



# 勞工安全衛生研究報告

奈米微粒作業環境控制技術性能評估  
Performance Assessment of Control Techniques for  
Nanoparticles in the Workplace Environment



行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所委託研究報告

奈米微粒作業環境控制技術性能評估

Performance Assessment of Control Techniques for  
Nanoparticles in the Workplace Environment

研究主持人：蔡春進、黃政雄

計畫主辦單位：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

研究期間：中華民國 97 年 03 月 01 日至 97 年 12 月 31 日

**\*本研究報告僅供參考用不代表本所意見\***  
**非經本所書面同意不得對外發表**

行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所

中華民國 98 年 3 月

# 目錄

目錄	i
表目錄	v
圖目錄	viii
摘要	xiv
第一章 前言	1
第一節 國內外安全奈米技術的研究	1
第二節 奈米微粒作業環境控制策略及指引	7
第三節 研究目的	8
第二章 文獻回顧	10
第一節 作業環境奈米微粒控制策略與控制技術評估	10
第二節 奈米粉體的揚塵逸散特性	26
第三節 作業環境奈米微粒暴露測量	39
第四節 奈米微粒的呼吸防護	68
第三章 研究方法	81
第一節 作業環境奈米微粒控制策略	81
第二節 實驗室奈米粉體揚塵逸散	82
第三節 作業環境奈米微粒暴露測量	89
第四節 奈米微粒過濾控制技術性能	105
第四章 結果與討論	111
第一節 實驗室奈米揚塵逸散測試	111
第二節 粉體作業環境奈米微粒暴露測量	139
第三節 衛浴設備製造廠及奈米碳管製造廠的奈米微粒暴露測量	184
第四節 奈米微粒過濾控制性能評估	189
第五章 奈米物質作業環境控制策略	195
第一節 英國國家安全奈米物質處理及處置指引	197
第二節 美國 ASTM 工作場所懸浮工程奈米微粒處置標準指引	206
第三節 日本奈米物質製造及處理作業環境現場暴露預防策略	212
第四節 日本研究、製造現場奈米科技之確切管理手段之指引	214

第五節 英國化學品分組控制評估模式-健康危害物質要件	222
第六節 各國奈米微粒作業控制策略指引的比較	226
第七節 本國奈米物質作業環境控制策略指引草案	228
<b>第六章 結論與建議</b>	<b>234</b>
第一節 結論	234
第二節 建議	235
<b>參考文獻</b>	<b>237</b>
附錄一、COSHH Essentials 網頁畫面及輸入化學品及作業情況後得到的控制方法	245
附錄二、評選會議委員意見回覆	252
附錄三、期中審查委員意見回覆	255
附錄四、期末審查委員意見回覆	258



## 表目錄

表 1 奈米廠商生產型態調查結果整理表	6
表 2 奈米微粒的分級控制及防護方法	8
表 3 奈米廠商生產型態調查結果整理表	11
表 4 薄膜濕式靜電集塵器模廠測試	20
表 5 H&V 玻璃纖維濾材特性	22
表 6 特殊濾材特性	22
表 7 三種揚塵特性試驗方法與各種工業製程程序的適用性比較	29
表 8 可吸入性粉塵、胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵的揚塵等級指標	31
表 9 14 種不同粉體在三種粉塵中的質量分率與揚塵等級	31
表 10 TiO <sub>2</sub> 奈米粉體逸散實驗結果	37
表 11 ZnO 奈米粉體逸散實驗結果	37
表 12 各式多階衝擊器及其截取直徑	42
表 13 比較兩種不同的衝擊板各階層的截取直徑	44
表 14 採樣的微粒濃度	60
表 15 OPC 所推估的質量濃度與採樣儀器量測的質量濃度之比較	62
表 16 2005 年夏天及冬天各作業區超細微粒的幾何平均數目濃度	63
表 17 2005 年夏天及冬天各作業區可呼吸性微粒的幾何平均質量濃度	64
表 18 美國 NIOSH 42 CFR Part 84 防塵口罩捕集效率之標準	70
表 19 歐盟 EN 149 : 2001 防塵口罩捕集效率之標準	71
表 20 中華民國國家標準 CNS 14755 Z2125 防塵口罩防護效率之標準	71
表 21 日本新、舊標準中濾材等級分類	71
表 22 日本新標準中濾材效率測試之條件比較	71
表 23 日本新標準中濾材等級與呼吸阻抗	72
表 24 N95 口罩的測試結果超過 5 % 穿透率的統計表	79
表 25 粉體逸散實驗時使用的粉體重量	111
表 26 粉體的物理特性資料	112
表 27 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時, 3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級二氧化鈦 NMD 和 GSD	115

表 28 以漩渦震盪法逸散次微米級二氧化鈦之 SMPS 與 APS 在不同時間點的 NMD 和 GSD 值	119
表 29 SMPS、FMPS 與 APS 在不同時間點次微米二氧化鈦粉體的 NMD 和 GSD 值	120
表 30 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時, 3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級氧化鋅 NMD 和 GSD	121
表 31 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時, 3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級二氧化矽 NMD 和 GSD	127
表 32 SMPS、FMPS 與 APS 在不同時間點次微米二氧化矽粉體的 NMD 和 GSD 值	130
表 33 粉體廠包裝時間, 石原產業	140
表 34 工廠背景和柴油堆高機廢氣中微粒的數目中間粒徑及幾何標準差, 97/09/05, 石原產業	141
表 35 逸散二氧化鈦微粒的數目中間粒徑及幾何標準差	152
表 36 量測點 3 不同採樣器比較表, 97/04/28, 石原產業	169
表 37 不同濾紙採集微粒金屬濃度, 97/04/28, 石原產業	170
表 38 固定點 3 不同採樣器比較表, 97/06/05, 石原產業	170
表 39 固定點 3 不同採樣器比較表, 97/08/07, 石原產業	171
表 40 IOSH 旋風器所量測的可呼吸性微粒重量濃度, 石原產業	172
表 41 MOUDI 採集的微粒重量濃度, 台灣石原	173
表 42 酯化纖維素濾紙 Ti 回收率	174
表 43 鐵氟龍濾紙 Ti 回收率	174
表 44 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/04/28, 石原產業	175
表 45 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/06/03, 石原產業	177
表 46 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/08/07, 石原產業	179
表 47 MOUDI 的採樣數據, 97/04/28, 石原產業	181
表 48 MOUDI 的採樣數據, 97/06/05, 石原產業	181
表 49 MOUDI 的採樣數據, 97/08/07, 石原產業	183
表 50 軌道燒成窯旁的微粒數目濃度, 97/10/22, 東陶	185

表 51 IOSH 旋風器採集的可呼吸性微粒重量濃度, 97/10/22, 東陶	185
表 52 MOUDI 採集的微粒重量濃度, 97/10/22, 東陶	185
表 53 製造奈米碳管流程中的微粒數目濃度, 97/09/16, 新奈材料	187
表 54 通風櫃背景及奈米碳管分裝時微粒的中間數目粒徑及幾何標準差, 97/09/16, 新奈材料	188
表 55 吸塵器在不同馬達轉速下, 馬達本身所排放之數目濃度	190
表 56 Nilfisk GM80 吸塵器馬達排放微粒之化學分析結果	191
表 57 勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準中的 4 種粉塵的容許濃度	196
表 58 不同工作型態的控制方法	203
表 59 R-phrases 與危害特徵	223
表 60 COSHH essentials 核心模式之考量因子	223
表 61 R-phrases 與危害分組的關係	224
表 62 四個控制分組	224

## 圖目錄

圖 1 典型局部排氣裝置	10
圖 2 空調通風系統	13
圖 3 手套櫃	14
圖 4 工業級高效率 HEPA 真空吸塵器	15
圖 5 靜電集塵器示意圖	16
圖 6 粉塵負載量與收集效率的關係	17
圖 7 濾材穿透率測試系統配置圖	22
圖 8 奈米微粒於面速度為 5.3cm/s 對 H&V 玻璃纖維濾材之穿透率	22
圖 9 奈米微粒於面速度為 15cm/s 對 H&V 玻璃纖維濾材之穿透率	23
圖 10 奈米微粒於面速度為 5.3cm/s 對特殊濾材之穿透率	23
圖 11 穿透效率與微粒粒徑之關係圖	24
圖 12 典型的文氏洗滌器	25
圖 13 文氏洗滌器的截取氣動直徑與壓差，液氣比的關係圖	25
圖 14 增加凝結機制的文氏洗滌器的示意圖	25
圖 15 增加凝結機制的文氏洗滌器可大幅增加奈米微粒的去除效率圖	26
圖 16 旋轉腔試驗機法儀器構造圖	28
圖 17 以漩渦震盪器分散單壁奈米碳管的微粒逸散數據	33
圖 18 以漩渦震盪器分散單壁奈米碳管的微粒逸散數據	34
圖 19 利用 TEM 觀察觀察 SWCNT 形貌	34
圖 20 分析奈米揚塵粒徑分佈之實驗裝置圖	36
圖 21 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，TiO <sub>2</sub> 粉體在不同時間的逸散數目濃度分布圖	37
圖 22 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，ZnO 粉體在不同時間的逸散數目濃度分布圖	38
圖 23 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，TiO <sub>2</sub> 奈米微粒在 30 分鐘內逸散的平均質量濃度分布圖	38
圖 24 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，ZnO 微粒在 30 分鐘內逸散的平均質量濃度分布圖	39
圖 25 不同的儀器所適用的粒徑範圍	41

圖 26 ELPI 的實際照片及內部構造的示意圖	44
圖 27 兩種不同衝擊板的實際照片	45
圖 28 MOUDI 的實際照片及內部構造的示意圖	45
圖 29 Nano-MOUDI-II Impactor 的實際照片	46
圖 30 Otani et al. (2007) 所設計的奈米微粒採樣器以及使用不鏽鋼濾材作為衝擊板	47
圖 31 TEOM 的外觀與內部構造圖	48
圖 32 使用正丁醇的 CPC(左圖)與使用蒸餾水的 WCPC(右圖)	49
圖 33 手提式核凝微粒計數器照片	49
圖 34 一般 CPC 的偵測效率(左圖)與 Ultrafine CPC 的偵測效率(右圖)	49
圖 35 掃描式微粒電動度分析儀 SMPS	50
圖 36 快速微粒電動度粒徑分析儀 FMPS	51
圖 37 奈米微粒表面積監測儀的外觀以及內部構造圖	52
圖 38 DC 2000 CE Diffusion Charger Sensor 的外觀與內部構造	52
圖 39 2007 年設計的奈米微粒個人採樣器	54
圖 40 PCTE 薄膜孔隙直徑為 20 $\mu\text{m}$ 的採樣器在 5.3 L/min 下的收集效率曲線，截取直徑為 104 nm	54
圖 41 ATOFMS 的實際照片及內部構造的示意圖	56
圖 42 冬天時的數目濃度分佈圖	60
圖 43 冬天時可吸入性微粒的質量濃度分佈圖	61
圖 44 春天時的濃度分佈圖	61
圖 45 2005 年夏天及冬天超細微粒的數目濃度分佈圖	63
圖 46 2005 年夏天及冬天可呼吸性微粒的質量濃度分佈圖	64
圖 47 冰水機上下游的微粒濃度	65
圖 48 第一天採樣時間列表與數目濃度關係	66
圖 49 第一天採樣時間列表與體積濃度關係	66
圖 50 第二天採樣時間列表與數目濃度關係	67
圖 51 第二天採樣時間列表與體積濃度關係	67
圖 52 市售口罩之穿透率，表面風速 3.0 cm/sec	73
圖 53 市售口罩之穿透率，表面風速 8.5 cm/sec	74

