，而對於實驗結果之相關統計分析工作則以 SAS 8.2 版進行。

第四章 結果與討論

4-1 品保品管執行結果

4-1-1 3M #3551 被動式採樣器之品保品管執行結果

1. 檢量線製作

本研究分析之 2-溴乙醇之檢量線如表 4-1-1 及圖 4-1-1 所示，配製濃度範圍為 8.37 ~ 334.8 $\mu\text{g/mL}$ ，其相關係數 (R) 達 0.995 以上，如表 4-1-2 所示；分析圖譜如圖 4-1-2 所示。

2. 偵測極限

(1) 方法偵測極限：以檢量線最低濃度 8.37 $\mu\text{g/mL}$ ，進行 7 次重複測定，以分析結果計算 3 倍標準差值 (standard deviation, SD)，得到方法偵測極限為 1.68 ng，如表 4-1-2 所示。

(2) 儀器偵測極限：將空白樣本分析 7 次取其 3 倍標準差，再除以檢量線之斜率，得到儀器偵測極限為 0.0894 ng，如表 4-1-2 所示。

3. 分析準確度

配製檢量線中之 167.4 $\mu\text{g/mL}$ 濃度進行樣本分析之準確度測試，相對偏差為 4.08 %，如表 4-1-2 所示。

4. 分析精密度

配製檢量線中之 167.4 $\mu\text{g/mL}$ 濃度進行樣本分析之準確度測

試，CV 值為 3.70 %，如表 4-1-2 所示。

5. 脫附效率

注入濃度為 167.4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之標準品至 3M #3551 被動式採樣器中進行脫附效率測試，其測試結果為 $103.0\pm 3.8\%$ ，變異係數為 3%，如表 4-1-2 所示。

4-1-2 SPME 被動式採樣器之品保品管執行結果

1. 檢量線製作

2-溴乙醇之檢量線如表 4-1-1 及圖 4-1-1 所示，配製濃度範圍為 8.37 - 334.8 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，其相關係數 (R) 達 0.995 以上，如表 4-1-3 所示；分析圖譜如圖 4-1-2 所示。

2. 偵測極限

(1) 方法偵測極限：以檢量線最低濃度 8.37 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，進行 7 次重複測定，以分析結果計算 3 倍標準差值 (standard deviation, SD)，得到方法偵測極限為 1.68 ng，如表 4-1-3 所示。

(2) 儀器偵測極限：將空白樣本分析 7 次取其 3 倍標準差，再除以檢量線之斜率，得到儀器偵測極限為 0.0401 ng，如表 4-1-3 所示。

3. 分析精密度

配製檢量線中之 167.4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 濃度進行樣本分析之準確度測試，CV 值為 6.75 %，如表 4-1-3 所示。

4. 脫附效率

將於實驗室製備完成之 SPME 被動式採樣器暴露在含有濃度為 1ppm 之環氧乙烷採樣袋下 3 及 4 小時後，將 SPME 之萃取纖維 (Car/PDMS) 插入 GC 之注射部，以 250 高溫進行脫附 5 分鐘，第一次脫附及分析完成後不再暴露環氧乙烷，隨即進行第二次脫附及分析，測試儀器其脫附條件是否適當，如表 4-1-3 所示，結果顯示研究中所設定之脫附溫度及時間足以將吸附在 SPME 之萃取纖維上的 2-溴乙醇完全脫附。

4-2 實驗室模擬

4-2-1 採樣器容量

由本研究室去年之研究結果⁽¹⁸⁾顯示，SPME 被動式採樣器之萃取纖維裹覆溴化氫 (HBr) 30 秒後，至少可提供採集 2.93×10^{-9} 莫耳的環氧乙烷之所需 (即溴化氫 30 秒的裹覆量可以讓 SPME 被動式採樣器在一大氣壓 25 環境下，於 1ppm 之環氧乙烷濃度下連續採樣約 45 小時。)

4-2-2 採樣器壽命

將SPME被動式採樣器之Car/PDMS萃取纖維以頂空萃取法裹覆溴化氫 30 秒，將萃取纖維密封後置於鐵氟龍管內，隨後將其置於 4 °C 冰箱中保存 7 天後，將萃取纖維插入含有環氧乙烷 8ppm 之空氣採樣袋內進行暴露 10 分鐘隨後進行分析，實驗結果發現樣本之採集回收率可達 93 %，如表 4-2-1 所示。

4-2-3 樣本儲存穩定性

將SPME被動式採樣器之Car/PDMS萃取纖維以頂空萃取法裹覆溴化氫 30 秒後，立即將萃取纖維插入含有環氧乙烷 8ppm 之空氣採樣袋內進行暴露 10 分鐘，再將萃取纖維密封後置於鐵氟龍管內，置於 4 °C 冰箱中保存 7 天後進行分析，試驗結果發現其樣本回收率可達 97 %，如表 4-2-1。

4-2-4 短時間高濃度採樣

於實驗室配製內含有環氧乙烷 8ppm之空氣採樣袋進行短時間暴露採樣，採樣時間為 10 分鐘，發現 SPME 被動式採樣器於短時間高濃度採樣具有可行性，結果如表 4-2-2 所示。

4-2-5 長時間採樣

為模擬現場實際暴露狀況，本研究於實驗室中架設動態標準氣體製

造系統，首先空氣壓縮機輸送空氣至空氣純化機，經純化後的空氣流經內含有去水氣及去雜質吸附劑的 trap，利用浮子流量計調節流量，定量的空氣再流經已固定濃度及流速之環氧乙烷自動注射器，環氧乙烷標準氣體經過均勻混和後到達暴露腔；在進行暴露之前，先行確認系統中的空氣流量、自動注射器是否為設定流量及速度、整個系統是否為完全密閉狀態後，隨後再將 3M #3551 及 SPME 環氧乙烷被動式採樣器置入暴露腔內模擬暴露，如圖 4-2-1 所示。本研究中之長時間採樣試驗即利用動態標準氣體製造系統，使暴露腔產生濃度為 0.5ppm、1ppm、2ppm 及 10ppm 之四種不同濃度環氧乙烷的環境，以模擬作業環境六小時長時間採樣。研究結果發現 3M #3551 及 SPME 兩種被動式採樣器在不同實驗濃度情況下進行長時間採樣皆具有良好表現，結果如圖 4-2-2 及圖 4-2-3 所示。3M #3551 被動式採樣器在不同濃度下採樣 6 小時後具有良好線性， $R=0.9996$ ；而 SPME 被動式採樣器在不同濃度下採樣 6 小時後具有良好線性， $R=0.9958$ 。

4-2-6 溫度對 SPME 被動式採樣器之的影響

將空氣採樣袋濃度配製為 8ppm，探討 4、25 及 35 不同溫度情況下 SPME 被動式採樣器之採樣率是否有明顯變化。研究中

4 的採樣時間為 10 分鐘 120 分鐘，實驗採樣率的結果為 $(2.27 \pm 0.14) \times 10^{-2}$ mL/min；25 的採樣時間為 10 分鐘 120 分鐘，實驗採樣率為 $(3.11 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min；35 的採樣時間為 10 分鐘 120 分鐘，實驗採樣率為 $(2.94 \pm 0.12) \times 10^{-2}$ mL/min。將上述結果進行統計檢定，發現 4 下之實驗採樣率相對於 25 下之實驗採樣率，兩者之差別在統計上具有顯著意義（P 值為 0.0074）；25 下之實驗採樣率相對於 35 下之實驗採樣率，兩者之差別在統計上沒有顯著意義（P 值為 0.4476）；4 下之實驗採樣率相對於 35 下之實驗採樣率，兩者之差別在統計上具有顯著意義（P 值為 0.0081）。溫度測試的結果顯示 SPME 被動式採樣器於採樣時可能受到溫度的影響，其中又以低溫的影響較大，結果如表 4-2-3 及圖 4-2-4 所示（圖中所呈現的斜率即為該狀況下所獲得之實驗採樣率）。另外，在 4 下的實驗採樣率為理論採樣率的 97%；25 下的實驗採樣率為理論採樣率的 114%；35 下的實驗採樣率為理論採樣率的 105%，推斷這些誤差可能與空氣採樣袋周圍溫度、標準氣體是否穩定及人為誤差所造成。

除了 8ppm 的測試外，研究中亦探討 1ppm 下，不同溫度對 SPME 被動式採樣器之採樣率的影響。實驗結果發現在 25 下採樣 60 分鐘 480 分鐘，實驗採樣率為 $(2.37 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min；在

35 下採樣 60 分鐘 480 分鐘，實驗採樣率為 $(3.00 \pm 0.34) \times 10^{-2}$ mL/min。將上述結果進行統計檢定，發現在 25 下之實驗採樣率相對於 35 下之實驗採樣率，兩者之差別在統計上沒有顯著意義(P 值為 0.1510)，結果如表 4-2-4 及圖 4-2-5 所示(圖中所呈現的斜率即為該狀況下所獲得之實驗採樣率)。另外，在 25 下的實驗採樣率為理論採樣率的 87 % ；35 下的實驗採樣率為理論採樣率的 107 % ，推斷此些許誤差也可能與空氣採樣袋周圍溫度、標準氣體是否穩定及人為誤差所造成。

4-2-7 不同濃度對 SPME 被動式採樣器之採樣率的影響

本研究利用恆溫箱將空氣採樣袋之周圍環境控制在約 35 情況下，探討在濃度為 1ppm 及 8ppm 情況下對 SPME 被動式採樣器之採樣率的影響。結果發現在 1ppm 下採樣 60 480 分鐘，實驗採樣率為 $(3.00 \pm 0.34) \times 10^{-2}$ mL/min ；在 8ppm 下採樣 10 120 分鐘，實驗採樣率為 $(2.94 \pm 0.12) \times 10^{-2}$ mL/min。將實驗結果進行統計檢定，發現在 1ppm 情況下之實驗採樣率相對於 8ppm 情況下之實驗採樣率，兩者之差別在統計上沒有顯著意義(P 值為 0.8510)，如表 4-2-5 及圖 4-2-6 所示(圖中所呈現的斜率即為該狀況下所獲得之實驗採樣率)。

4-2-8 濕度的影響

關於濕度是否會影響採樣器之採樣結果，於去年研究中⁽¹⁸⁾已探討過，在相對濕度為 10% 與 80% 的情況下進行採樣模擬，實驗結果發現 SPME 被動式採樣器之採樣率與其他在無濕度影響情況下之採樣率，兩者的差別並無統計上的顯著意義 (P 值為 0.8008)。

4-2-9 動態系統與採樣袋採樣率之比較

將動態標準氣體製造系統與空氣採樣袋之濃度固定為 8ppm，溫度條件同樣為 25 情況下，探討 SPME 被動式採樣器於動態標準氣體製造系統與空氣採樣袋之採樣率是否有明顯差別。得到之實驗結果如下述：動態標準氣體製造系統之採樣時間為 10 90 分鐘，實驗得知其採樣率為 $(2.93 \pm 0.11) \times 10^{-2}$ mL/min，為理論採樣率的 107%；空氣採樣袋之採樣時間為 10 分鐘 120 分鐘，其實驗採樣率為 $(3.11 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min。經統計檢定發現兩者之差別在統計上沒有顯著意義 (P 值為 0.2214)，亦即 SPME 被動式採樣器在高濃度環境下進行採樣並不受到風速因素 (20 50fpm) 的影響，如表 4-2-6 及圖 4-2-7 所示 (圖中所呈現的斜率即為該狀況下所獲得之實驗採樣率)。