圖 54 三種廠牌口罩平均效率比較圖	74
圖 55 不同市售防塵口罩的穿透率比較圖, 表面風速 9.5 cm/sec	75
圖 56 N95 防塵口罩的穿透率, 表面風速 8.6 cm/sec	76
圖 57 本國勞工安全衛生研究所密合度的測試方法	76
圖 58 不同特殊機能口罩之密合度測試結果	77
圖 59 不同大小的洩漏孔對某 N95 防塵口罩的穿透率的影響, 表面風速 8.6 cm/sec	78
圖 60 不同大小的洩漏孔對某 N95 防塵口罩保護係數的影響, 表面風速 8.6 cm/sec	78
圖 61 不同的測試流量下 N95 防塵口罩的穿透率	79
圖 62 實驗時使用的旋轉腔體	83
圖 63 實驗時使用的漩渦震盪器	83
圖 64 實驗時使用的微小粉末分散器	84
圖 65 漩渦震盪法實驗系統架設示意圖	85
圖 66 微小粉末分散器實驗系統架設示意圖	86
圖 67 微小粉末分散器實驗系統架設示意圖(加 FMPS 及 MOUDI)	87
圖 68 旋轉腔體試驗機法實驗系統架設圖	88
圖 69 IOSH 旋風器照片圖	92
圖 70 感應耦合電漿放射光譜儀照片圖	92
圖 71 樣品前處理流程圖	94
圖 72 製程流程圖	95
圖 73 台灣石原產業公司平面及採樣位置圖	97
圖 74 作業場所照片	98
圖 75 各個量測點照片	99
圖 76 新奈材料粉體製造廠平面圖	100
圖 77 衛浴設備燒成區示意圖	101
圖 78 本研究濾紙編號的方式	102
圖 79 奈米微粒過濾實驗系統配置	106
圖 80 奈米微粒過濾實驗系統架設圖	107
圖 81 奈米微粒產生源, 蒸發-凝結系統	107



圖 82 Nilfisk GM80 HEPA 吸塵器 (a. 吸塵器本體 b&c. 吸塵器內部的集塵紙袋與濾布，氣流會先經過集塵紙袋在流經濾布，濾布上方式吸塵器馬達，最後的出口端有 HEPA filter)	108
圖 83 HEPA, Nilfisk, Type HEPA-H13	108
圖 84 國內真空吸塵器 TOSHIBA TVC-10.0 與內部裝置	109
圖 85 實驗系統流量控制(以馬達調速器對應層流流量計讀值控制流量)	110
圖 86 奈米級二氧化鈦粉體在 2 分鐘時的逸散數目濃度分布圖	113
圖 87 奈米級二氧化鈦粉體在 5 分鐘時的微粒數目濃度分布圖	113
圖 88 奈米級二氧化鈦粉體在 15 分鐘時的微粒數目濃度分布圖	114
圖 89 奈米級二氧化鈦粉體隨時間的總數目濃度變化趨勢	114
圖 90 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖	116
圖 91 以 SSPD 分散的奈米級二氧化鈦粉體之質量濃度分布圖	117
圖 92 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖	117
圖 93 以漩渦震盪器逸散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度圖	118
圖 94 以 SSPD 分散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度變化圖	120
圖 95 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖	122
圖 96 以 SSPD 分散的奈米級氧化鋅粉體之質量濃度分布圖	123
圖 97 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖	123
圖 98 次微米級氧化鋅粉體在 2 分鐘時的逸散數目濃度分布圖	125
圖 99 次微米級氧化鋅粉體在 5 分鐘時的逸散數目濃度分布圖	125
圖 100 次微米級氧化鋅粉體在 15 分鐘時的逸散數目濃度分布圖	126
圖 101 次微米級氧化鋅粉體隨時間的總數目濃度變化趨勢	126
圖 102 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖	128
圖 103 以 SSPD 分散的奈米級二氧化矽粉體之質量濃度分布圖	129

圖 104 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖	129
圖 105 以 SSPD 分散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度變化圖	131
圖 106 奈米級二氧化鈦粉體 TEM 照片	132
圖 107 奈米級二氧化鈦粉體 SEM 照片	133
圖 108 次微米級二氧化鈦粉體 SEM 照片	134
圖 109 次微米級氧化鋅粉體 SEM 照片	135
圖 110 奈米級二氧化矽粉體 SEM 照片	136
圖 111 奈米級二氧化矽粉體 TEM 照片	137
圖 112 次微米級二氧化矽粉體 SEM 照片	138
圖 113 堆高機廢氣與廠內背景微粒濃度的粒徑分布	140
圖 114 FMPS 量測柴油堆高機對廠內微粒數目濃度的影響	141
圖 115 FMPS 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/04/28, 石原產業	143
圖 116 CPC 3007 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/04/28, 石原產業	144
圖 117 CPC 3007 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/06/05, 石原產業	146
圖 118 SMPS 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/06/05, 石原產業	147
圖 119 FMPS 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/08/07, 石原產業	149
圖 120 CPC 3007 所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/08/07, 石原產業	150
圖 121 FMPS 量測被逸散二氧化鈦微粒的粒徑分布	151
圖 122 SMPS 量測被逸散二氧化鈦微粒的粒徑分布	152
圖 123 掃瞄式電子顯微鏡照片圖, 97/04/28, 石原產業	153
圖 124 廠外的微粒粒徑分布, 97/04/28, 石原產業	154
圖 125 廠外的微粒粒徑分布, 97/08/07, 石原產業	154
圖 126 FMPS 所量測的微粒粒徑分布 I, 97/04/28, 石原產業	156
圖 127 FMPS 所量測的微粒粒徑分布 II, 97/04/28, 石原產業	157
圖 128 SMPS 所量測的微粒粒徑分佈 I, 97/06/05, 石原產業	158
圖 129 SMPS 所量測的微粒粒徑分佈 II, 97/06/05, 石原產業	159
圖 130 FMPS 所量測的微粒粒徑分佈 I, 97/08/07, 石原產業	160
圖 131 FMPS 所量測的微粒粒徑分佈 II, 97/08/07, 石原產業	161

圖132 Aerosol Trak所量測的胸腔區微粒總表面積濃度, 97/04/28, 石原產業	162
圖133 Aerosol Trak所量測的可呼吸性微粒的總表面積濃度, 97/08/07, 石原產業	163
圖 134 Dust Trak 於量測點 3 進行全程量測, 97/04/28, 石原產業	164
圖 135 量測點 3 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/04/28, 石原產業	165
圖 136 Dust Trak 各點的測量濃度與包裝作業時間, 97/06/05, 石原產業	166
圖 137 量測點 2 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/06/05, 石原產業	166
圖 138 Dust Trak 各點的測量時間與包裝作業時間, 97/08/07, 石原產業	167
圖 139 量測點 6 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/08/07, 石原產業	168
圖 140 金屬成分分析, 97/04/28, 石原產業	176
圖141 可呼吸微粒中的金屬成分分析, 97/06/05, 石原產業	178
圖 142 可呼吸性微粒的金屬成分分析, 97/08/07, 石原產業	180
圖 143 MOUDI 所採集的金屬濃度, 97/04/28, 石原產業	182
圖 144 MOUDI 所採集的金屬濃度, 97/08/07, 石原產業	183
圖 145 FMPS 在軌道燒成窯旁的量測位置與微粒數目濃度分布圖, 97/10/22, 東陶	184
圖 146 軌道燒成窯旁各量測位置的金屬成分分析, 97/10/22, 東陶	186
圖 147 FMPS 量測奈米碳管分裝時微粒的粒徑分布, 97/09/16, 新奈材料	188
圖 148 Nilfisk GM80 吸塵器馬達在不同流量設定時排放之微粒濃度分布圖	189
圖 149 為 TOSHIBA TVC-10.0 之馬達微粒排放量	190
圖 150 國內外 HEPA filter 流量對壓差之關係	192
圖 151 Nilfisk, Type HEPA-13 在四種不同流速下對奈米微粒的過濾效率	193
圖 152 亞拓電器公司, V03063P 在四種不同流速下對奈米微粒的過濾效率	194
圖 153 奈米微粒之一般風險管理方法	199
圖 154 暴露控制的優先順序	200
圖155 COSHH essentials的控制方法與風險分級、污染物特性及使用量之關係	225

## 摘要

本研究收集英國、日本及美國的奈米物質作業環境控制指引，並加以詳細閱讀、重點整理及比較其優劣點，並據以撰寫出本國奈米物質作業控制策略指引草案，供專家學者討論。此草案共分成九節，含奈米物質之範圍，人造奈米物質之種類及特性，風險評估，暴露評估方法，暴露控制方法，意外溢出及釋放、奈米廢棄物處置方法，火災及爆炸預防，健康檢查。

本研究使用微小粉末分散器(SSPD, TSI Inc.)進行粉體分散試驗，並將部分結果與旋轉腔體試驗機法和漩渦震盪法得到的粉體逸散結果進行比較，採用的測試粉體有二氧化鈦、氧化鋅和二氧化矽，此三種材料每種材料皆使用初始粒徑為奈米級和次微米級之粉體來進行實驗。由實驗結果可以發現微小粉末分散器所產生的單位粉體重量之微粒濃度遠高於旋轉腔體試驗機法和漩渦震盪法。比較相同粉體材料的分散狀況，可以發現次微米級粉末的分散狀況比奈米級粉末好。各種粉體材料分散的狀況以二氧化鈦的分散程度最好，氧化鋅次之，二氧化矽最差。

比較國內與國外工業級吸塵器之 HEPA filter 對奈米微粒之過濾效率發現國外的 HEPA filter 的過濾效率極佳，不論顆粒大小與過濾流量其過濾效率皆在 99% 以上。然而，國內生產之 HEPA filter 對奈米微粒的過濾效率不盡理想，僅在 20% ~ 60% 之間，有研究改善之必要。

在作業場所奈米微粒暴露濃度量測方面，本研究在二氧化鈦粉體廠、奈米碳管製造廠及衛浴設備製造廠進行微粒濃度量測，利用採樣器和即時量測儀器來量測可呼吸性微粒及奈米微粒的暴露現況，以及其受作業現況及通風影響情形。結果發現上述三個作業場所的奈米微粒濃度均不高。其中，二氧化鈦粉體廠現場之微粒濃度會受到通風扇的影響，且奈米微粒的來源非粉體本身，而是來自包裝作業之堆高機。

關鍵詞：奈米微粒、控制技術、工作場所採樣、過濾。

## Abstract

This study has collected the control guidelines for nanomaterials in the workplace from United Kingdom, Japan and USA. The guidelines were carefully read, analyzed and compared for preparing the domestic “Nanomaterial control strategy in the workplaces (draft)” for the experts and scholars to discuss. The draft contains nine chapters, including the scope of nanomaterials, types and characteristics of engineered nanomaterials, risk assessment, methods of exposure assessment, exposure control, accidental spillage and release, disposal of nanomaterial waste, fire and exposure hazards, health surveillance.

The small scale powder disperser (SSPD) was employed in this study for the powder dispersion experiment and results were compared with those of the rotating drum and the vortex shaker. Titanium dioxide, zinc oxide and silica were used as the test materials and the primary particle diameter was found to be either nano-size or submicrom-size for each material. The experimental results shows that the particle concentration generated from the SSPD was higher than the rotating drum and the vortex shaker, and the SSPD had the smaller NMD value than other two instruments. Therefore, the SSPD have the highest powder dispersion efficiency. Furthermore, it was found that the aggregation of nano-size powder was more serious than submicrom-size powder. Titanium dioxide had the best powder dispersion, zinc was the second one and silica was the worst one.

By Comparing the filtration efficiency of the domestic HEPA filter with the foreign HEPA filter used in the industrial vacuum cleaner shows that the filtration efficiency of the foreign HEPA filter was high enough. Regardless of the particle size and the filtration flow rate, the collection efficiency was as high as 99%. However, the collection efficiency of the domestic HEPA filter was found to be from 20% to 60%.

In the field for the particle concentration measurement, this study has proceeded the air sampling in the workplaces such as titanium dioxide manufacturing factory, carbon nanotubes manufacturing factory and toliet manufacturing factory. We used different aerosol samplers and real-time instruments to measure the respirable aerosol and nanoparticle concentrations at different ventilation situations. It is found that the nanaoparticle concentration was not high in the three workplaces. In the titanium dioxide manufacturing factory, the particle concentration has been affected by the ventlation fan. In addition, the source of nanoparticle was found not coming from the powder, which was coming from the forklift during the bagging operation.

Key Words: Nanoparticles, Control technology, Workplace sampling, Filtration.

# 第一章 前言

奈米技術在各個產業的應用越來越重要，商業化奈米產品愈來愈多，至2007年10月2日的為止統計，奈米相關的消費性產品已高達580項，產品涵蓋食品及飲料，家庭及園藝，健康、衣物及美容，汽車，電子及電腦，用具，小孩用品及其他[1]。當奈米產品與我們的生活關係愈來愈密切的同時，奈米物質對於人體健康的的可能影響也受到世人的重視，如何降低奈米物質在工作場所和環境中所造成的污染及可能的危害是許多政府及研究單位的重點工作。

作業人員在奈米材料生產、包裝、搬運、清潔、維護及保養等過程中最易暴露於奈米微粒，此外在奈米材料的最終處置階段或再循環期間也是奈米微粒可能的潛在來源。影響奈米微粒暴露的因素包含材料的總量及材料的特性，逸散性大的粉體材料或會產生懸浮的噴霧或液滴較易於造成暴露。奈米微粒於空氣中運動行為和氣體污染物及細微粒類似，因此密閉微粒產生源及使用局部排氣通風系統的控制系統方法能有效地捕獲及控制懸浮的奈米材料。一般常見的奈米材料逸散控制方法經過調查有氣罩、手套箱、空調系統(HVAC)、潔淨室(Cleanroom)、密閉製程、密閉管道系統、有害材料自動化系統層流工作台、生物安全設施、正/負壓艙及手套袋等[2]。

## 第一節 國內外安全奈米技術的研究

2001年美國開始推動“國家奈米科技計劃(NNI)”，大幅增加奈米科技研發經費，當時即認同EHS的重要性(Environment, Health and Safety)。2004年起NSET(Nanoscale Science, Engineering and Technology subcommittee)下設NEHI工作小組(Nanotechnology Environment and Health Implications Working Group)來整合各部門有奈米科技危害的相關研究，並支持新奈米產品製造和使用安全的相關研究。NNI補助奈米材料對EHS衝擊的三方面的研究，包括：1.透過基礎研究進一步了解奈米材料對環境及人體的影響。2.發展儀器和方法來量測、定性、測試奈米材料和監測暴露量。3.研究評估化學物、食物、藥物和醫學儀器安全性的研究[3]。



在審查NNI的計畫時，美國國家奈米技術顧問團NNAP (National Nanotechnology Advisory Panel)的成員相信最有可能暴露於奈米材料是在製造奈米材料的時候，所以他們支持優先進行工作場所奈米材料製造暴露危害的研究，希望NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)建立生產及搬運奈米材料的安全工作規範以確保工人的安全，NIOSH也終於在2006年提出了安全奈米技術白皮書[4]，且NIOSH至今已有很多的研究進展[5]。

2004年NIOSH下設奈米技術研究中心(NTRC, Nanotechnology Research Center)，主要目的在於整合NIOSH內部在安全奈米技術之研究，並達到以下四點目標[5]：

- (1) 決定是否奈米微粒及材料對工人造成傷害及疾病。
- (2) 研究應用奈米技術以預防工作相關之傷害及疾病。
- (3) 以法令、建議或技術改善安全之工作環境。
- (4) 經由國內及國際奈米技術研究及指引的合作，改善全球工作場所安全及衛生環境。

針對以上之目標，在2004~2006年間NTRC主要進展為[5]：

(1)NTRC研究老鼠在低劑量下對於奈米碳管會有肺部反應(如纖維化)；完成奈米微粒產生系統用於從事動物暴露實驗；並利用暴露-劑量反應數據，透過定量風險評估方法做出奈米TiO<sub>2</sub>的建議暴露限值[6]，此模式也將用於其他奈米物質；進行奈米材料之皮膚穿透實驗，奈米材料沈積於肺部後進入血液及全身組織之可能性。

(2) NTRC找出應用奈米技術於勞工安全衛生之奈米技術，含有效之濾材、感測器以及防護衣，此工作仍持續進行之中。

(3) NTRC發行安全奈米技術的方法，建議在奈米材料對人體健康危害仍有不確定時要採取預防措施降低工人之暴露；可以使用減少氣膠微粒暴露的相同工程技術控制大部分奈米製程及工作型態之奈米微粒暴露；執行風險管理計畫可降低工人的奈米微粒暴露；使用有效之排氣通風系統加上高效率濾材可去除奈米微

粒；良好的工作法則(good work practice)、工人訓練及適當使用個人防護裝備，可以降低奈米微粒之暴露；由於 2.5 nm 以上的奈米微粒可有效的被濾除且符合單一纖維過濾效率理論，使用 NIOSH 驗證過的呼吸防護具並作密合度測試，可以提供良好的奈米微粒之呼吸防護[4]。

(4) NTRC 與國內及全球合作以增進奈米技術工人安全衛生之了解；參與美國 NNI 之下的 NEHI 工作小組完成國家奈米技術策略規劃；與 OECD 與 WHO 合作，並積極參與 ISO TC229 奈米技術委員會下的安全衛生與環保工作小組。

在 NIOSH 的報告中，NTRC 指出了 10 個重要的研究範圍，以指引出將來的研究方向，發展奈米微粒控制策略，並作適當的建議[5]。10 項重要研究範圍如下：

### 1.毒性和內部劑量

- (1)研究和決定物理及化學特性(如大小、形狀、溶解度)對於奈米毒性的潛在影響。
- (2)決定奈米材料進入人體後的情形。
- (3)評估奈米材料在器官和組織(如肺、大腦、心血管)短期和長期的影響。
- (4)決定生物機制的潛在毒性影響。
- (5)創造和整合模式來幫助危害的評估。
- (6)決定是否有比質量更適合決定毒性的方法。

### 2.風險評估

- (1)決定如何利用細微粒和極細微粒的暴露-反應數據以辨識和評估職業危害和風險。
- (2)發展評估潛在風險的架構和預測奈米微粒暴露職業風險。

### 3.流行病學和檢查

- (1)評估目前使用奈米材料工作環境的流行病學研究文獻。
- (2)找出可藉由流行病學研究填補的知識缺口，以增進奈米材料的了解，並

評估是否有新的流行病學研究需要。

(3)整合奈米科技安全和衛生於現有的危害檢查方法，並決定是否有需要額外的篩選方法。

(4)使用目前的系統以分享有關奈米科技的數據和資訊。

#### 4.工程控制和個人防護具

(1)評估減少奈米微粒職業暴露工程方法的有效性，必要時發展新的工程控制方法。

(2)評估分組管理技術的適用性及評估代替材料的有效性。

(2)評估和改善目前的個人防護具。

(3)發展建議方案以防止或限制奈米材料的職業暴露。

#### 5.量測方法

(1)評估空氣中可呼吸性微粒質量的量測方法並決定此方法是否適用於量測奈米材料。

(2)發展和現場測試實用的方法以正確量測工作場所的氣懸奈米材料。

(3)發展、測試和評估系統方法，以比較和驗證採樣儀器。

#### 6.暴露評估

(1)決定工作場所中影響奈米材料的產生、散佈、累積、再揚塵的主要因素。

(2)決定不同工作場所奈米材料暴露差異的原因。

(3)評估當奈米材料被吸入或沈積在皮膚上的可能暴露。

#### 7.火災和爆炸安全

(1)找出造成奈米材料揚塵性、燃燒性、可燃性、導電性的物理及化學特性。

(2)建議替代工作準則以去除或減少工作場所的奈米材料暴露。

#### 8.建議和指引

(1)在奈米材料的產生、使用和處理中，使用最佳可行科學方法建議工作場所安全及衛生工作準則。

(2)評估和更新以氣膠微粒質量為基礎的職業暴露極限，以確保良好連貫性的預防性準則。

## 9.溝通和教育

(1)建立夥伴關係以找出和分享研究需求、方法及結果。

(2)針對工人、員工和職業安全衛生人員發展和宣導訓練和教育資訊。

## 10.應用

(1)找出可應用於職業安全衛生的奈米科技。

(2)針對工人、員工和職業安全衛生人員評估和宣導有效的奈米科技應用。

美國NIOSH為世界上在工作場所奈米科技最有投入最多研究資源的國家，研究進展也最多。美國NIOSH針對二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )微粒的毒性作了深入文獻探討，並利用定量風險評估方法，建議了工作場所 $\text{TiO}_2$ 微粒的暴露建議值(recommended exposure limit, REL)[6]。美國NIOSH對 $\text{TiO}_2$ 細微粒(fine particle, 指可呼吸性微粒)及超細微粒(ultrafine particle,  $<0.1\mu\text{m}$ ，即奈米微粒)提出的REL以時量平均濃度值(time-weighted average concentration, TWA)表示，對細微粒而言為 $1.5\text{ mg/m}^3$ ，對超細微粒而言 $0.1\text{ mg/m}^3$ ，在此限值下，NIOSH計算出勞工終生的致癌機率將低於千分之一。此為目前僅有、最嚴謹的奈米微粒相關建議暴露限值。美國NIOSH也加緊針對其他的奈米物質如單壁奈米碳管(SWCMT, single-walled carbon nanotube),多壁奈米碳管(MWCMT, Multi-walled carbon nanotube), 碳黑(carbon black), 矽基奈米線(silicon-based nanowires), 奈米金屬氧化物(nano-metal oxides)，研究其肺部毒性、全身影響及劑量-反應關係，希望有助於奈米物質的暴露評估計畫，了解工作的健康風險並提出一個有效的控制措施，以保障工人的健康[7]。

其他國家的研究進展發表於第三屆國際奈米科技與職業及環境衛生研討會中(The third International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, 2007)。在日本有一個大的NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)計畫- “Evaluating Risks Associated with

Manufactured Nanomaterials,” 主要的研究為TiO<sub>2</sub>, fullerenes, CNTs的毒性、暴露評估及風險管理。美國的PEN計畫(Project on Emerging Nanotechnologies), 主要為奈米科技ESH研究需求規畫, 奈米產品的統計, 奈米科技風險管理、法規檢討及整理、國會作證、各種奈米ESH問題研討及國際合作等。美國的ICON(International Council on Nanotechnology)收集整理全球的奈米科技EHS資訊及論文, 並建立資料庫, 調查目前奈米微粒使用時的工作方法以建立最佳的安全工作法則, 及舉辦奈米科技EHS研究需求的國際研討會。

本國的IOSH從2006到2008開始工作中奈米微粒的曝露及危害評估計劃, 主要的結果為驗證過的可拋棄口罩及防護衣的奈米微粒去除效率隨著粒徑減少而增加, 與國外的研究結果相同, 局部排氣系統對奈米微粒的移除效果與SF<sub>6</sub>追蹤氣體效果類似, 奈米氧化鋁點火燃燒的能量比微米的氧化鋁為低; 調查目前奈米材料的廠商生產作業之從業人員曝露於奈米微粒的現況, 利用現場評估、物化特性及細胞毒性將奈米微粒依危害程度分級分成三級, 以制訂適當的控制措施, 來保護相關工作人員之健康及安全; 利用RFID系統辨識工人的作業位置及時間並配合及時監測儀器與以決定工人的奈米微粒曝露量。

經勞工安全衛生研究所調查目前奈米材料自行生產、代理銷售、分裝銷售及添加應用等廠商數目(表 1), 其中超過八成為生產及應用廠商, 生產作業之從業人員很有可能直接或間接曝露於奈米微粒散佈的環境中[8]。

表 1 奈米廠商生產型態調查結果整理表 [8]

產品來源	自行生產	代理銷售	分裝銷售	添加應用	
家數	60	18	6	58	未回答 22 家
百分比	47.2%	14.2%	4.7%	45.7%	
產品型態	粉體	溶液	膠體	其他	備註
家數	45	39	4	50	未回答 26 家
百分比	36.6%	31.7%	3.3%	40.7%	

勞工安全衛生研究所訪談國內 11 家奈米技術相關產業, 主要訪談項目為產品類型、用途、製程種類、防護錯失及操作人數等。受訪機構可分類為奈米材料生產(如: 氧化鋅粉末、金屬奈米溶液及奈米觸媒)與奈米材料添加應用(如:

日光燈管、奈米塗料、衛浴設備、顯示器等)。經過訪查統計，廠商提供雇員的主要防護措施有抽風循環系統、排氣櫃、氣密式防護衣、實驗衣、手套、口罩及護目鏡；其中僅有 27%的廠商設置有抽風循環系統或排氣櫃，而一間廠商使用氣密式防護衣，另外僅有五間廠商要求員工使用口罩[9]。因此政府應速對奈米產業訂定工作場所安全作業指引，提供奈米微粒最佳的控制技術，以免奈米相關產業之從業人員暴露於奈米微粒的危險之中。