另外，再將動態標準氣體製造系統與空氣採樣袋之濃度固定為

1ppm, 在溫度條件同樣為 25 °C 情況下, 再次進行風速影響的探討; 實驗結果發現: 在動態標準氣體製造系統的採樣時間為 360 分鐘下, 實驗採樣率為 $(2.82 \pm 0.20) \times 10^{-2}$ mL/min; 在空氣採樣袋之採樣時間為 60 ~ 480 分鐘下, 實驗採樣率為 $(2.37 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min。經統計檢定, 兩者之差別在統計上沒有顯著意義 (P 值為 0.1111), 即 SPME 被動式採樣器於低濃度環境下採樣時並不受到風速因素 (20 ~ 50fpm) 的影響, 如表 4-2-7 及圖 4-2-8 所示 (圖中所呈現的斜率即為該狀況下所獲得之實驗採樣率)。另外在 25 °C 下所獲得之動態標準氣體製造系統實驗採樣率為理論採樣率之 103%, 造成此些微誤差可能的原因為利用動態標準氣體製造系統模擬現場 6 小時採樣時, 自動注射系統需每一個半小時注入新的標準液, 導致每次在注入新的標準液時, 暴露系統需暫停 1 ~ 2 分鐘, 可能因此而影響標準氣體之濃度。

4-2-10 實驗室模擬現場暴露

首先以 Carboxen/Polydimethylsiloxane (CAR/PDMS) 萃取纖維經 30 秒的頂空萃取法裹附溴化氫後, 組裝成被動式採樣器, 然後利用動態標準氣體製造系統, 於實驗室中模擬暴露狀況。將 3M #3551 及 SPME 環氧乙烷被動式採樣器放進暴露腔內暴露 6 小時, 將兩者採樣器同時進行平行採樣比對, 暴露之濃度則分別為

0.5ppm、1ppm、2ppm 及 10ppm，樣本收集完畢後以氣相層析質譜儀 (GC/MS) 進行分析。結果發現本研究所設計之 SPME 被動式採樣器與 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器之平行比對顯示有良好之相關 (R=0.9861)，如圖 4-2-9 所示。

4-3 SPME 被動式採樣器之實驗採樣率

將前述各種不同條件下所得之無統計差異的結果合併計算，得到採樣器之實驗採樣率為 $(2.58 \pm 0.14) \times 10^{-2}$ mL/min，如圖 4-3-1 所示 (圖中所呈現的斜率即為實驗採樣率)。

4-4 樣本採集結果

本研究於中部地區某一醫療器材製造廠之正常操作工作日進行 3 批次之空氣中環氧乙烷暴露採樣。研究方法中擬定操作員工空氣中環氧乙烷暴露樣本之採集策略為當日該廠之開鍋搬運及抽樣檢驗員工進行採集，另一方面也於該廠之作業現場架設定點空氣採樣，採樣器架設地點如圖 4-4-1 所示，共獲得空氣樣本 31 組，如表 4-4-1 所示。

4-5 醫療器材製造廠環氧乙烷暴露樣本分析結果

本研究針對中部地區某一醫療器材製造廠進行空氣中環氧乙烷

採樣工作，採樣時間約為 6 小時，共收集到 31 組空氣樣本，樣本分析結果如表 4-5-1 及表 4-5-2 所示。根據我國『勞工作業環境空氣中有害物質容許濃度標準』，環氧乙烷的容許濃度為 1ppm(1.8mg/m³)，而樣本分析結果顯示本研究中醫療器材製造廠之作業員工均超出容許濃度標準。另外，區域採樣的結果亦顯示大部分均大於 1ppm。由表 4-5-1 及表 4-5-2 中的分析結果發現 3 批次的採樣在相同採樣時間內，SPME 環氧乙烷被動式採樣器所收集的質量較 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器多，推論原因可能是 SPME 環氧乙烷被動式採樣器的反應時間較 3M #3551 環氧乙烷被動式採樣器短所造成的結果。

圖 4-5-1 則顯示 3M #3551 及 SPME 環氧乙烷被動式採樣器之現場進行平行比對結果，經過 3 批次之空氣樣本收集後，發現具有良好之相關性 (R =0.9704)。

第五章 結論與建議

5-1 結論

由本研究之結果，可獲致下列幾點結論：

1. 於 4 °C 下保存 7 天測試採樣器壽命，其回收率可達 93%。
2. 於 4 °C 下保存 7 天測試樣本儲存穩定性，其回收率可達 97 %。
3. SPME 被動式採樣器於短時間（10 分鐘）高濃度（8ppm）情況下採樣具有可行性。
4. 利用動態標準氣體製造系統產生不同濃度，模擬作業環境六小時長時間採樣，結果發現 3M #3551 及 SPME 兩種被動式採樣器在不同實驗濃度情況下進行長時間採樣皆具有良好表現，3M #3551 被動式採樣器在不同濃度下（0.5 - 10ppm）採樣 6 小時後具有良好線性， $R = 0.9996$ ；而 SPME 被動式採樣器在不同濃度下（0.5 - 10ppm）採樣 6 小時後具有良好線性， $R = 0.9958$ 。
5. 將空氣採樣袋配製為內含有環氧乙烷 1ppm 之濃度，SPME 被動式採樣器在 25 °C 下實驗採樣率為 $(2.37 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min；在 35 °C 下之實驗採樣率為 $(3.00 \pm 0.34) \times 10^{-2}$ mL/min；將結果進行統計檢定，兩者之差別在統計上沒有顯著意義（P 值為 0.1510）。將空氣採樣袋濃度配製為 8ppm，SPME 被動式採樣器於 4 °C 下之實驗採樣率為 $(2.27 \pm 0.14) \times 10^{-2}$ mL/min；在 25 °C 下實驗採樣率

- 為 $(3.11 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min ; 在 35 °C 下實驗採樣率為 $(2.94 \pm 0.12) \times 10^{-2}$ mL/min ; 將上述結果進行統計檢定 , 檢定結果發現 4 → 25 °C (P 值為 0.0074) 兩者在統計上有顯著差異 ; 25 → 35 °C (P 值為 0.4476) 兩者在統計上並無顯著差異 ; 又 4 → 35 °C (P 值為 0.0081) 兩者在統計上有顯著差異 ; 顯示 SPME 被動式採樣器於採樣時可能受到溫度的影響 , 其中又以低溫的影響較大。
6. 不同濃度下 (0.5 ~ 8 ppm) , SPME 被動式採樣器之採樣率不受影響。
 7. 在 25 °C 且環氧乙烷濃度為 1 ppm 情況下 , 動態標準氣體製造系統實驗採樣率為 $(2.82 \pm 0.20) \times 10^{-2}$ mL/min , 空氣採樣袋之實驗採樣率為 $(2.37 \pm 0.08) \times 10^{-2}$ mL/min , 將其實驗結果進行統計檢定 (P 值為 0.1111) , 兩者之差別在統計上沒有顯著意義 , 結果顯示 SPME 被動式採樣器在高濃度環境下進行採樣並不受到風速因素的影響。
 8. 本研究之實驗平均採樣率為 $(2.58 \pm 0.14) \times 10^{-2}$ mL/min。
 9. SPME 與 3M #3551 被動式採樣器於實驗室動態標準氣體製造系統平行比對顯示有良好相關 (R=0.9861)。
 10. 根據我國『勞工作業環境空氣中有害物質容許濃度標準』, 環氧乙烷的容許濃度為 1 ppm (1.8 mg/m³) , 而樣本分析結果顯示本研

究中醫療器材製造廠之作業員工均超出容許濃度標準。另外，區域採樣的結果亦顯示大部分均大於 1ppm。

11. SPME 與 3M #3551 被動式採樣器於現場採樣平行比對具有良好相關性 ($R=0.9704$)。

5-2 建議

(一) 實驗建議

1. 利用動態標準氣體製造系統模擬現場六小時採樣時，因受設備限制(自動注射系統需每一個半小時注入新的標準液)，導致每次在注入新的標準液時，暴露系統需暫停 1 2 分鐘，可能因此而影響標準氣體之濃度。
2. 在醫療器材製造廠進行個人空氣樣本採集時，配置在勞工身上的 SPME 被動式採樣器在勞工進行搬運及抽樣等現場操作工作時，可能會被衣服的皺褶擋住採樣器開口面而影響樣本的採集結果。
3. 未來期望將此 SPME 被動式採樣器應用於其他物質之採樣分析上，針對影響被動式採樣器之各項因素利用實驗加以詳細驗證，期對工業衛生領域有更大貢獻。

(二) 對採樣工廠之建議

1. 醫療器材製造廠空氣中環氧乙烷區域採樣的結果顯示，大部分均

高於容許濃度標準，就勞工之健康進行考量，應可將廠區之通風效能進行改善或安裝類似之設備，以減少勞工暴露的可能。

2. 研究中之醫療器材製造廠使用環氧乙烷當消毒滅菌劑時，並無安裝適當之污染防治設備，若在製程中上加裝防治設備，擬可大大減少勞工的暴露及環氧乙烷外洩的可能。
3. 文獻指出抽煙有暴露環氧乙烷的可能^(23, 32)，若員工有抽煙習慣者應盡量避免，以減少致癌風險。
4. 本研究所測定之空氣中環氧乙烷結果顯示醫療器材製造廠勞工暴露情形均高於容許濃度標準，且勞工於現場搬運及抽樣檢驗時均無配戴任何呼吸防護具，建議員工在現場工作時應配戴適合之呼吸防護具，以降低其環氧乙烷的暴露。

參考文獻

1. 陳成裕、石東生：環氧乙烷勞工暴露調查（三），IOSH89-A308，行政院勞工安全衛生研究所，2002。
2. 行政院環保署，化學物質毒理資料庫，
<http://www.twdep.gov.tw/www/d50/d52/toxdata/indexbak.html>
3. Snellings, W. M.; Weil, C. S., and Maronpot, R. R., A two-year inhalation study of carcinogenic potential of ethylene oxide in Fischer 344 rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1984 ; 75 : 105-117.
4. Fennell, T. R., Biomarkers of exposure and susceptibility application to ethylene oxide. *Chemical Industry Institute of Toxicology.* 1996 ; Vol. 16 No. 11. : 1-10.
5. Lynch, D. W.; Lewis, T. R.; Moorman, W. F.; Burg, J. R.; Groth, D. H.; Khan, A.; Acherman, L. J. and Cockrell, B. Y., Carcinogenic and toxicologic effects of ethylene oxide and propylene oxide in F-344 rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1984 ; 76 : 69-84.
6. National Toxicology Program. Toxicology and carcinogenesis studies of ethylene oxide in B6C3F1 mice. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Institutes of Health, research Triangle Park, NC. 1988.
7. 郭憲文：環氧乙烷對醫護人員之危害，護理新象 中華民國 86 年九月；第 7 卷第 3 期：689-693。
8. 國際癌症研究總署（International Agency for Research on Cancer,