## 第二節 奈米微粒作業環境控制策略及指引

在國際上先進國家如美國、日本、英國及各國的研究單位在奈米微粒作業環境控制作過許多研究，許多標準組織也發表了奈米微粒作業環境控制的策略及指引，如 [4, 10-12]等。國際標準組織下設的 ISO/TC 229 的委員會則於最近發奈米科技標準的需求，其中與奈米微粒控制有關、在 1~3 年內應完成的標準為 Standard Guide for Controlling Occupational Exposures to Nanomaterials, Standard Template for Material Safety Data Sheet (MSDS) for Products Containing Nanomaterials, Standard Method for Selection of Personal Protective Equipment (PPE) for Use With Nanomaterials, Standard Method for Determining Physical Hazards of Nanomaterials, Standard Method to Establish Occupational Exposure Limits for Nanomaterials, Standard Methods to Assess Exposure to Nanomaterials During Consumer Product Use, Standard Methods for Determining Nanoparticle Concentrations in Air and Water 等[13]。在本計畫中這些研究成果及相關文獻將用於建立本國的奈米作業環境控制策略及指引。

另外，奈米物質之產品至 2007 年 10 月止的統計已達 580 項，若欲針對每種奈米微粒訂出 OELs(occupational exposure limits)再加以規範，也是一件十分不容易的事，因此利用定性的控制分組(control banding)方法對一般化學物質及奈米微粒進行控制，不失為一個可行的方向，奈米微粒的控制分組方法也是美國 NIOSH 目前正在研究之方向[14]。類似控制分組(control banding)方法，前節所述本國勞工安全衛生研究所曾參考 Luther 之奈米微粒風險評估流程[15]，以現場評估、物化特性及細胞毒性將奈米微粒依危害程度分級分成三級，以制訂適當的控



制措施，來保護相關工作人員之健康及安全。第一級為使用量少、不易接觸到人體的奈米製程，其危害性最小；第二級為毒性較低、不會快速溶解、毒性及管理程度類似石綿的奈米物質；第三級為不可溶解，毒性不會太低的奈米物質[9]。三級奈米微粒建議的控制及防護方法如表 2。

表 2 奈米微粒的分級控制及防護方法[9]

	一級管理	二級管理
<b>一、技術控制</b>		
1. 作業型態改變	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 評估是否以濕式作業取代乾式作業</li> <li>● 或局部密閉系統下生產</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 評估是否以濕式作業取代乾式作業</li> <li>● 或密閉系統下生產</li> </ul>
<b>二、工程控制</b>		
1. 製程條件改善	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不需</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 評估是否需要進行再適化設計 (對既有之反應動力學、混合特性與其他參數)</li> </ul>
2. 通風系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不需</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 要設置抽氣櫃或考慮局部負壓</li> <li>● 評估是否要裝設局部排氣裝置 (ex: 氣罩、風管、空氣清淨裝置)</li> </ul>
<b>三、防護具控制</b>		
1. 呼吸防護	<ul style="list-style-type: none"> <li>● N95 口罩</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 防塵防護具</li> </ul>
2. 其他防護	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 乳膠手套</li> <li>● 穿著工作服</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 化學防護手套</li> <li>● 簡易型防護衣 (ex: 附袖圍裙)</li> </ul>

### 第三節 研究目的

1. 收集整理奈米微粒作業環境控制技術相關文獻與各國相關建議策略：在國際上先進國家如美國、日本、英國及各國的研究單位在奈米微粒作業環境控制作過許多研究，許多標準組織也發表了奈米微粒作業環境控制的策略及指引，在本計畫中這些研究成果及相關文獻將用於建立本國的奈米作業環境控制策略及指引。
2. 整體評估奈米微粒之控制技術，包括通風與隔離等控制方式之性能，生產過程逸散與沉積再揚起之可能性：在國外及本國對於奈米微粒的工程控制技術、個人防護及行政管理均有一些研究進展及相關法則，在奈米粉體揚塵的測試方面也有一些文獻發表，本計畫將評估文獻上的奈米微粒控制技術並做具體的建議，另外透過本計畫不同的奈米粉體揚塵的測試實驗，逐

漸建立與奈米粉體安全息息相關的本國標準揚塵測試方法。

3. 測量作業環境空氣中奈米微粒之暴露濃度，及其受作業方式及控制設備之影響：本計劃擬在二氧化鈦製程及其他作業場所測量奈米微粒的暴露現況，了解污染來源及評估通風、局部排氣、圍封、隔離等奈米微粒控制技術的性能。使用的儀器為手提式 CPC(condensation particle counter)及奈米微粒表面積偵測儀，以迅速掌握奈米微粒的污染來源及分佈狀況，進一步的粒徑分佈及質量分佈則分別以 FMPS(fast scanning mobility particle sizer)、SMPS(scanning mobility particle sizer)及 MOUDI(multi-orifice uniform deposit impactor)進行固定點的監測及採樣，並以 ICP/OES(induced coupled plasma/optical emission spectrometry)或 ICP/MS(induced coupled plasma/mass spectrometry)進行奈米微粒樣本的化學成分分析，以確定作業環境的奈米微粒的貢獻比例。

4. 設計適當實驗，以評估奈米微粒控制技術之性能：

本計劃擬以實驗探討工業級高效率真空 HEPA(high efficiency particulate air filter)吸塵器對奈米粉體的過濾效果，比較其與一般真空吸塵器的差異，比較國內外不同廠牌的真空 HEPA 吸塵器的差別，並進行奈米粉體負荷對過濾效率的影響，期能改善本國的高效率工業真空吸塵器。

5. 研擬奈米微粒作業控制策略指引草案。

根據本研究的成果提出適用於本國的奈米微粒作業控制策略指引草案。

## 第二章 文獻回顧

### 第一節 作業環境奈米微粒控制策略與控制技術評估

#### 壹 奈米微粒控制策略

爲了避免作業人員過量的奈米微粒暴露而影響身體的健康，除了持續進行製程改善與作業環境管理之外，工程控制、過濾技術、個人防護設備等都是減少製程中奈米微粒的暴露風險的控制方法。這些控制策略包括：在密閉系統下生產製造、製程局部於密閉環境下生產、局部負壓、製程通風系統、限制製程的工作人員數目、管制其他人進入製程區域、減少作業人員可能暴露時間、定期清潔工作環境及機台表面、使用適合的個人防護裝備、污染區內禁止飲食等。就暴露型態觀點而言，吸入性暴露是奈米微粒或材料最可能發生暴露潛在風險[16]。因此，應將生產產品具有的潛在危害性，告知相關製程從業人員，並提供相關的個人防護具及防護設備等，評估和改善個人防護具及防護設備的效率，開發適用於奈米製程的口罩，研究奈米材料穿透手套可能性以及個人防護具配戴後的處理方式等都是策略之一。另外定期舉行教育訓練和演練相關的緊急應變措施，以減少奈米相關製程中可能的奈米微粒逸散及危機應變等也是策略之一[2]。

如第一章所述，美國、日本、英國已發表了奈米微粒作業環境控制的策略及指引，如[4, 10-12]等，國際標準組織下設的 ISO/TC 229 的委員會也於最近發奈米科技標準的需求，美國 NIOSH 也正在研究控制分組使用於奈米微粒控制的可行性[14]，這些內容均將在第五章說明。

#### 貳 奈米微粒的工程控制方法

當執行奈米材料相關作業時，奈米微粒很有可能在操作時釋放出造成大量的暴露。一般常見的奈米微粒逸散控制方法經過調查有氣罩、手套箱、空調系統（HVAC）、潔淨室（Cleanroom）、密閉製程、密閉管道系統、有害材料自動化系統層流工作台、生物安全設施、正/負壓艙及手套袋等[2]。當奈米材料製程進行時，奈米微粒暴露的重要性取決於處理過程中微粒被釋放出的可能性。一些會影響奈米材料暴露的因素包含材料的使用量以及材料是否容易逸散或產生懸浮噴霧或液滴。操作員必須藉由距離、物體的分隔、控制室、隔絕的小房間及能

截留微粒的通風系統來隔絕有害操作、製程、設備及環境。被控制於密閉系統或容器的奈米材料將引起較小的暴露風險。奈米材料的合成、產品製造、加工、傳輸及處理等動作皆被設計於密閉設備中執行。

經勞工安全衛生研究所調查目前奈米材料自行生產、代理銷售、分裝銷售及添加應用等廠商數目（表 3），其中超過八成為生產及應用廠商，生產作業之從業人員很有可能直接或間接暴露於奈米微粒散佈的環境中[8]。

表 3 奈米廠商生產型態調查結果整理表 [8]

產品來源	自行生產	代理銷售	分裝銷售	添加應用	
家數	60	18	6	58	未回答 22 家
百分比	47.2%	14.2%	4.7%	45.7%	
產品型態	粉體	溶液	膠體	其他	備註
家數	45	39	4	50	未回答 26 家
百分比	36.6%	31.7%	3.3%	40.7%	

在勞工安全衛生研究所報告中訪談國內 11 家奈米技術相關產業，而主要訪談項目為產品類型、用途、製程種類、防護錯失及操作人數等。受訪機構可分類為奈米材料生產（如：氧化鋅粉末、金屬奈米溶液及奈米觸媒）與奈米材料添加應用（如：日光燈管、奈米塗料、衛浴設備、顯示器等）。經過訪查統計，廠商提供雇員的主要防護措施有抽風循環系統、排氣櫃、氣密式防護衣、實驗衣、手套、口罩及護目鏡；其中僅有 27% 的廠商設置有抽風循環系統或排氣櫃，而一間廠商使用氣密式防護衣，另外僅有五間廠商要求員工使用口罩[9]。因此政府應速對奈米產業訂定工作場所安全作業指引，提供奈米微粒最佳的控制技術，以免奈米相關產業之從業人員暴露於奈米微粒的危險之中。

International Council on Nanotechnology 針對全球 64 間（包括北美 25 間、歐洲 11 間、亞洲 25 間及其他地區 3 間）奈米相關機構之安全防護措施進行調查，其中機構型態包含公司企業、研究中心及大學實驗室。各機構使用之奈米控制技術包含潔淨室、氣罩、手套箱（袋）、層流工作台、密閉管線系統、正（負）壓系統及獨立空調系統（HVAC）等[2]。

## (1) 局部排氣技術

工作場所奈米微粒的控制技術包括圍封、局部通風、及管末控制等。局部排氣裝置是作業場所中主要的危害控制設備之一，其操作方式是將空氣中有害物於發生源處以氣罩抽氣方式將有害物連同空氣抽出，再經導管連接將所抽取的污染物質由共同的出口排出作業場所，抽氣時所需的氣流則由排氣機帶動。大部分的局部排氣裝置設有空氣清淨裝置，一方面保持廢氣之清潔，避免污染外界大氣，另一方面則防止排氣機受污染空氣損害。一般而言，局部排氣裝置包括氣罩、導管、空氣清淨裝置和排氣機等元件(如圖 1 所示)。

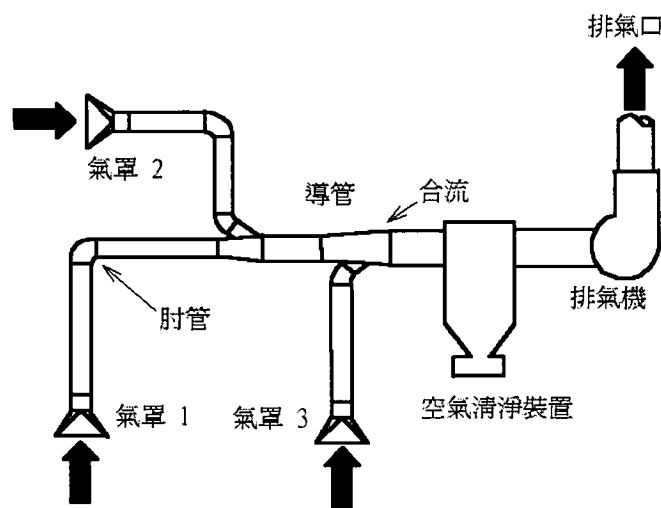


圖 1 典型局部排氣裝置[17]

氣罩為局部排氣系統之入口，其功能在減少污染物從發生源逸散並以有效方法來捕集污染物，污染物經由導管輸送至空氣清淨裝置進行處理後再排出作業場所。各導管風速不得過低，以免有害物沈積於導管內。風速下限依氣罩所捕集之有害物特性而異，氣體最低，重且溼黏粒狀物最高，此風速下限即為搬運風速。局部排氣裝置在設計上最為困難的問題之一在於壓力平衡。也就是當兩導管匯流於一導管時，兩導管中的風量會依一定的比例分配，使匯流點處的壓力無論沿任何一匯入導管計算均相同。若局部排氣裝置未經妥善的設計，會使部分的氣罩風量不足，進而使控制風速無法達到法規的要求；也有可能使部分氣罩的風量過高，造成能源的浪費，或者是物料的散失。局部排氣（氣罩）可說是最基本的控制技術；三分之二接受[2]訪問機構皆使用氣罩來控制奈米材料，不過氣罩在歐美的使用率為 80% 大於亞洲的 50%，可見亞洲國家對於工作場所奈米暴露防護的觀

念遠落後於歐美。而在許多先進國家對氣罩的使用仍有許多漏洞：調查中僅有 26 間使用氣罩的機構有加裝排氣過濾系統，其中 16 間機構不確定過濾系統使用的類型；粉體生產工廠不願使用氣罩控制，因為氣罩可能使乾燥奈米粉體損失。

學者研究顯示，局部排器裝置的捕集效率受到氣罩型式、設置位置、抽氣風量、有害物特性、發生源大小、有害物釋放速度和外部氣流等因素影響[18-20]。對於奈米微粒而言，在沒有熱力場、靜電場和磁力等力場作用下，奈米微粒在空氣中的運動特性與氣體或蒸氣分子類似[21,22]。由實驗室初步結果可知，利用上抽式懸吊氣罩之局部排氣系統對於奈米微粒的捕集效率不受粒徑大小影響，此外奈米微粒與 SF<sub>6</sub> 的氣動行為類似[23]。有研究指出，即便在理論上或是少數實驗數據顯示，傳統通風和過濾等控制技術可以使用在微粒控制程序，然而這些氣膠控制方法並不能完全應用於奈米微粒控制[24]。在實際的作業場所中，部分與奈米微粒生產相關製程必須在高溫進行中，因此微粒熱泳與帶電現象可能無法被忽略。此外，不同的通風型態亦會影響奈米微粒的控制效能[25]。

實驗室的排煙櫃 (fume hood) 是保護實驗室人員避免暴露於危害物質最重要的設備之一。一個正確設計與操作下的排煙櫃應該把作業人員與操作櫃內釋放的任何氣體或氣膠隔離，並且降低人員的暴露量接近於零。一個未被正確設計和/或操作的排煙櫃，可能把作業人員暴露在那些材料的危害階段。實際上，對於奈米微粒物質來說，奈米微粒是不可見的而且沒有警告特性。因此，作業人員可能有一錯誤安全感，以為排煙櫃可以提供的良好保護，事實卻不然。與奈米微粒相關的研究正急遽地增加，意味著作業人員暴露的風險也以相同的比率增加。許多組織已經發表奈米微粒最佳控制策略與建議安全奈米微粒作業方式[26,27]。

對於處理乾燥的奈米粉體時，一個合適的通風系統可以顯著降低奈米物質的吸入暴露，其中排煙櫃是在大多數實驗室最常使用的通風系統。理想上，當奈米粉體在排煙櫃裡操作時，空氣中的奈米微粒將迅速被捕集和移除。奈米尺度的高比表面積將造成微粒及時和排煙櫃中空氣的阻力反應[22]。由於，在空氣中的奈米微粒會與周遭的氣流一起運動，因此，如果氣流從操作櫃中逸散時，奈米微粒也會



逸散出操作櫃。有一些標準方法已經被發展用來評估氣罩的效能以及污染物的逸散潛能[28-31]。然而，這些方法通常在無作業人員的情形下，而且通常使用一種追蹤氣體。因此，這些方法對於排煙櫃應用在實際奈米微粒的處置具有不確定性。一般而言，影響排煙櫃效能的主要因素有拉窗位置、面速度、氣流型態等。有一些研究學者指出，當氣流接近正向於操作櫃的作業人員時，逆轉渦流會發生於作業人員的下游區域，而且此種逆流會把在空氣中的奈米微粒拉回到作業人員的呼吸區域[32-35]。此外，Tseng[36]等人測試一個傳統實驗室的排煙櫃的洩漏情形，結果發現在操作員的近尾流區，排煙櫃側邊的壁和門檻處有大的渦流區，易產生污染物的洩露，因此操作員的近尾流區之量測及一區一區的洩露濃度測量，才能準確的量出排煙櫃的有效性。Pathanjali 和Rahman[37]使用數值模型證明空氣流動進入一排煙櫃後流向背牆，向上流動至表面，並且向前移動再向下，而在一個垂直的旋渦內。陳等人設置吹吸式氣罩的模擬開放液面槽，以氣流可視化技術，配合六氟化硫（SF<sub>6</sub>）追蹤氣體濃度量側探討吹吸式氣罩的性能，將流場模態依控制效果由低而高歸納為散佈、過渡、包覆與強吸四種形式，經整理各種測試結果，發現流場達到強吸模態時，大多可有效抑制局部逸散，且達到接近 100% 的吸氣口捕集效率。此外，亦發現開放槽若設置側板可降低局部逸散[38]。黃及陳[20]發展了一個氣簾式氣櫃(air-curtain-isolated fume hood)，藉由上方氣門的吹氣及下吸氣罩的吹—吸作用(push-pull)產生的氣簾，阻隔氣櫃的污染物的洩露，當吹吸速度控制在弱吸與內凹模態時，污染物往外洩露的機會會減少。在氣門全開時，氣櫃外的操作人員的迴流區較小且被氣簾遮阻，抵抗外部雜風的能力較強。不論是以靜態或動態的濃度作測試，此氣簾式氣櫃均比傳統氣櫃的洩露低很多。

Tsai[39]等人利用研究實驗證明在實驗室通風櫃裡處理含有奈米尺度的乾燥粉末時，會導致奈米微粒從通風櫃顯著地釋放進入實驗室環境和研究者的呼吸區域。有很多參數會影響奈米微粒的排放，包括：通風櫃設計，通風櫃操作(拉窗高度，面速度)，工作方式(例如:倒入和利用勺子轉移，快移動與慢移動)，處理

物質的型態和數量，室內條件(例如: 交錯通風的高度和方向，濕度水平)，以及室內合適的整體換氣。雖然模場試驗指出，當處理奈米微粒時，有很多參數能逆向影響通風櫃性能，但以下幾個通則在多數情況下是正確的： 1. 通風櫃應該在 0.4-0.6 m/s之間的面速度下進行操作。 2. 在這速度範圍內處理奈米微粒時，拉窗高度應該儘可能保持低。 3. 恆定速度的通風櫃比標準通風櫃具有較好的設計。 4. 應該努力降低在通風櫃附近室內氣流的流動。 5. 在通風櫃裡面應該儘可能使用少量的奈米微粒進行操作，和最不活潑的處理方法。

## (2) 中央空調系統

奈米微粒的暴露濃度與作業場所的整體換氣條件有關，中央空調系統為控制奈米微粒作業場所的重要換氣通風系統。中央空調系統在工業和高樓大廈的環境設計尤其顯得重要，因為環境濕度和溫度全部被控制於安全和健康的條件之下 [2](如圖 2 所示)。中央空調系統的組成隨著工業革命而發展，各企業也不斷地引進現代化、高效率及系統控制的新方法。中央空調系統能提供通風，並且保持氣體在空間之間的壓力關係。空氣如何被傳送至各空間及從各空間中移除被稱為空氣分配。而通風是發生於氣體在任一空間交換或置換的過程，並且用以除去水分、氣味、煙、熱、灰塵和懸浮細菌。通風包括建築內外空氣的流通及內部空氣的循環。而最重要的目的在於維持建築內空氣維持在可接受的品質。整體換氣方法可以分成機械/強迫通風及自然通風兩類。

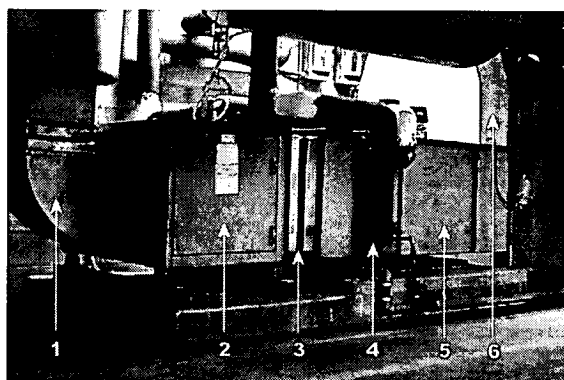


圖 2 空調通風系統

1 - Supply duct, 2 - Fan compartment, 3 - Vibration isolator ('flex joint'), 4 - Heating and/or cooling coil, 5 - Filter compartment, 6 - Mixed (recirculated + outside) air duct

### (3) 手套櫃

手套櫃(glove boxes)可以提供奈米材料在操作時免於外界環境的干擾，可同時符合潔淨度的要求和與有害奈米材料的隔絕。ICON 調查報告中有五成的機構使用手套箱達到奈米微粒暴露防護的目的。此設備包含：密封腔體（維持特定條件環境）、傳遞筒（利用抽真空及補充 N<sub>2</sub> 方式傳遞物品）、真空幫浦（腔體洩壓及傳遞時抽真空及再生時吸附水氣用）、純化再生系統（吸附水與氧）及水份、氧氣、壓力感測器（監控環境）(如圖 3 所示) [2]。主要作動方式是藉由循環風車帶動腔體內氣體流動並以純化系統吸收水份及氧氣，以維持一定的水氧環境，待純化系統飽和後再作純化系統的再生。手套箱的優點為：能夠將奈米材料與操作人員完全區隔開來，達到完全的防護；箱中的環境能夠依照操作需求來控制，例如避免對光或氧氣敏感的材料暴露於周遭環境中。不過手套箱仍有不可預期的洩漏風險，以及因微粒濃度過高或蒸汽壓力過大導致爆炸的危險。

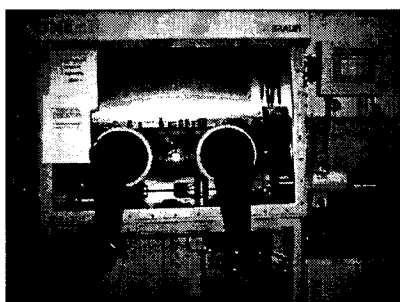


圖 3 手套櫃 [39]

### (4) 潔淨室

潔淨室(cleanrooms)通常被使用於需要低污染（灰塵、懸浮微生物、煙及化學蒸汽）環境之生產製程或科學研究，一些奈米物質製程需使用到潔淨室。潔淨室的控制等級是利用某一特定粒徑之微粒數目濃度來決定。潔淨室的大小可依照生產或研究的需求而設置，可能只包覆某個生產設備亦可能包含數千坪的生產線，廣泛地被使用半導體製程、光電製程、生物技術和其他領域。室外空氣需經過高效率微粒過濾器(HEPA)和及低穿透過濾器(ULPA)循環除去空氣內的污染物。而人員進入潔淨室時，必須穿戴防護衣（例如：帽子、面罩、手套及靴子）。在潔淨室裡的設備運轉時被要求產生極小的空氣污染；甚至有專業化的拖布和水桶。普通材料例如紙、鉛筆和天然纖維製成的織品經常被排除。大部分的潔淨室

被維持於正壓，因此如果有任何洩漏，潔淨室外未經過濾之空氣並不會洩漏進來。為了預防靜電，潔淨室之空調系統需將環境控制於低濕度。

#### (5) 工業級高效率 HEPA 真空吸塵器

傳統上在工作場所清理粉塵污染的表面時使用一般的工業吸塵器，或是在清理製程的反塵腔時使用一般的廠內低真空吸塵系統，隨著奈米科技的發展，在許多的最佳的控制法則中均建議工作場所使用工業級高效率HEPA真空吸塵器[11]，或實驗室的奈米微粒的工作區每天應使用濕式的擦拭方法或清理[41]，以免造成奈米微粒的再逸散污染工作環境。圖4為工業級高效率HEPA真空吸塵器的一個例子。

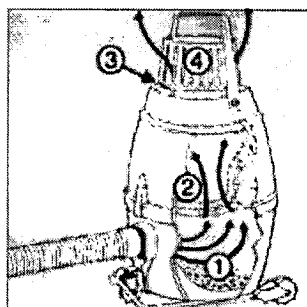


圖 4 工業級高效率 HEPA 真空吸塵器

- 1.集塵紙袋, 2.靜電棉絨過濾器, 4.排氣口 HEPA 過濾器 (Nilfisk GM80 Deluxe HEPA Vaccums)[42]