IARC) , Lists of IARC Evaluations ,
<http://monographs.Iarc.fr/monoeval/crthgr01.html>

9. 行政院勞委會「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」, 1985。
10. Organic Method No. 49, OSHA Analytical Laboratory, OSHA, UT, 1984.
11. Organic Method No. 50, OSHA Analytical Laboratory, OSHA, UT, 1985.
12. Manual of Analytical Methods (NMAM), Method 1614, 4th Edition, NIOSH, 1994.
13. 行政院勞委會採樣分析建議方法 CLA5018 , 2002。
14. 3M Company, Occupational Health & Environmental Safety Division, Determination of ethylene oxide in air using 3M 3550/3551 ethylene oxide monitors, September 1997.
15. Mullins, H. E., Part-per-million diffusional sampling for ethylene oxide with the 3M #3550 ethylene oxide monitor, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1985 ; 46: 625-631.
16. 汪禧年、詹長權、張立德：環氧乙烷熱脫附採樣分析技術，勞工安全衛生研究季刊 中華民國 86 年 9 月；第 5 卷第 3 期：37-51。
17. 王文忻、陳仕杭：環氧乙烷之自動熱脫附/氣相層析儀分析方法研究，工業衛生學術研討會論文摘要 2002：323-324。
18. 吳鎧光：以固相微萃取技術發展空氣中環氧乙烷之被動式採樣器，中國醫藥學院環境醫學研究所，2002 碩士論文。
19. 黃敬德、謝有容：固相微萃取技術之原理及其應用，Chemistry, Dec.,

- 1998 ; Vol. 56, No. 4 : 311~318.
- 20.張娣安：以固相微萃取技術發展空氣中戊醛之被動式採樣器，中國醫藥學院環境醫學研究所，2001 碩士論文。
 - 21.許麗秋：尿中 BTEX 與其代謝產物關係之研究，中國醫藥學院環境醫學研究所，2000 碩士論文。
 - 22.環氧乙烷物質安全資料表，勞工安全衛生研究所。
 - 23.曾毓珊：利用血紅素和環氧乙烷共價鍵評估因抽煙暴露到環氧乙烷對人體之危害，中國醫藥學院環境醫學研究所，2000 碩士論文。
 - 24.Shore, R.E.; Gardner, M.J. and Pannett, B., Ethylene oxide: an assessment of the epidemiological evidence on carcinogenicity, British Journal of Industrial Medicine 1993 ; 50 : 971-997.
 - 25.蘇燦煮、陳月枝：醫療人員對醫院內環氧乙烷管理的重視與滿意度調查，醫學教育 1999；第 2 期第 4 卷：409-418。
 - 26.美國工業安全衛生師協會（ACGIH）環氧乙烷容許濃度標準，1999。
 - 27.美國職業安全衛生署（OSHA）環氧乙烷容許濃度標準，1989。
 - 28.美國國家職業安全衛生研究所（NIOSH）環氧乙烷容許濃度標準，1990。
 - 29.劉紹興：醫院中環氧乙烷氣體消毒之正確操作及防護方法，工業安全衛生月刊 1991；第四期：18-32。
 - 30.林世昌、黃勝凱、陳伍仁：某醫院空氣環氧乙烷及笑氣濃度之調查研

- 究，工業安全衛生月刊 1995；第八期：21-28。
- 31.陳成裕：國內環氧乙烷勞工暴露調查，勞工安全衛生簡訊 中華民國 92 年 4 月雙月刊第 58 期。
- 32.Törnqvist, M.; Osterman-Golkar; Kautiainen, A.; Jensen, S.; Farmer, P.B. and Ehrenberg, L., Tissue doses of ethylene oxide in cigarette smokers determined from adduct levels in hemoglobin, *Carcinogenesis* 1986 ; 7 : 1519-1521.
- 33.Jay, W. M.; Swift, T. R. and Hull, D. S., Possible relationship of ethylene oxide exposure to cataract formation, *American Journal of Ophthalmology* 1982 ; 93 : 727-732.
- 34.Florack, E. I. M.; Zielhuis, G. A., Occupational ethylene oxide exposure and reproduction. *Int Arch Occup Environ Health* 1990 ; 62 : 273-277.
- 35.<http://www.epa.gov.tw/j/toxic/msword/s061.htm>
- 36.張峻鳴：水中醛類檢測方法之改進，中國醫藥學院環境醫學研究所，2002 碩士論文。
- 37.Magdic. S.; Pawliszyn, J. B., Analysis of organochlorine pesticides using solid-phase microextraction, *Journal of Chromatography A* 1996 ; 723 : 111-122.
- 38.Liu, Y. P.; (劉雅萍) , Ho, W. H. (何武雄) , Analysis of dichlorobenzene in water by solid-phase microextraction, *Journal of the Chinese Chemical Society* 2000 ; 47 : 415-420.
- 39.Röhrig L.; Meisch H. U., Application of solid phase micro extraction for

- the rapid analysis of chlorinated organics in breast milk, *Fresenius J Anal Chem* 2000 ; 366 : 106-111.
40. Martos, P. A.; Pawliszyn, J., Time-weighted average sampling with solid-Phase microextraction device: Implications for enhanced personal exposure monitoring to airborne pollutants, *Anal. Chem.* 1999 ; 71 : 1513-1520.
41. Koziel, J. A.; Pawliszyn, J., Air sampling and analysis of volatile organic compounds with solid phase microextraction, *Air & Waste Manage. Assoc.* 2001 ; 51 : 173-184.
42. Tsai, S.W.; Chang T.A., Time-weighted average sampling of airborne *n*-valeraldehyde by a solid-phase microextraction, *Journal of Chromatography A* 2002 ; 954 : 191-198.
43. Tsai, S.W.; Wu, K.K., Determination of ethylene oxide by solid-phase microextraction device with on-fiber derivatization, *Journal of Chromatography A* 2003 ; 991 : 1-11.
44. Hook, G. L.; kimm, G. L.; Hall, T.; Smith, P. A., Solid-phase microextraction (SPME) for rapid field sampling and analysis by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), *trends in analytical chemistry* 2002 ; 20 : 534-543.
45. Llompert, M.; Li, K.; Fingas, M., Headspace solid-phase microextraction for the determination of volatile and semi-volatile pollutants in water and air, *Journal of Chromatography A* 1998 ; 824 : 53-61.
46. Menéndez, J. C. F.; Sánchez, M. L. F. ; Uría, J. E. S.; Martínez, E.F.;

- Sanz-Medel, A., Static headspace, solid-phase microextraction and headspace solid-phase microextraction for BTEX determination in aqueous samples by gas chromatography, *Analytica Chimica Acta* 2000 ; 415 : 9-20.
- 47.Snow, N. H., Solid-phase micro-extraction of drugs from biological matrices, *Journal of Chromatography A* 2000 ; 885 : 445-455.
- 48.Alpendurada, M. de F., Review, Solid-phase microextraction: a promising technique for sample preparation in environmental analysis, *Journal of Chromatography A* 2000 ; 889 : 3-14.
- 49.徐倣輝：擴散式採樣之介紹，*勞工安全衛生研究季刊* June 1993 ; Vol. 1, No. 1 : 51-66。
- 50.徐倣輝：被動式採樣之介紹，*勞工安全衛生簡訊* 第五期，
<http://www.iosh.gov.tw/data/f2/sp5-1.htm>
- 51.林嘉明、石東生、吳麗珠、羅恆廉：被動式採樣器性能評估準則之探討，*勞工安全衛生研究季刊* 中華民國 83 年 6 月；第二卷第二期: 67-84
- 52.林嘉明、石東生、吳麗珠、侯嘉音：國內勞工作業場所被動式採樣器供需之估計，*勞工安全衛生研究季刊* 中華民國 83 年 2 月；第二卷第一期：57-64。
- 53.林嘉明、石東生、吳麗珠、馬藹玲：被動式採樣器研究發展的回顧，
勞工安全衛生研究論文 中華民國 83 年 2 月；第二卷第一期：65-75。
- 54.Pawliszyn, J. (ED.), *Applications of solid-phase microextraction*, Royal

- Society of Chemistry, Cambridge, 1999.
55. Khaled, A.; Pawliszyn J., Time-weighted average sampling of volatile and semi-volatile airborne organic compounds by the solid-phase microextraction device, *Journal of Chromatography A* 2000; 892 : 455-467.
 56. Tompkins, F. and Goldsmith R., A new personal dosimeter for the monitor of industrial pollutants. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1977;38:371-377.
 57. Cummins, K. J.; Schulta, G. R.; Lee, J. S.; Nelson, J. H.; Reading, J. C., The development and evaluation of a hydrobromic acid-coated sampling tube for measuring occupational exposures to ethylene oxide, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1987 ; 48 : 563-573.
 58. Esposito, G. G.; Williams, K.; Bongiovanni, R., Determination of ethylene oxide in air by gas chromatography, *Anal. Chem.* 1984 ; 56 : 1950-1953.
 59. Puskar, M. A.; Szopinski, F. G.; Hecker, L. H., Development and validation of a protocol for field validation of passive dosimeters for ethylene oxide excursion limit monitoring, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1991 ; 52 : 145-150.
 60. Szopinski, F. G.; Puskar, M. A.; Hecker, L. H., Field validation of three passive dosimeters for excursion limit monitoring of ethylene oxide, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1991 ; 52 : 151-157.
 61. Romano, S. J.; Renner, J. A., Analysis of ethylene oxide – worker exposure, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1979 ; 40 : 742-745.
 62. Sobaszek, A.; Hache, J. C.; Frimat, P.; Akakpo, V.; Victoire, G.; Furon, D., Working conditions and health effects of ethylene oxide exposure at hospital sterilization sites, *Journal of Environment Medicine* 1999 ; 41 :

- 492-499.
- 63.Hori, H.; Yahata, K.; Fufishiro, K.; Yoshizumi, K.; Li, D., Personal exposure level and environmental ethylene oxide gas concentration in sterilization facilities of hospitals in Japan, *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 2002 ; 17 : 634-639.
- 64.Jones, W.; Palmes, E.D.; Tomczyk, C.; Millson, M., Field comparison of two methods for the determination of NO₂ concentration in air, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1979 ; 40 : 437-438.
- 65.Bishop, E. C.; Hossain, M. A., Field comparison between two nitrous oxide(N₂O) passive monitors and conventional sampling methods, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1984 ; 45 : 812-816.
- 66.Field, R. W.; Kross, B. C., Field comparison of several commercially available radon detectors, *American Journal of Public Health* 1990 ; 80 : 926-930.
- 67.Chang, L.T.; Suh, H. H.; Wolfson, J. M.; Miara, K.; Allen, G. A., Laboratory and field evaluation of measurement methods for one-hour exposures to O₃, PM_{2.5}, and CO, *Journal of the Air & Waste Management Association* 2001 ; 51 : 1414-1422.
- 68.Kring, E. V.; Henry, T. J.; Damrell, D. J.; Bythewood, T. K., Laboratory and field comparison of three methods for monitoring sulfur dioxide in air, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1983 ; 44 : 929-936.
- 69.Demange, M.; Görner, P.; Elcabache, J. M.; Wrobel, R., Field comparison of 37-mm closed-face cassettes and IOM samplers, *Applied Occupational*

- and Environmental Hygiene 2002 ; 17 : 200-208.
70. Vaughan, N. P.; Chalmers, C. P.; Botham, R. A., Field comparison of personal samplers for inhalable dust, Ann. Occup. Hyg. 1990 ; 34 : 553-573.
71. Rich, D. Q.; Yiin, L. M.; Rhoads, G. G.; Glueck, D. H.; Weisel, C., A field comparison of two methods for sampling lead in household dust, Journal of Exposure analysis and Environmental Epidemiology 1999 ; 2 : 106-112.
72. Davies, H. W.; Teschke, K.; Demers, P. A., A field comparison of inhalable and thoracic size selective sampling techniques, Ann. Occup. Hyg. 1999 ; 43 : 381-392.
73. 蘇燦煮、陳月枝：台大醫院積極因應二十一世紀低溫滅菌的變革，護理新象 中華民國八十六年九月；第 7 卷第三期：698-701。
74. 行政院環保署環境檢驗所，環境檢驗室品質管制指引通則 中華民國 92 年 2 月，文件編號：NIEA-PA101。
75. 行政院環保署環境檢驗所，環境檢測標準方法驗證程序準則，中華民國 87 年 2 月。
76. 行政院勞工安全衛生研究所，作業環境有害物採樣分析參考方法驗證程序第二版，中華民國 91 年 10 月。

表 2-8-1 萃取纖維之種類

Types of SPME Fibers

Bare fused silica	Adsorbent	polar
7 um polydimethylsiloxane (PDMS)	Absorbent	nonpolar
30 um PDMS	Absorbent	nonpolar
100 um PDMS	Absorbent	nonpolar
85 um PA	Absorbent	polar
75 um PDMS-DVB	Adsorbent	bipolar
75 um CW-DVB	Adsorbent	polar
50 um/30 um DVB/Carboxen-PDMS	Adsorbent	bipolar
★ 75 um Carboxen-PDMS	Adsorbent	bipolar

★為本研究所使用之萃取纖維

表 4-1-1 2-溴乙醇檢量線面積

注入質量(ng)	戊醇內標 (Area)	2-溴乙醇 (Area)	校正後之 2-溴乙醇 (Area)
8.37	4859	1215	1108
16.74	4532	2413	2360
41.85	4058	5457	5962
83.7	4791	13201	12216
167.4	4108	26090	28159
334.8	4255	55199	57518

表 4-1-2 3M #3551 被動式採樣器 QA/QC 執行結果

執行項目	QA/QC 規範	QA/QC 執行結果
檢量線製作	R > 0.995	R 均 > 0.995
方法偵測極限	以檢量線最低濃度, 進行 7 次重複測定, 取分析結果之 3 SD	1.68ng
儀器偵測極限	空白樣本分析 7 次, 取其 3SD, 再除以檢量線之斜率	0.0894ng
分析準確度	相對偏差 < 10 %	4.08 %
分析精密度	CV < 7 %	3.70 %
脫附效率	> 85 %	103.0±3.8 %

表 4-1-3 SPME 被動式採樣器 QA/QC 執行結果

執行項目	QA/QC 規範	QA/QC 執行結果
檢量線製作	R > 0.995	R 均 > 0.995
方法偵測極限	以檢量線最低濃度, 進行 7 次重複測定, 取分析結果之 3 SD	1.68ng
儀器偵測極限	空白樣本分析 7 次, 取其 3SD, 再除以檢量線之斜率	0.0401ng
分析準確度	-	-
分析精密度	CV < 7 %	6.75 %
脫附效率	> 85 %	100 %

表 4-2-1 採樣器壽命及樣本穩定性^a

儲存條件	2-溴乙醇收集質量 ^b (mg)	回收率 (%) ^c
立即分析 ^d	3.71×10^{-5} (n=8)	100
儲存 2 天後之採樣器壽命 ^e	3.54×10^{-5} (n=5)	95
儲存 2 天後之樣本穩定性 ^f	3.94×10^{-5} (n=5)	107
儲存 7 天後之採樣器壽命 ^g	3.45×10^{-5} (n=4)	93
儲存 7 天後之樣本穩定性 ^h	3.59×10^{-5} (n=3)	97

^a : 將 Car/PDMS 萃取纖維以頂空萃取法裹覆 48 % 溴化氫 (HBr) 30 秒後組裝成被動式採樣器。

^b : 2-溴乙醇之收集平均質量且 CV 值均小於 10 % 。

^c : 與立即分析狀況相比較之回收率。

^d : 暴露內含有環氧乙烷濃度為 14.38 mg/m^3 之空氣採樣袋 30 分鐘，組裝成被動式採樣器之後隨即以 GC/MS 進行分析。

^e : 組裝成被動式採樣器之後儲存於室溫下 2 天後，暴露內含有環氧乙烷濃度為 14.38 mg/m^3 之空氣採樣袋 30 分鐘，再以 GC/MS 進行分析。

^f : 暴露內含有環氧乙烷濃度為 14.38 mg/m^3 之空氣採樣袋 30 分鐘，隨後組裝成被動式採樣器，儲存於室溫下 2 天後以 GC/MS 進行分析。

^g : 組裝成被動式採樣器之後儲存於 4 °C 冰箱中 7 天後，暴露內含有環氧乙烷濃度為 14.38 mg/m^3 之空氣採樣袋 30 分鐘，再以 GC/MS 進行分析。

^h : 暴露內含有環氧乙烷濃度為 14.38 mg/m^3 之空氣採樣袋 30 分鐘，隨後組裝成被動式採樣器，儲存於 4 °C 冰箱中 7 天後以 GC/MS 進行分析。

表 4-2-2 短時間高濃度採樣結果

Car/PDMS fiber

暴露濃度 (ppm)	環氧乙烷暴露時間 (min)	2-溴乙醇面積 (area)	CV 值 (%)
8	10	1141	9.09
		1286	
		1262	
		1065	
		1064	

表 4-2-3 在 8ppm 情況下不同溫度對採樣率的影響

濃度	溫度	統計檢定 (t test)
8ppm	4 → 25	P 值 = 0.0074
	25 → 35	P 值 = 0.4476
	4 → 35	P 值 = 0.0081

表 4-2-4 在 1ppm 情況下不同溫度對採樣率的影響

濃度	溫度	統計檢定 (t test)
1ppm	25 → 35	P 值 = 0.1510

表 4-2-5 不同濃度對 SPME 被動式採樣器之採樣率的影響

溫度	濃度	統計檢定 (t test)
35	1ppm → 8ppm	P 值 = 0.8510

表 4-2-6 在 8ppm 情況下空氣採樣袋與動態系統採樣率比較

溫度	濃度	統計檢定 (t test)
25	8ppm → 8ppm	P 值 = 0.2214

表 4-2-7 在 1ppm 情況下空氣採樣袋與動態系統採樣率比較

溫度	濃度	統計檢定 (t test)
25	1ppm → 1ppm	P 值 = 0.1111

表 4-4-1 醫療器材製造廠現場採樣收集之空氣樣本數

	勞工樣本	週界樣本
第 1 批次採樣	4	6
第 2 批次採樣	3	7
第 3 批次採樣	4	7
合計	11	20

表 4-5-1 醫療器材製造廠空氣樣本分析結果(3M#3551 被動式採樣器)

第一批次

樣本編號	職稱及採樣點	濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度 (ppm)
P01	搬運	5091.02	2.83
P02	搬運	-	-
P03	抽樣檢驗	5230.11	2.91
P04	抽樣檢驗	5020.97	2.79
A01	貨物區	1514.04	0.84
A02	貨物區	1366.71	0.76
A03	貨物區	688.34	0.38
A04	包裝區	385.36	0.21
A05	實驗室	321.61	0.18
A06	辦公室	208.35	0.12

第二批次

樣本編號	職稱及採樣點	濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度 (ppm)
P01	搬運	37358.23	20.76
P02	抽樣檢驗	27783.33	15.44
P03	抽樣檢驗	27491.91	15.28
A01	貨物區	6791.07	3.77
A02	貨物區	6092.99	3.39
A03	貨物區	5090.65	2.83
A04	包裝區	9019.62	5.01
A05	實驗室	2334.59	1.30
A06	辦公室	1418.39	0.79
A07	開鍋區	18021.46	10.01

第三批次

*P01 P04 為操作員工空氣樣本，A01 A07 為現場作業環境空氣樣本

表 4-5-2 醫療器材製造廠空氣樣本分析結果(SPME 被動式採樣器)

第一批次

樣本編號	職稱及採樣點	濃度 (µg/m ³)	濃度 (ppm)
P01	搬運	7189.57	4.00
P02	搬運	7112.18	3.95
P03	抽樣檢驗	10461.21	5.81
P04	抽樣檢驗	11828.89	6.57
A01	貨物區	2625.18	1.46
A02	貨物區	3580.01	1.99
A03	貨物區	1619.18	0.90
A04	包裝區	1277.58	0.71
A05	實驗室	1060.17	0.59
A06	辦公室	363.31	0.20

第二批次

樣本編號	職稱及採樣點	濃度 (µg/m ³)	濃度 (ppm)
P01	搬運	93005.06	51.68
P02	抽樣檢驗	162056.44	90.05
P03	抽樣檢驗	208493.39	115.86
A01	貨物區	10335.23	5.74
A02	貨物區	10849.69	6.03
A03	貨物區	7518.06	4.18
A04	包裝區	11551.98	6.42
A05	實驗室	2648.72	1.47
A06	辦公室	2857.94	1.59
A07	開鍋區	42655.23	23.70