#### (6) 奈米微粒的尾氣控制技術

對於奈米微粒之工程控制而言，局部排氣及尾氣處理為工廠最常用的方法，若奈米微粒未作有效的尾氣處理，將造成大氣環境的污染，同時也會隨著通風系統再進入工作場所內。有效的尾氣控制常用的為靜電集塵，過濾(常用濾袋屋)及濕式洗滌。

##### A. 靜電集塵器

靜電集塵器分為乾式及濕式靜電集塵器兩種，目前在工業界較為廣用的是乾式靜電集塵器。相較於其他傳統的集塵設備，乾式靜電集塵器的壓損較低(圖5)，所需消耗的電力較少，且操作簡單[43,44]。但是近年來的研究發現，乾式靜電集

塵器之收集板上所堆積的粉塵餅會形成絕緣層，降低電場強度並減少收集效率[45]，因此在使用一段時間過後，需將收集板上的粉塵餅震落。在敲擊粉塵餅的過程中，會增加粉塵再揚起的機率，而產生一些細微粒(PM<sub>2.5</sub>)的二次污染[44]。此外，當高電阻係數的粉塵附著於收集板上時，會產生背電暈的現象，降低集塵效率。Chang and Bai 利用單級平板乾式靜電集塵器研究背電暈對粉塵收集效率的影響，結果發現在固定電壓、利用增加氣膠濕度以減少微粒電阻係數的操作條件下，微粒收集效率隨著使用時間的增加並沒有明顯下降，但在沒有增加氣膠濕度的情況下，微粒收集效率會隨著使用時間增加而減少[46]。

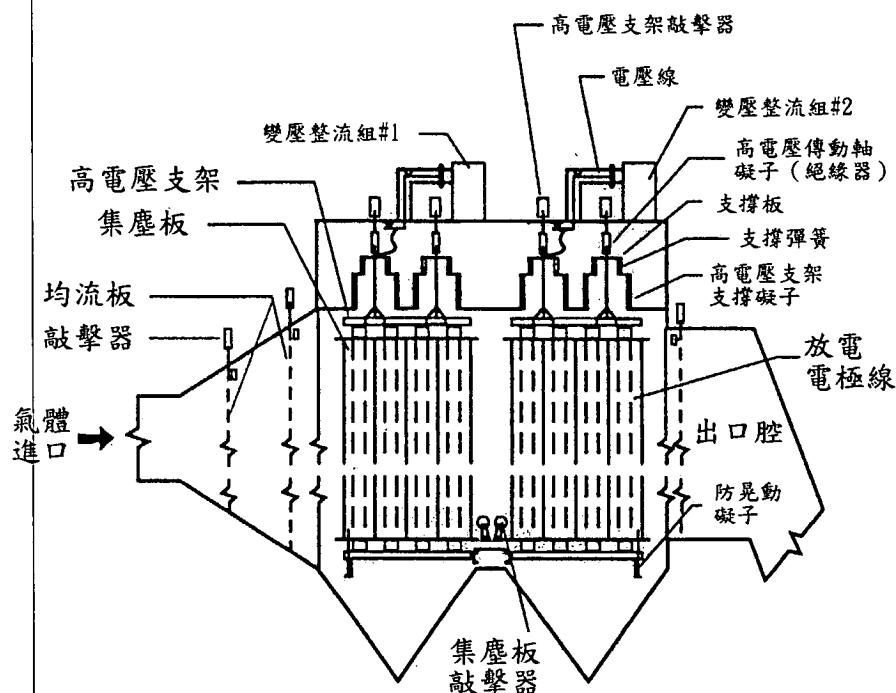


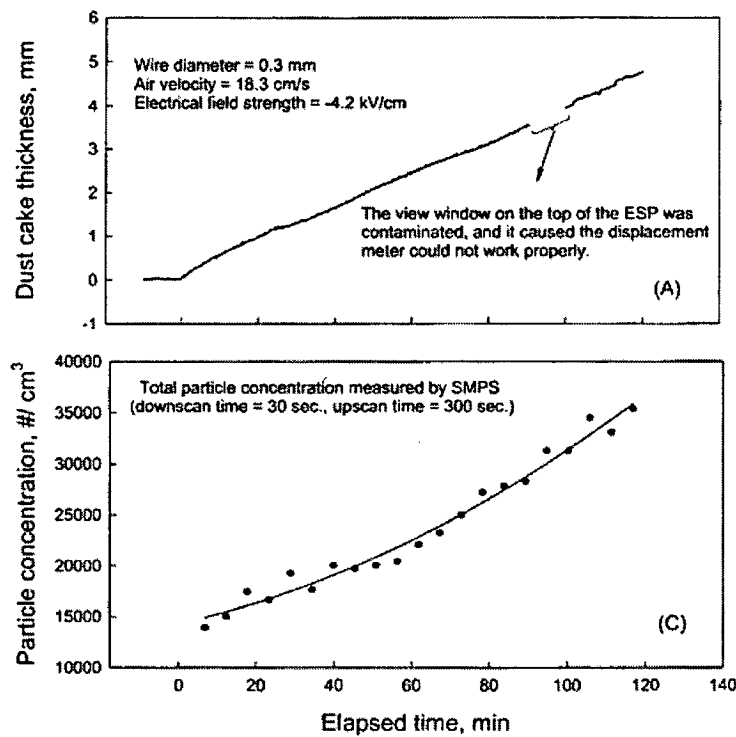
圖 5 靜電集塵器示意圖

羅玉雲研究以靜電集塵器去除紙錢燃燒產生的粒狀污染物，初始運轉時ESP可將入口粒狀物(TSP)濃度由6-392 (平均83) mg/Nm<sup>3</sup>，去除至1-143 (平均22) mg/Nm<sup>3</sup>，初始運轉時的TSP去除效率為80-99%，但經幾次運轉後其效率明顯降低，必須再次清洗集塵板，方可提升效率，但隨著清洗次數之增加，ESP 之使用時間愈短，結論為ESP 不適於金紙焚化排氣除塵[47]。

有關粉塵負荷於收集板時影響收集效率的問題，Huang and Chen 曾對一個 12 cm (寬)×30 cm (長)×7.6 cm (高)的電極線—平板式單極靜電除塵器進行測試研

究，空氣流量為 50~100 lpm，測試的條件為常溫常壓，使用 3 條電極銅線其直徑為 0.3、0.4、0.5 及 0.8 mm (負荷實驗時使用 0.3 mm 直徑)，最大使用之負電壓約為 -40,000 V。實驗結果發現當水泥微粒 CMD 為 1.3  $\mu\text{m}$ 、電極線為 0.3 mm、氣體流速為 18.3 cm/s 及電場強度為 -4.2 KV/cm 時，隨著使用時間及粉塵餅厚度的增加，離子電流會降低，微粒穿透濃度也就越高，如圖 6a 所示。而當靜電集塵器使用 120 分鐘後，對於 300 nm 的微粒收集效率會降低了 4%，如圖 6b 所示 [48]。

(a)



(b)

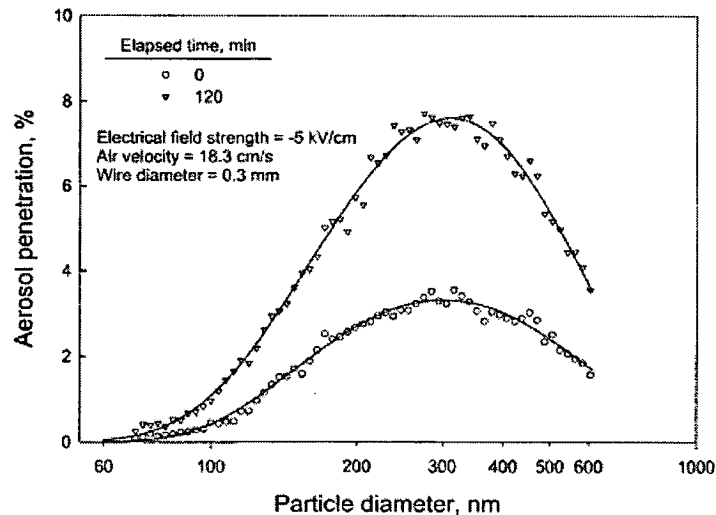


圖 6 粉塵負載量與收集效率的關係[48]

爲了改善乾式靜電集塵器在使用上的缺點，國外已有許多學者設計開發濕式靜電集塵器。濕式靜電集塵器的特點在於利用連續流動的洗滌液沖洗收集板上的粉塵，避免絕緣層的產生，同時也解決了在敲打收集板過程中所產生的粉塵再揚起問題[43]，因此對於次微米微粒的去除效率也較乾式靜電集塵器高。此外，濕式靜電集塵器也有利於去除濕度高、酸性及黏著性的微粒。一般靜電集塵器可分爲圓管及平板型兩種形式，而使收集電極表面產生洗滌液的方法有噴霧法及水氣凝結法兩種[49]。噴霧法即在集塵器上方或下方噴入液滴，使收集表面形成水膜以去除附著的粉塵。水氣凝結法即在收集板外側裝設熱交換器，當收集板溫度降低時，可使高溫廢氣內的水蒸氣凝結於收集板上並形成水膜，進而達到洗滌的效果。此兩種方法的缺點在於當水霧隨著氣流進入靜電集塵器時，因液滴的導電性較粉塵微粒高，使得電場強度增加導致電崩潰[44]，造成電極板產生火花及短路。

Lundgren 等人設計了一種水流式濕式靜電集塵器，並取得美國專利(United States Patent, US005395430A)，可有效改善噴霧法及水氣凝結法所產生的問題。測試結果顯示，當電壓由 30 KV 增加到 75 KV 後，可將不透明度(Opaicity)由 35 % 降到 0 % [50]。Mikropul 在文獻中介紹了濕式靜電集塵器的基本構造及利用，收集管柱由聚氯乙烯材質製成，充電電極線爲不鏽鋼材質，連續循環供應的洗滌水在收集管柱內壁形成一層水膜，可洗除收集在壁上的微粒。作者提到當洗滌液在收集管柱內壁形成水膜時，會因爲洗滌液的低導電度而造成電場強度的降低，並降低微粒去除效率。若將洗滌液的導電度提升到  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$  (飲用水導電度爲  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ )，則可避免電場強度及去除效率降低的問題[51]。Kim 等人設計一種模場濕式靜電集塵器用以去除戴奧辛廢氣。此靜電集塵器包含 5 個平行的圓柱型集塵器，管柱由不鏽鋼材質製成，內徑爲 110 或 140 mm，長 1500 mm，電暈放電電極線直徑爲 30 mm，供應電壓爲 20 KV。洗滌水由上往下流動，以去除吸附在收集管柱壁上的微粒。操作溫度在  $80^\circ\text{C}$  以下。實驗結果顯示，當戴奧辛進口濃度爲  $0.22 \text{ g}/\text{Nm}^3 \sim 0.84 \text{ g}/\text{Nm}^3$  時，去除效率可達到 85.7%~99%。文獻中並未提到微粒粒徑的分佈範圍及產生均勻水膜的方法[52]。

上述方法所產生的洗滌液若在收集管柱內壁無法形成均勻水膜，則會造成槽道現象(channeling)，使得微粒附著於乾燥的收集表面而無法洗除。因此，Pasic 等人研發了一種薄膜濕式靜電集塵器，並取得美國專利(United States Patent, US006231643B1)，但並未針對濕式靜電集塵設備進行測試，僅討論當薄膜應用於乾式靜電集塵設備時，薄膜不會因為氣流的干擾造成擾動，使粉塵不易附著而掉落，且在清理時可利用機械震動方式將粉塵震落[52]。