第三批次

*P01 P04 為操作員工空氣樣本，A01 A07 為現場作業環境空氣樣本

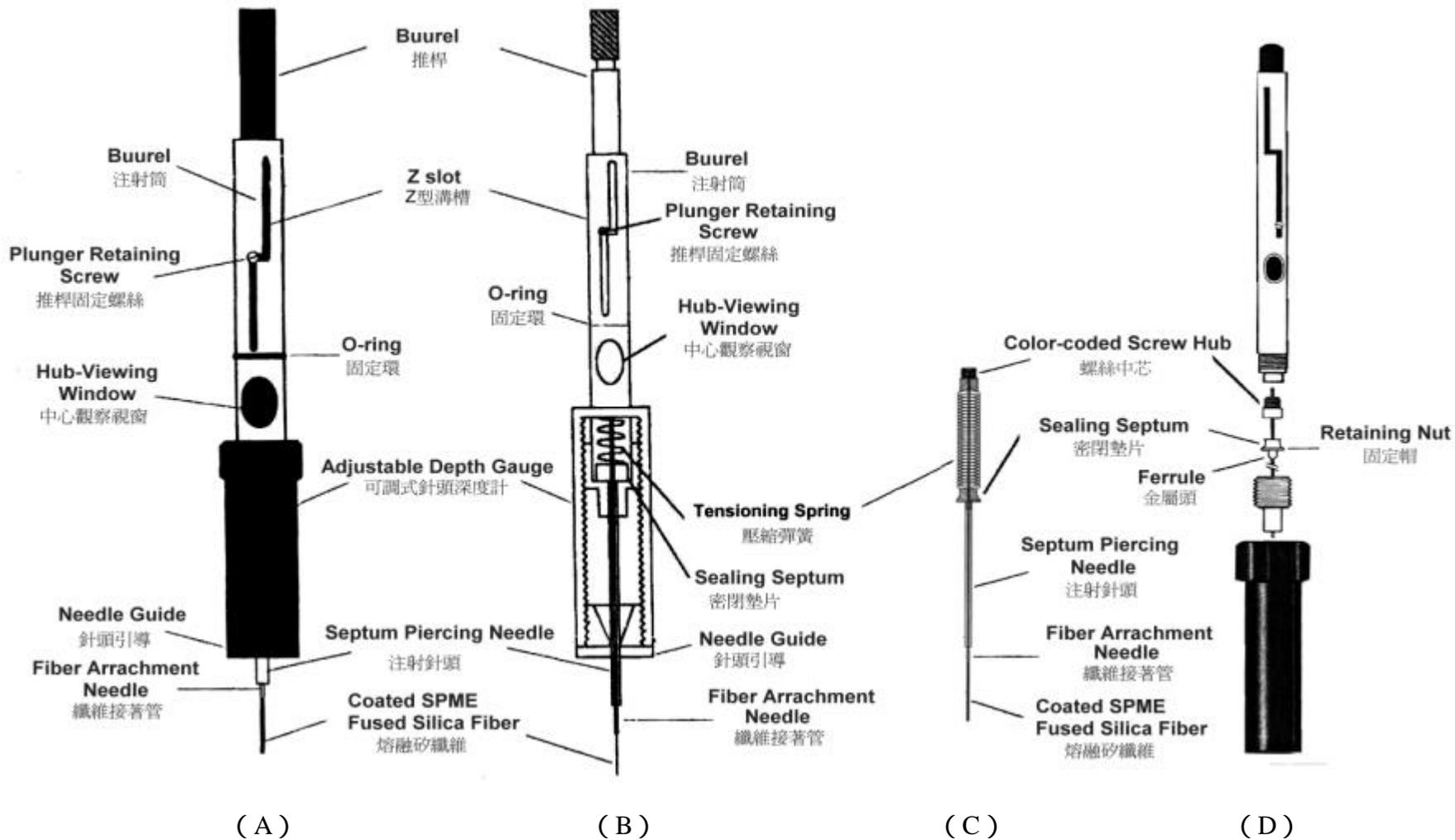


圖2-8-1 固相微萃取裝置圖⁽²⁰⁾

(A) 萃取纖維與手動裝置外觀 (B) 萃取纖維與手動裝置透視 (C) 萃取纖維外觀 (D) 裝置組裝

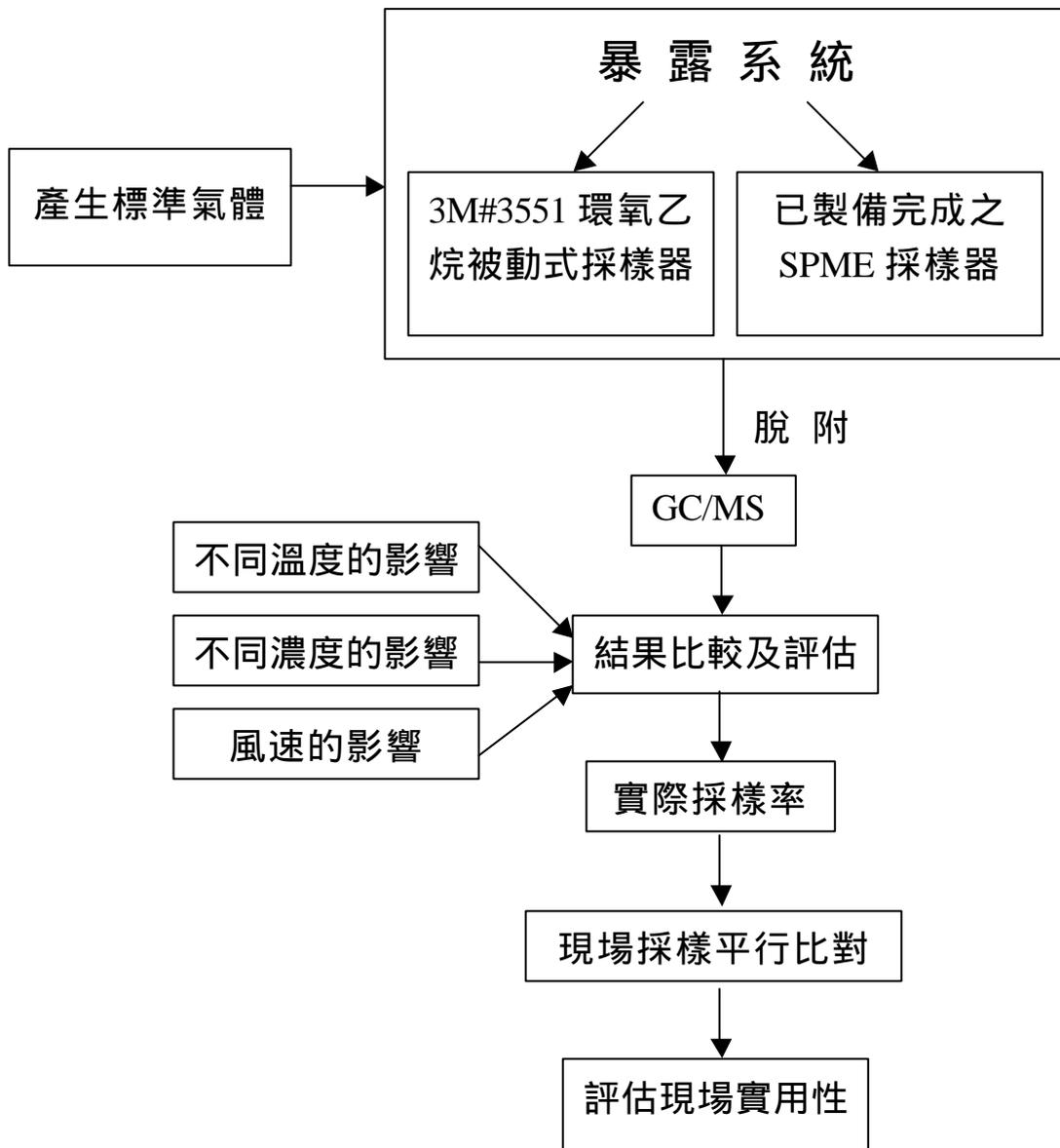


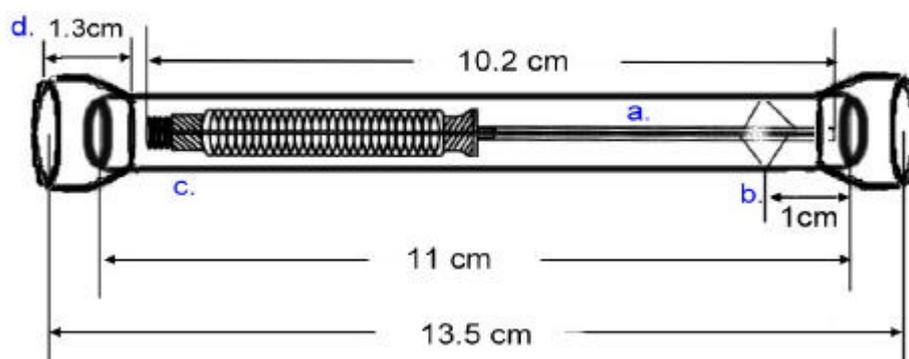
圖 3-1-1 研究架構圖



圖 3-3-1 勞工空氣樣本採集示意圖



圖 3-3-2 醫療器材製造廠作業現場採樣器架設示意圖



- a : Needle , 6cm
- b : 墊片距離採樣器開口之距離 , 1cm
- c : Teflon 管 , 11cm
- d : 橡膠封蓋 , 1.3cm

圖 3-3-3 SPME 被動式採樣器示意圖

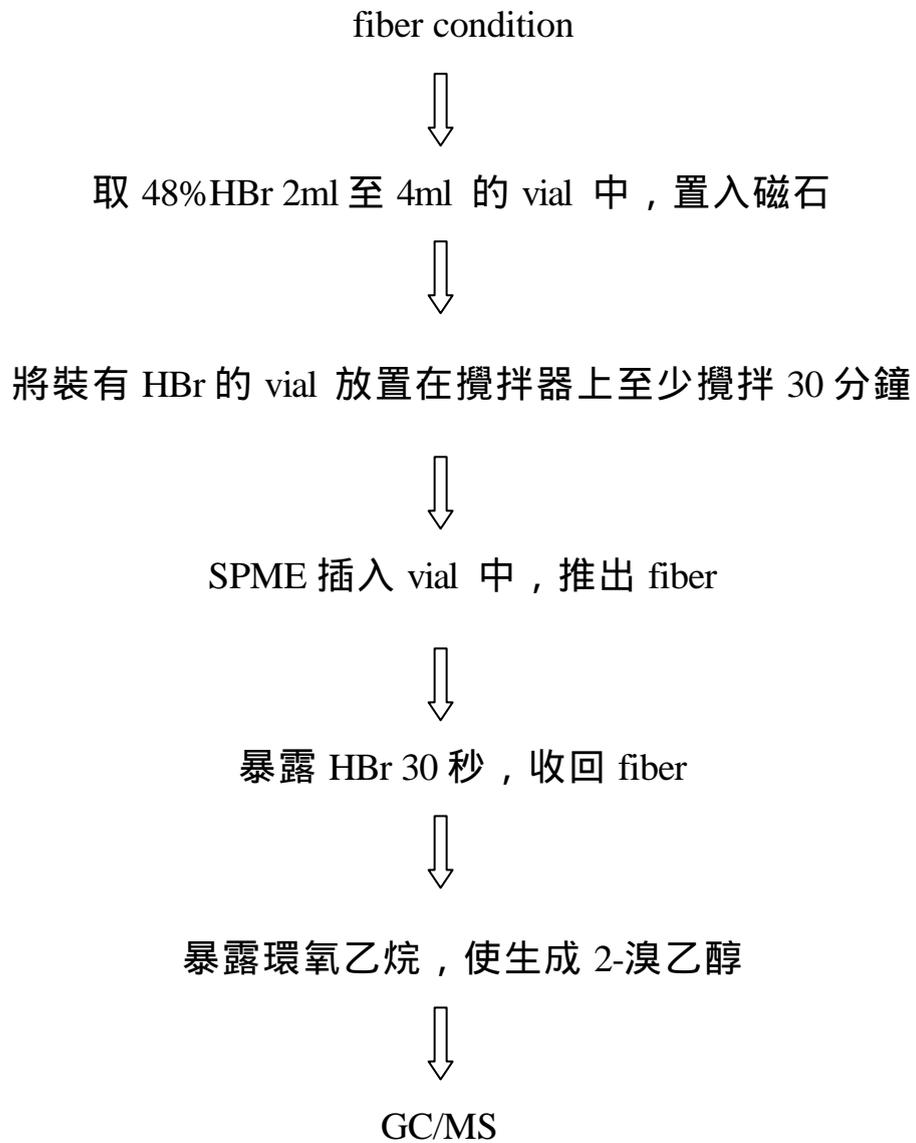


圖 3-5-1 實驗方法流程圖

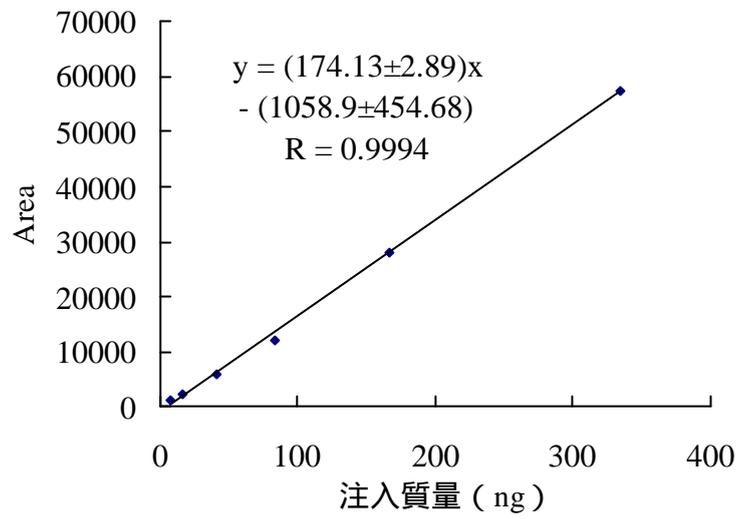


圖 4-1-1 2-溴乙醇檢量線圖

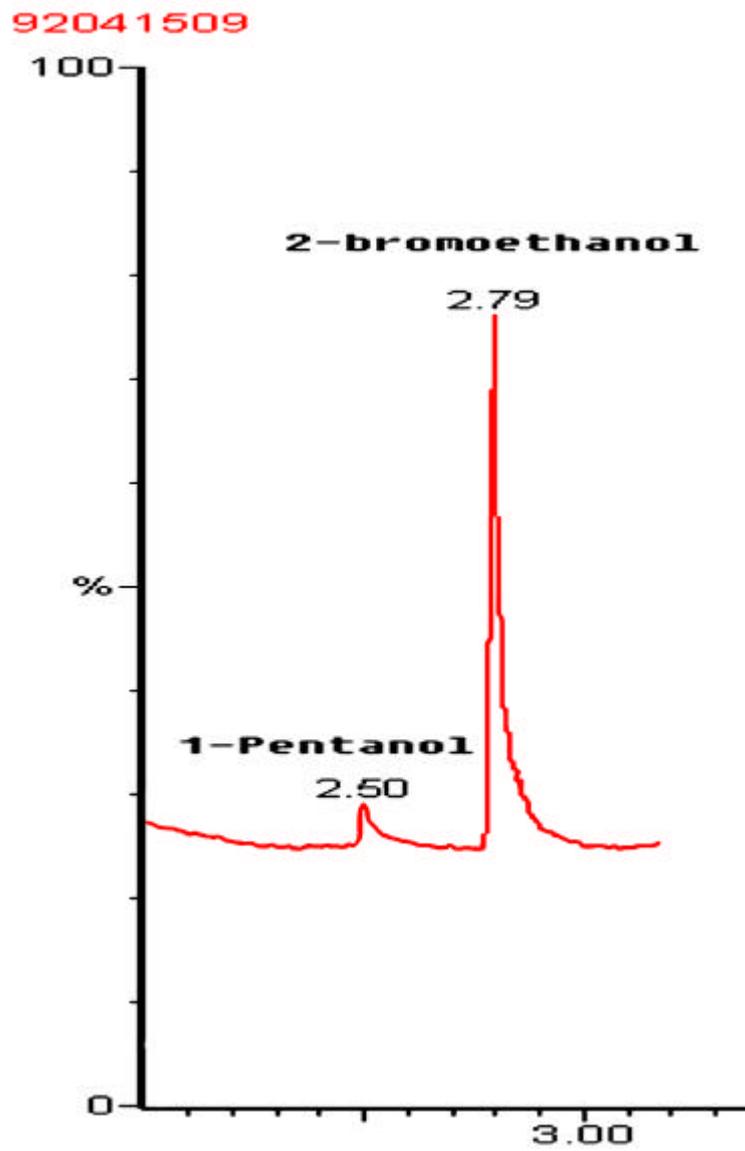


圖 4-1-2 2-溴乙醇分析圖譜

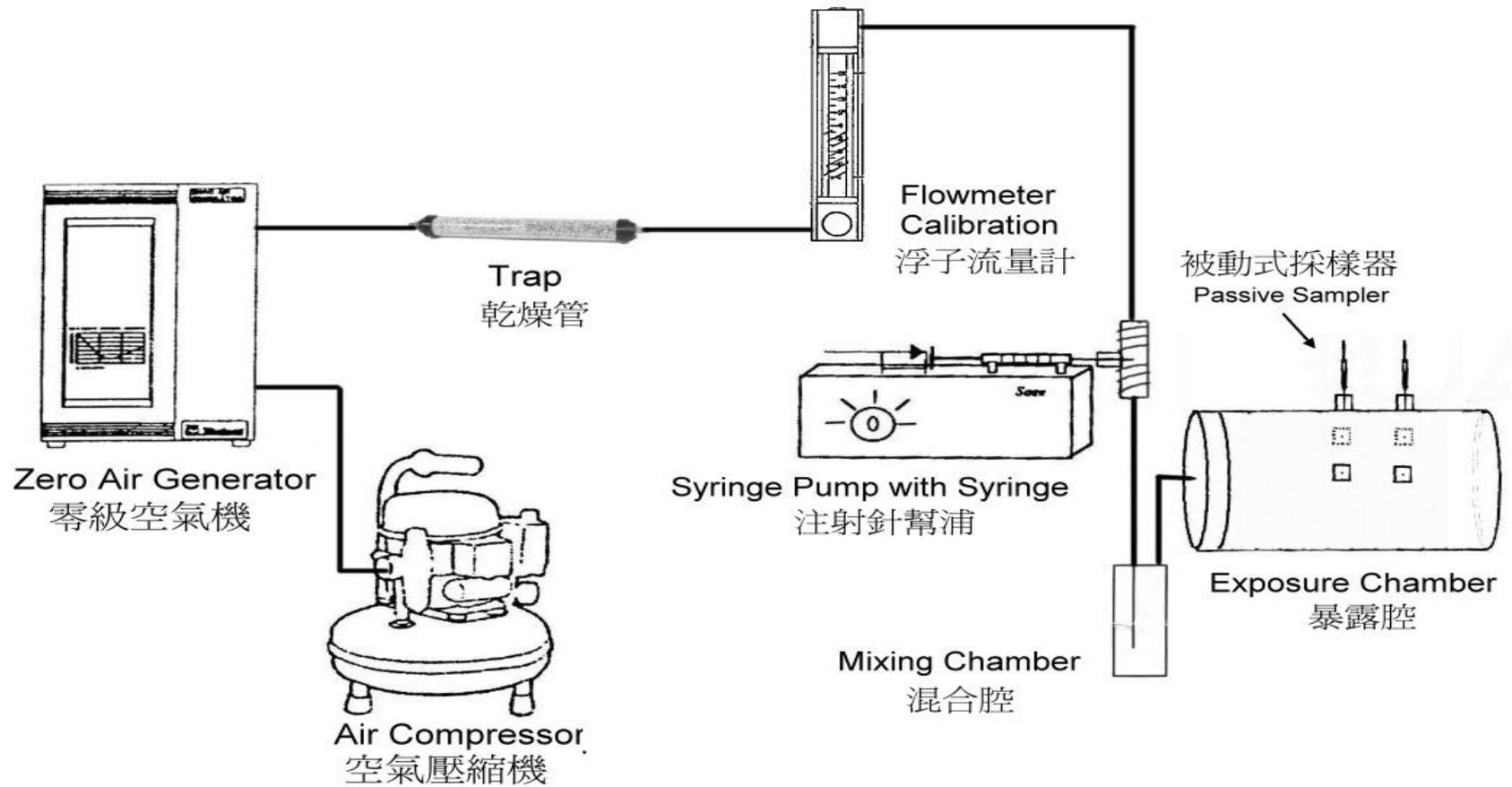


圖 4-2-1 動態標準氣體製造系統示意圖

3M #3551

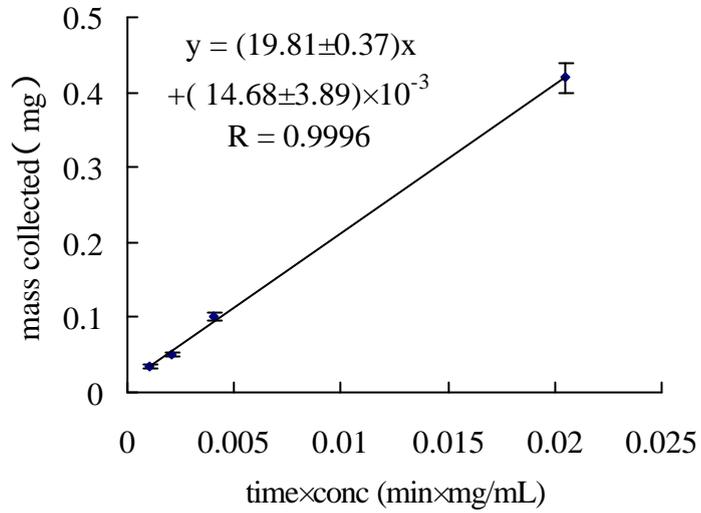


圖 4-2-2 3M #3551 被動式採樣器長時間採樣結果

SPME

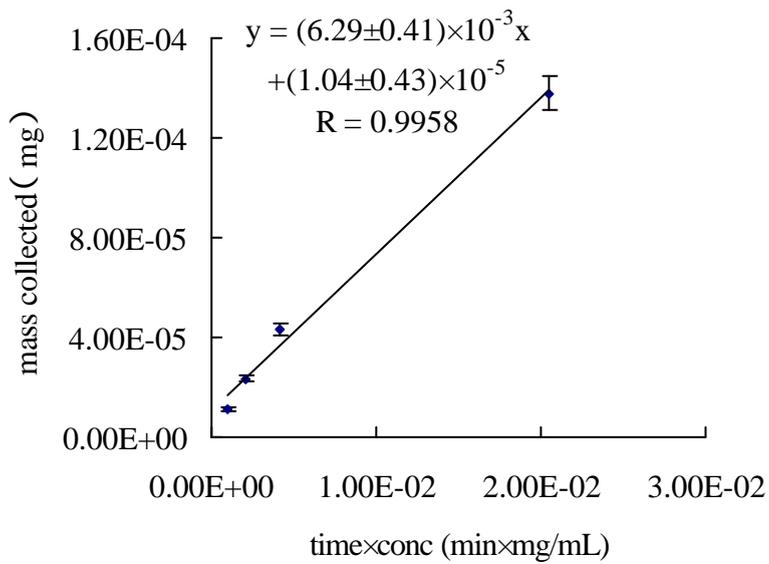


圖 4-2-3 SPME 被動式採樣器長時間採樣結果