Bayless 等人利用小型薄膜濕式靜電集塵器進行飛灰、氧化鐵及碳酸鈣微粒去除效率測試。集塵器內部包含三個平行架設的矽纖維薄膜，面積為  $0.416 \text{ m}^2$ ，充電電極有 10 條，實驗於  $170^\circ\text{C}$  下進行，氣流流速為  $2 \text{ m/s}$ ，洗滌液流速為  $0.7\sim 1.9 \text{ l/min}$ ，飛灰、氧化鐵及碳酸鈣微粒粒徑分佈分別為  $20\sim 25 \mu\text{m}$ 、 $1\sim 5 \mu\text{m}$  及  $2\sim 3 \mu\text{m}$ 。實驗結果顯示，相對於 Deutsch-Anderson 理論公式計算出的去除效率，當電壓為  $42\sim 47 \text{ KV}$  時，薄膜濕式靜電集塵器對飛灰的平均相對去除效率為 126%；當電壓為  $41\sim 46 \text{ KV}$  時，對於氧化鐵微粒的相對去除效率為 128%~138%；當電壓為  $43\sim 47 \text{ KV}$  時，對於碳酸鈣微粒的相對去除效率為 118%~129%[44]。作者也利用模廠薄膜濕式靜電集塵器測試氧化鐵微粒的去除效率，實驗結果顯示當操作溫度為  $60^\circ\text{C}$ 、氣體流量為  $2.3 \text{ m}^3/\text{min}$  及測試電壓為  $44 \text{ KV}$  時，約有 96% 的微粒被收集。

Pasic and Caine 文獻中介紹模廠薄膜濕式靜電集塵器運用於石灰製造工廠的粉塵去除效果，測試結果與各操作參數如表 4 所示。由表 4 可知，薄膜濕式靜電集塵器對於  $\text{SO}_3$ 、微粒狀污染物及  $\text{Hg}^{2+}$  的最高去除效率可達 93%、96% 及 82%。薄膜使用壽命為 15 個月以上[54]。Saiyasitpanich 等人利用單級濕式靜電集塵器進行柴油引擎排放微粒(DPM, Diesel particulate matter)去除效率的測試。濕式靜電集塵器為圓柱型，由碳鋼合金製成，管柱長  $0.914 \text{ m}$ ，內徑為  $0.178 \text{ m}$ 。不鏽鋼電暈放電電極長  $0.559 \text{ m}$ ，內徑  $0.25 \text{ mm}$ 。測試氣體流量為  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ，氣體滯留時間為  $0.1 \text{ s}$ ，充電電壓為  $0\sim 0.72 \text{ KV}$ 。收集管柱內壁連續提供  $2.27\sim 3.18 \text{ L/min}$  的洗滌液用以去除吸附在收集管壁上的微粒。實驗結果顯示氣體滯留時間與引擎負載對於濕式靜電集塵器去除柴油引擎所排放的微粒有很大的影響。當引擎負載



量為 75 KW、氣體停留時間為 0.1~0.4 s、微粒粒徑為 20~40 nm 時，去除效率為 67~96 %。當引擎負載量愈高，則微粒收集效率也就越低[55]。

表 4 薄膜濕式靜電集塵器模廠測試 [54]

石灰製造工廠			
氣體流量:8000 ACFM		氣體流量:15000 ACFM	
比收集面積: 0.035(ft <sup>2</sup> /ACFM)		比收集面積: 0.002(ft <sup>2</sup> /ACFM)	
收集物種	收集效率(%)	收集物種	收集效率(%)
particulate	96	particulate	80
SO <sub>3</sub>	93	SO <sub>3</sub>	71
Hg <sup>+2</sup>	82	Hg <sup>+2</sup>	61
收集物種	洗滌塔收集效率(%)	薄膜濕式靜電集塵器收集效率(%)	總去除效率(%)
Fly ash H <sub>g</sub>	82	75	94 %(fly ash+ H <sub>g</sub> <sup>2+</sup> )
H <sub>g</sub> <sup>2+</sup> (44%)	69	78	75 %(Total Hg)
H <sub>g</sub> <sup>0+</sup> (23%)	0	10	

美國環保署(EPA-425/F-03-030)曾針對濕式靜電集塵器對於各種粒徑的收集效率、操作條件、基本原理及操作成本做概略的介紹。一般典型的平板濕式靜電集塵器其風量為 50~250 m<sup>3</sup>/sec，較小型的設備則為 50~100 m<sup>3</sup>/sec；操作溫度低於 80~90 °C，粉塵負載量為 2~110 g/m<sup>3</sup>；對於銅、鐵及不鏽鋼的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 去除效率皆可達到 90%以上。為達到正確操作條件，通常在集塵器前端會加裝洗滌塔使氣體溫度及濃度達到可處理的範圍內；是用粉塵為黏性微粒、霧滴、高電阻係數及爆炸性粉塵；在操作的成本上，固定成本為 US\$42000~85000 m<sup>3</sup>/sec，操作成本為 US\$11000~85000 m<sup>3</sup>/sec/year。

## B. 過濾器

過濾是淨化空氣最簡單有效的方法，在工業除塵之應用上，最常使用的是濾袋屋。王竹方曾於永安工業區的一個奈米粉體廠以ELPI (electrical low pressure

impactor) 測量煙道出口的微粒排放濃度，結果發現由於濾袋屋的週期性洗袋，排放的微粒總濃度在 $1.5$ 至 $2.6 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ 之間呈現週期性的變化，雙峰分佈之數目峰值直徑為 $137 \text{ nm}$ 及 $0.8 \text{ \mu m}$ ，第一次量測),  $83 \text{ nm}$ 及 $1.3 \text{ \mu m}$ (第二次量測)，奈米微粒之質量濃度為 $8.3 \text{ mg/m}^3$ [56]，此濃度不低，但此研究並未探討濾袋屋的過濾效率，將來應繼續針對工業用濾袋屋的奈米微粒濾除效果加以研究探討。

因此對於奈米微粒而言應使用高效濾材作有效的控制。氣膠過濾被應用在多種不同的用途，例如：個人防護口罩、有害微粒去除設備及無塵室補充空氣的淨化等。一般而言當奈米微粒愈小，因為擴散機制愈強，使得收集效率會愈高，但Wang和Kasper的研究顯示粒徑小於 $10 \text{ nm}$ 的奈米微粒會發生熱反彈而降低效率的現象[57]。Ichitsubo等人利用金屬篩進行奈米微粒穿透效率實驗時發現當微粒粒徑小於 $2 \text{ nm}$ 時，奈米微粒的穿透率會因為熱反彈現象而大於理論值[58]。而Alonso等人利用DMA技術進行實驗發現於Ichitsubo相同的實驗粒徑範圍並無微粒彈跳的影響[59]。無論實驗或理論研究，過去各學者對奈米微粒在過濾過程中是否會發生熱彈跳皆各持不同意見。為了進一步了解奈米微粒是否會因熱反彈而造成收集效率隨著粒徑減小而降低的現象，Kim等人以奈米銀微粒測試九種市售過濾材料，包含四種玻璃纖維濾材、四種帶電濾材及一種奈米纖維濾材，如表5及表6所示。實驗中（圖7）以高溫爐氣化銀粉後凝結為奈米銀微粒，並以Nano-DMA篩選出所需粒徑進行過濾材料穿透率實驗。其研究結果（圖8及圖9）顯示隨著玻璃纖維直徑縮小或過濾速度減小，粒徑為 $3 \sim 20 \text{ nm}$ 之奈米微粒之穿透效率越小。奈米銀微粒對市售特殊濾材之穿透率皆小於 $5\%$ ，尤其是奈米纖維濾材（圖10）。此九種市售濾材無論是否帶電，對奈米微粒之穿透率皆隨著粒徑減小而降低，並於粒徑為 $3 \text{ nm}$ 時皆無熱反彈現象（圖8-圖10）[60]，此結果在本國IOSH的研究也得到證實，如前所述，Huang等人的實驗結果顯示幾乎所有小於 $10 \text{ nm}$ 或大於 $5 \text{ \mu m}$ 微粒被濾材收集，在這範圍內濾材的帶電量並不影響穿透值，也顯示粒徑為 $4.5 \text{ nm}$ 以上對於纖維濾材沒有熱反彈[61]。

表 5 H&V 玻璃纖維濾材特性 [60]

Filter Parameters		Media			
		HE1073	HE1021	HF0031	HF0012
Thickness (cm)	Ave.	0.053	0.069	0.074	0.074
	%COV	2.3	4.3	2.3	2.3
Basis Weight (g/m <sup>2</sup> )	Ave.	63.9	80.3	82.6	69.2
	%COV	0.53	0.67	0.86	0.92
Pressure Drop at 5.3 cm/s (mmH <sub>2</sub> O)	Ave.	8.4	4.7	3.5	1.3
	%COV	1.48	1.35	1.94	1.47
DOP % Penetration 0.3 μm at 5.3 cm/s	Ave.	12.8	39	45.8	79.9
	%COV	2.2	1.7	0.92	1.24
Fiber Density(g/m <sup>3</sup> )	-	2.4	2.4	2.4	2.4
	-	0.050	0.049	0.047	0.039
Effective Fiber Diameter (μm)	-	1.9	2.9	3.3	4.9
	-	8.8	13.4	16.1	26.2

表 6 特殊濾材特性[60]

Name	Type	Manufacturing method
Media A	Corona charged blown fiber (mid-size fiber)	Melt blowing process
Media B	Highly charged blown Fiber (mid-size fiber)	Melt blowing process
Media C	Split film fiber	Film extrusion process
Media D	Highly charged blown fiber (fine-size fiber)	Melt blowing process
Media E	e-PTFE Membrane Filter	-

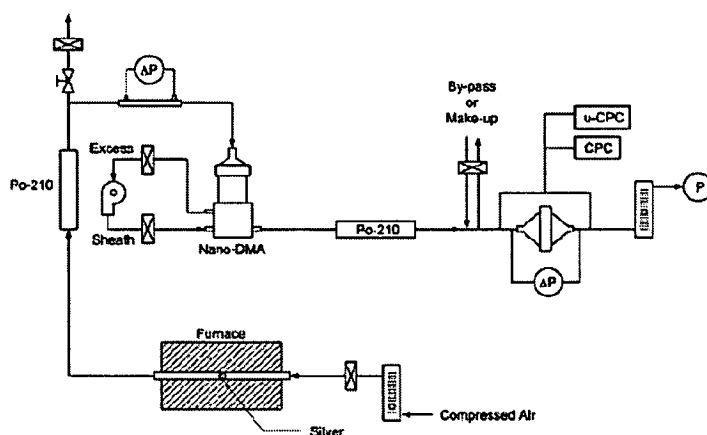


圖 7 濾材穿透率測試系統配置圖[60]。

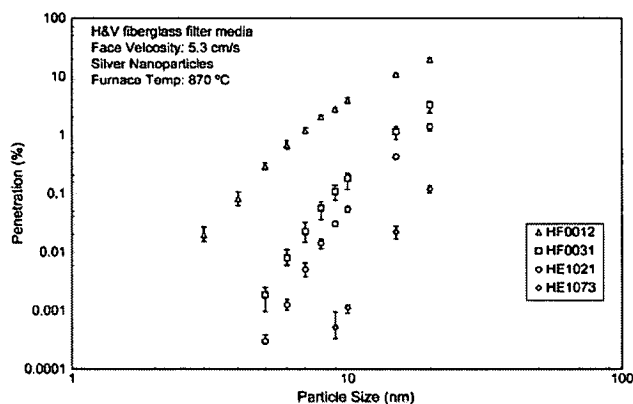


圖 8 奈米微粒於面速度為 5.3cm/s 對 H&V 玻璃纖維濾材之穿透率[60]。

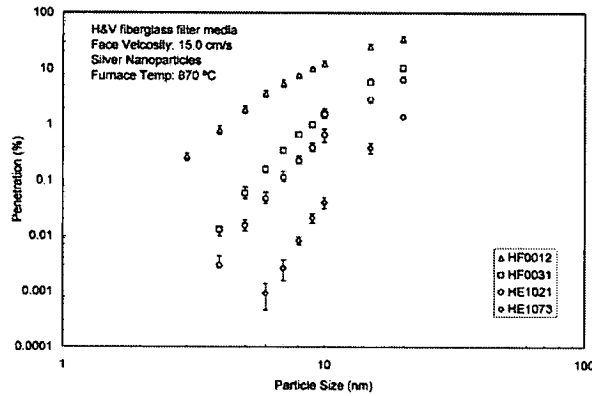


圖 9 奈米微粒於面速度為 15cm/s 對 H&V 玻璃纖維濾材之穿透率[60]。

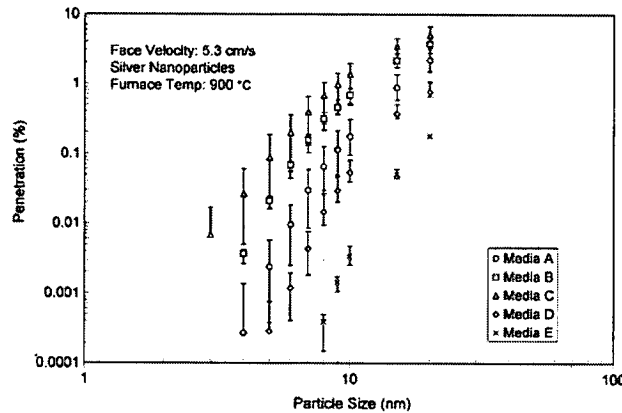


圖 10 奈米微粒於面速度為 5.3cm/s 對特殊濾材之穿透率[60]。

擴散為奈米微粒的主要過濾機制，所以當微粒粒徑小於 100nm 時，單纖維過濾效率  $E$  約略等於擴散過濾效率  $E_D$ 。過去學者通常使用  $E_D = 2Pe^{-2/3}$  [22]，其中