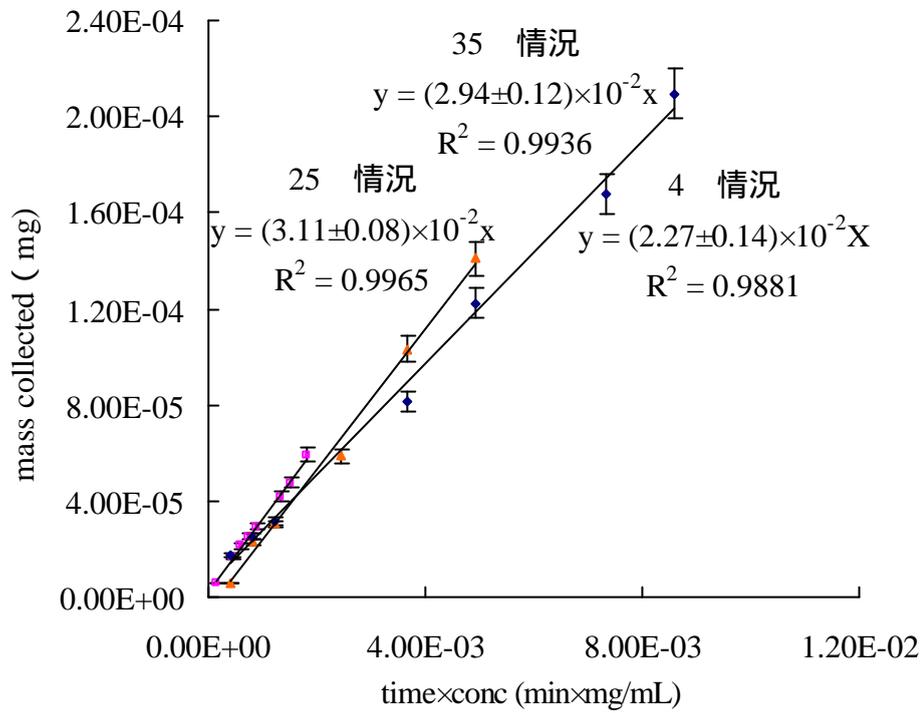


圖 4-2-4 在 8ppm 情況下不同溫度的採樣結果

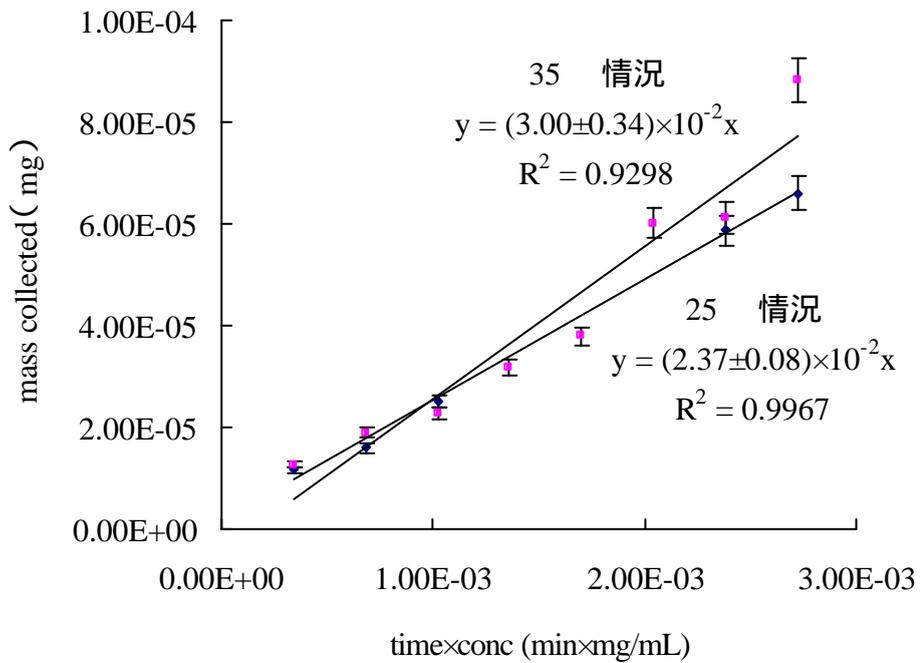


圖 4-2-5 在 1ppm 情況下不同溫度的採樣結果

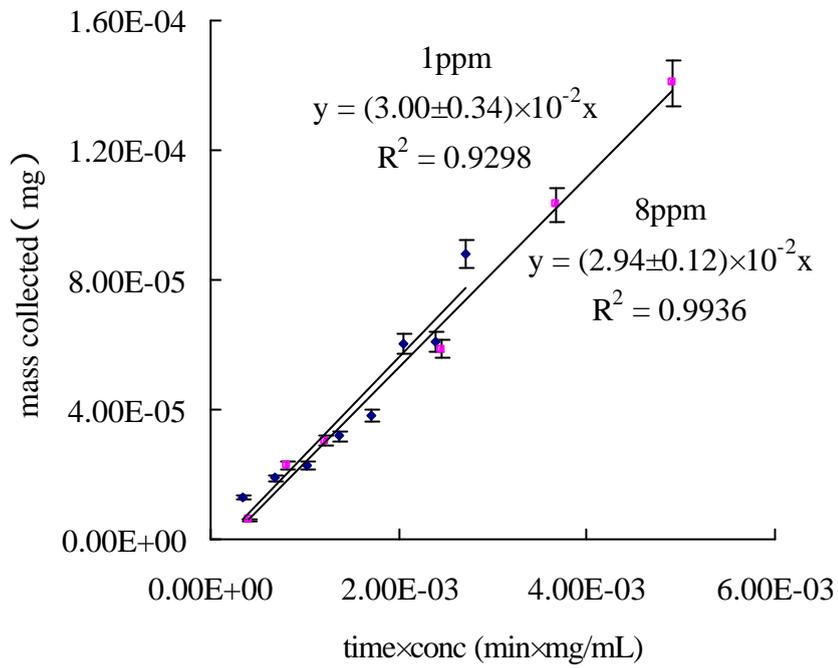


圖 4-2-6 不同濃度對 SPME 被動式採樣器的影響

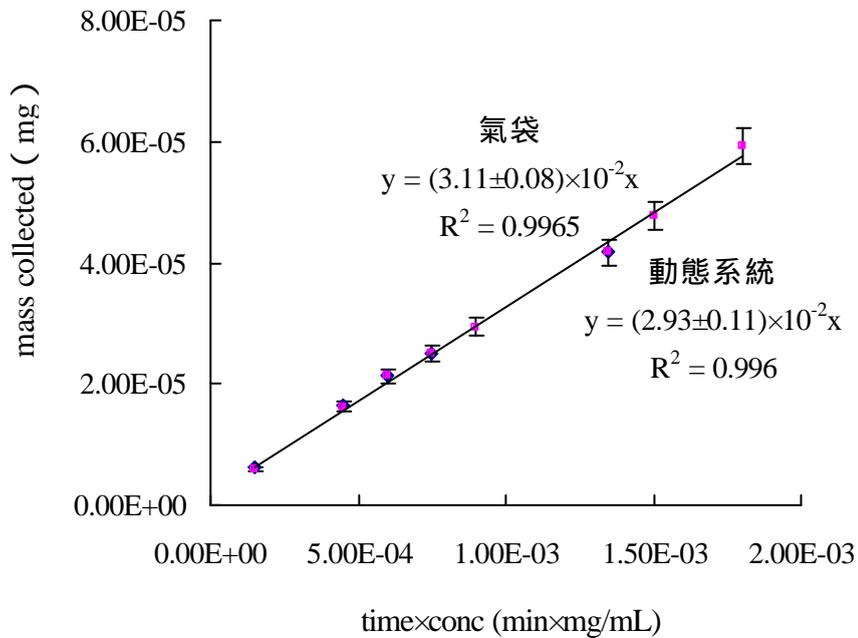


圖 4-2-7 在 8ppm 情況下空氣採樣袋與動態系統採樣率比較

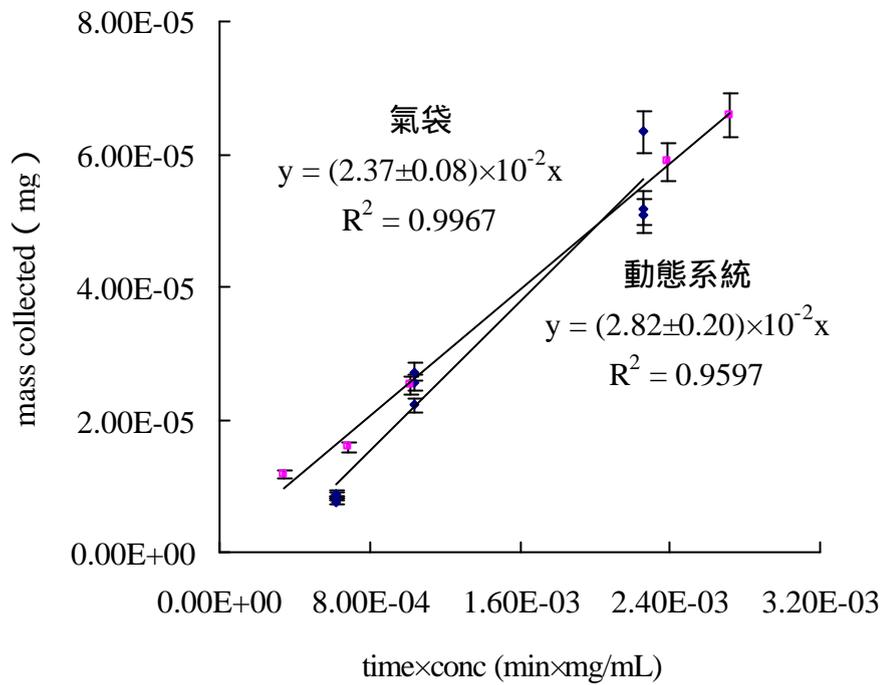


圖 4-2-8 在 1ppm 情況下空氣採樣袋與動態系統採樣率比較

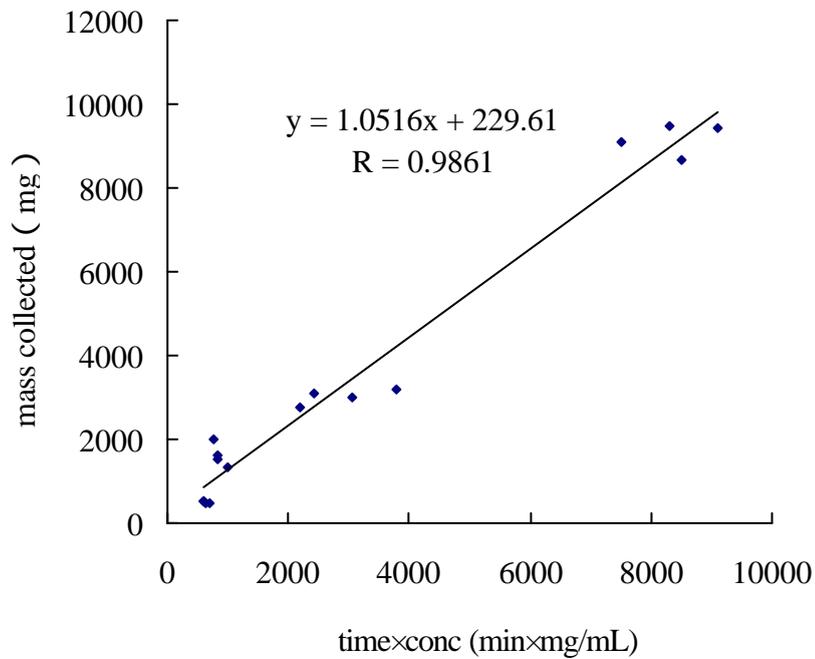


圖 4-2-9 被動式採樣器平行比對相關圖

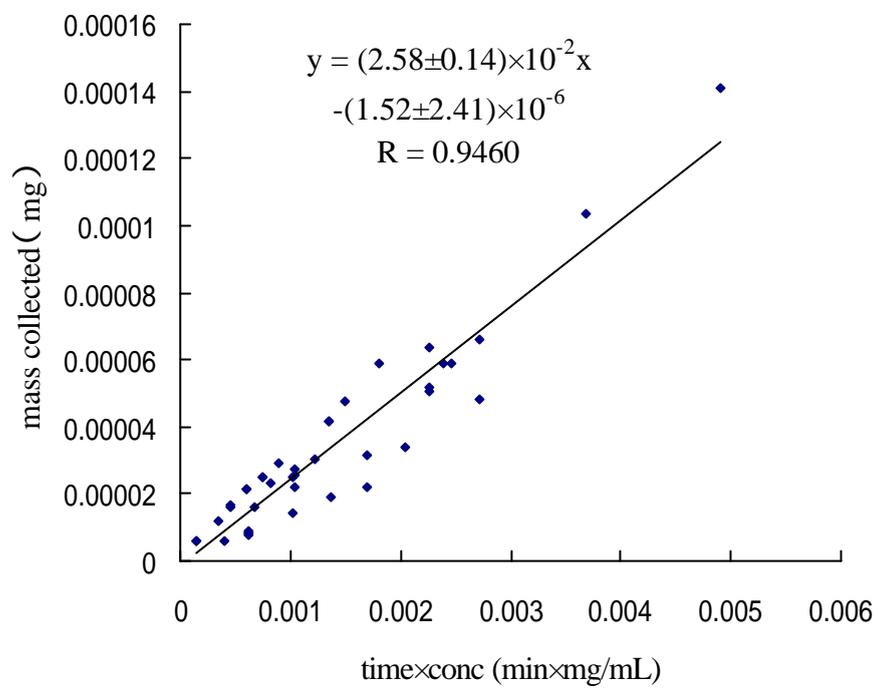
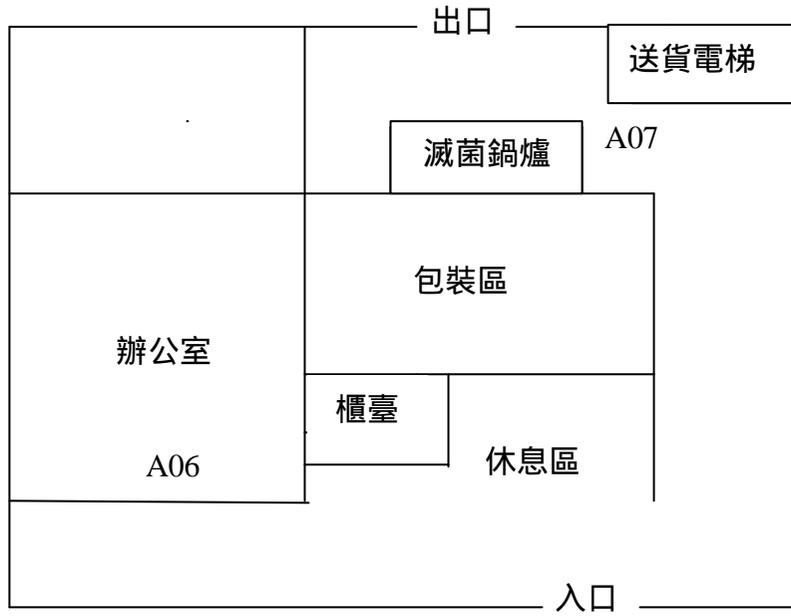
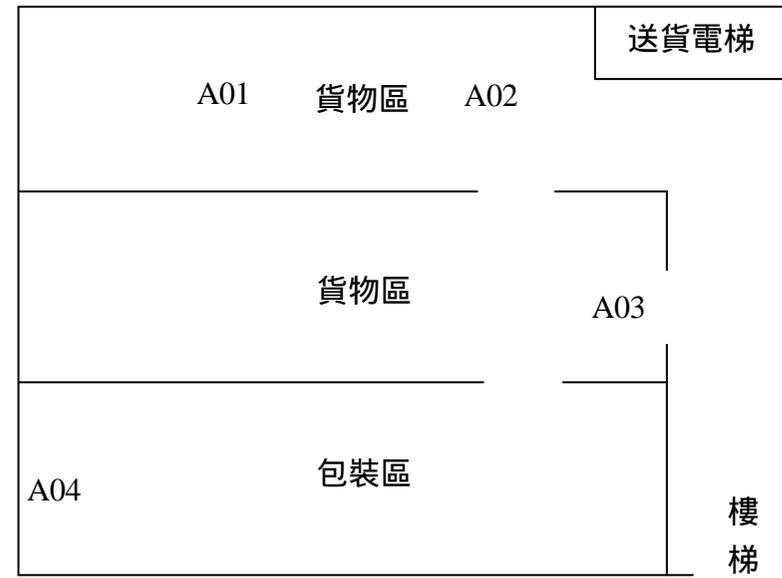


圖 4-3-1 SPME 被動式採樣器之實驗採樣率

一樓平面圖



二樓平面圖



三樓品管室平面圖

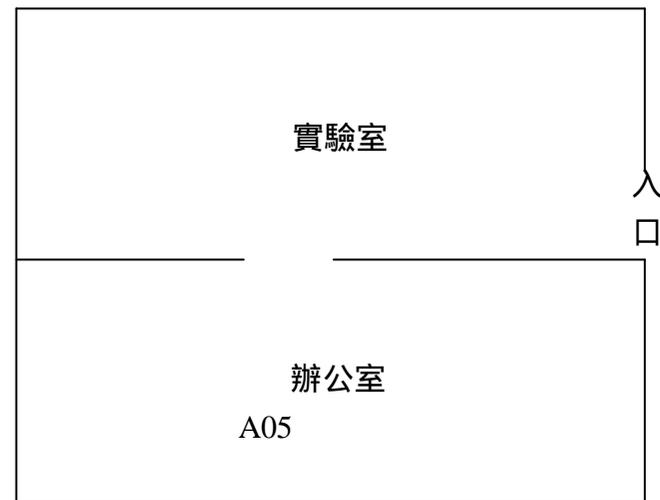
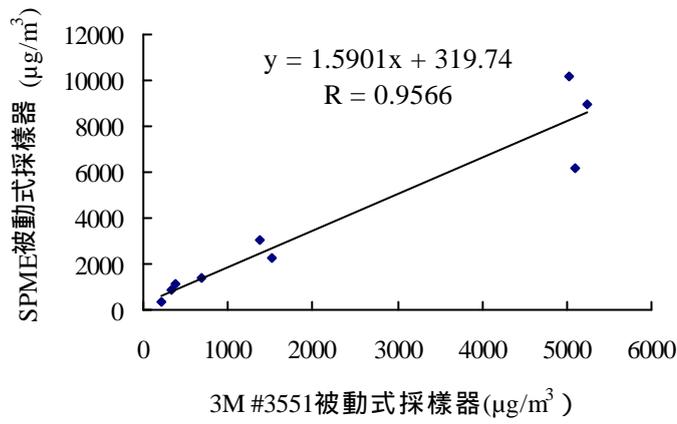
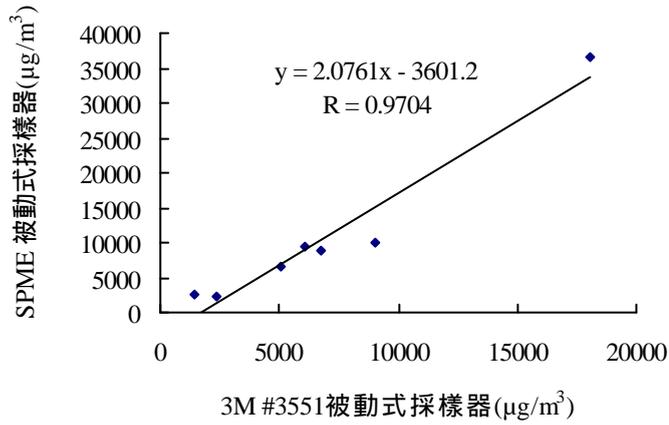


圖 4-4-1 醫療器材製造廠採樣器架設平面圖

第一批次採樣(個人+區域)



第二批次採樣(區域)



三批次個人採樣

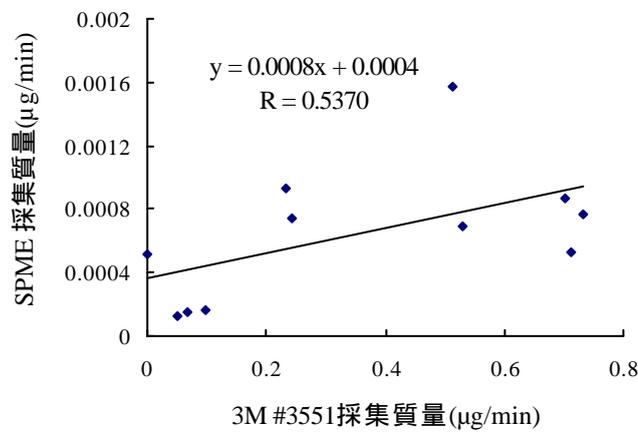


圖 4-5-1 採樣器相關性