$Pe$  為 Peclet 常數， $Pe = \frac{d_f U_0}{D} = d_f U_0 \frac{3\pi\mu}{kTC_c} d_p$ 。Wang 等人將粒徑為 3nm~260nm 之

奈米微粒對玻璃纖維濾材之穿透效率實驗結果與過去學者提出之單一纖維過濾理論進行比較[62]，發現僅有 Kirsch and Stechkina 能夠於某些  $Pe$  值時與實驗值近似[63]。以實驗數據找出各過濾材料之單一纖維去除效率公式，並將各過濾材料公式之係數加以平均，Wang 等人得到經驗公式  $E_D = 0.84Pe^{-0.43}$  [62]。圖 11 顯示此研究之經驗公式相較於過去之單一纖維過濾效率公式(Hinds)有較佳之結果，與各種玻璃纖維穿透率實驗數據有相當一致之結果，可作為奈米微粒過濾器設計時使用。

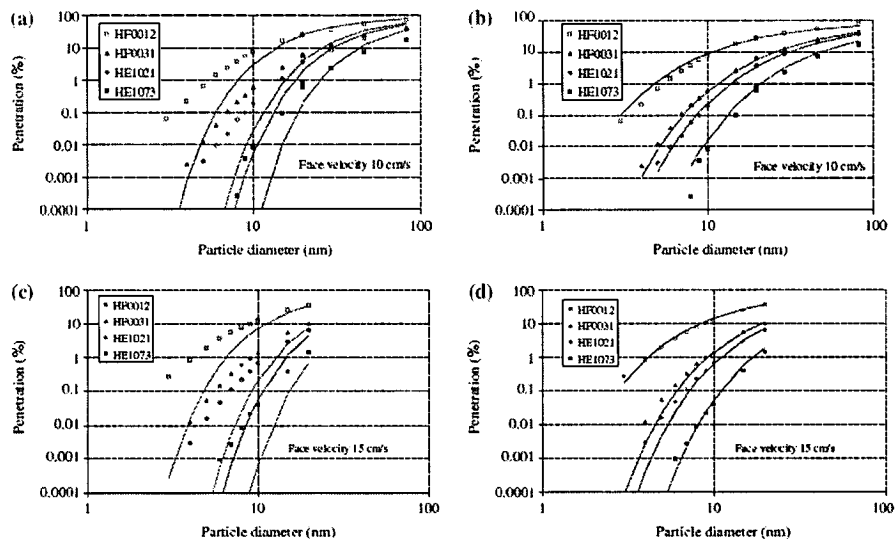


圖 11 穿透效率與微粒粒徑之關係圖（面速度：(a)及(b)為 10cm/s，(c)及(d)為 15cm/s；單一纖維效率公式：(a)及(c)為  $E=2Pe^{-2/3}$  [22]，(b)及(d)為  $E=0.84Pe^{-0.43}$ ）。 [62]

### C. 濕式洗滌器

圖 12 顯示了一個最簡單的文氏洗滌器的示意圖。文氏洗滌器是所有濕式洗滌器中，效率可以提昇至最高者，也是唯一可以去除次微米微粒者，雖然欲達到高的除塵效率時，文氏洗滌器需要大的壓力差，但是因為系統之彈性使它的運用範圍很廣。文氏洗滌器的效率及液氣比的關係如圖 13 所示，對奈米微粒的收集而言，壓損需高達 100 in. H<sub>2</sub>O 以上。[64]結合次微米微粒的成長裝置及傳統的文氏洗滌器成爲一個高效率、低壓降的洗滌系統，可以大幅降低操作成本(圖 14)。利用常溫的廢氣與高溫的飽合蒸氣混合，或是高溫廢氣與常溫的水蒸氣混合時，產生蒸氣的過飽合現象，使細微粒成長成較大的微粒，可以在後續的文氏洗滌器中，有效的被加以去除，而系統的壓力降可降至 10 in.H<sub>2</sub>O 以下，操作成本可大幅降低(圖 15)。

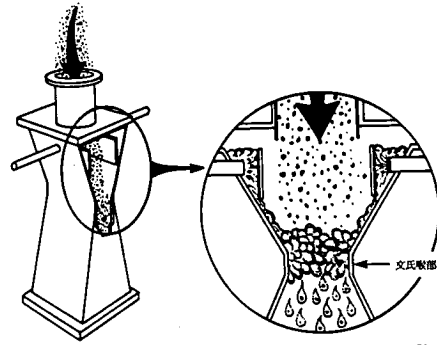


圖 12 典型的文氏洗滌器

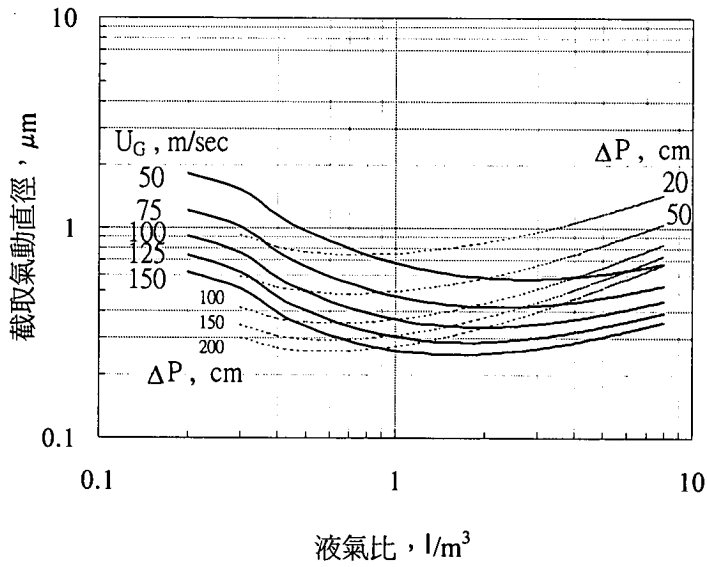


圖 13 文氏洗滌器的截取氣動直徑與壓差, 液氣比的關係圖。

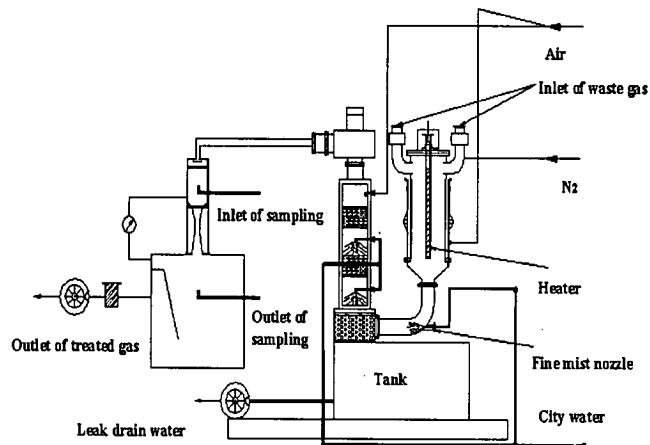


圖 14 增加凝結機制的文氏洗滌器的示意圖 [64]。

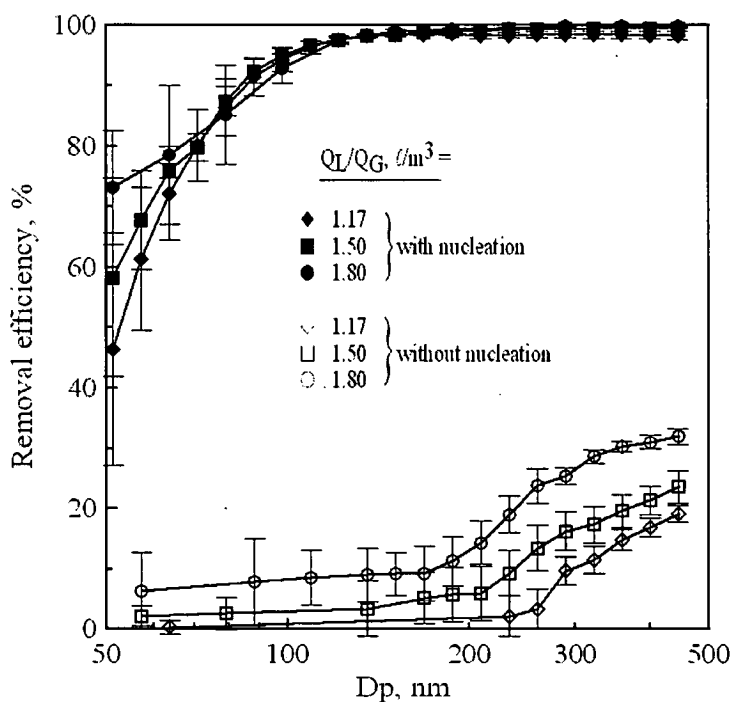


圖 15 增加凝結機制的文氏洗滌器可大幅增加奈米微粒的去除效率圖[64]。

## 第二節 奈米粉體的揚塵逸散特性

在粉體製造過程中往往會造成奈米微粒的逸散(例如物料的儲存、搬運、裝載以及混合)，因此國際間正積極研究測定奈米粉塵逸散的方法以作為粉塵是否有發生逸散之虞之標準。揚塵特性(dustiness)為粉體在處理過程中會逸散出粉塵的能力，當某一粉體的揚塵特性越大即表示越容易逸散，並隨著氣流四處飄散，揚塵特性越小則反之。因此若能精確了解各種奈米物質的揚塵特性，就能夠利用分組控制法[14]進行風險的評估、控制以及最小化，以將健康、安全以及經濟上的危害降至最小[65]。

關於工業周界奈米物質逸散測定，目前國際上尚沒有標準的測定方法，不過類似於工業周界同樣屬於大氣環境採樣的都會區採樣，其有關奈米微粒的量測方法及分析技術已有相當多的論文發表，可作為相關研究的參考。從各層面分析，以上兩種採樣幾乎相同，主要的差異在於：工業周界會有某些特定的污染標的，例如二氧化鈦和氧化鋅粉體廠，其周界採集之微粒應分別含有相對較高比例之鈦及鋅成份，或製程中添加的其它金屬元素或化學物質等；此外人造奈米工業的周界微粒濃度應比一般大氣環境高，所以需考慮適切的採樣設計以別於大氣採樣，

進而準確量測出工業周界奈米微粒的濃度及成分。造成人造奈米微粒逸散至周界的必然條件為微粒在作業環境已經發生逸散，因此如能先一步做好工廠作業環境的量測、控制及粉塵逸散測定，才是有效控制人造奈米微粒逸散至環境的先決條件。

## 壹 揚塵特性測試

爲了降低奈米微粒在作業環境中的逸散，必須了解其逸散特性並加以量化，但目前在國際上僅有可吸入性、胸腔區和可吸入性粉塵三種粉塵的揚塵試驗方法，並無奈米微粒逸散之測試方法。揚塵特性試驗最早是由英國職業衛生協會 (British Occupational Hygiene Society, BOHS) 在 1985 年發表，介紹當時尚在發展中的揚塵量測方法，實驗設備主要由揚塵產生器與微粒採樣器兩部分組成，揚塵產生器是用來模擬粉體在工業製程中微粒飛揚逸散的情形，而微粒採樣器則是篩選及採集某一粒徑範圍的微粒[66]。BOHS 中亦提到揚塵特性是受到實驗儀器設備、受測物質特性和環境因素影響[66]。過去已有不少相關文獻在國際期刊中發表，但實驗方法卻不盡相同[67]，近年來亦有許多學者利用不同產塵方式將一般粉體及奈米粉體產生出的奈米微粒進行逸散研究。大多數的揚塵特性實驗均依照以下三種原理來產生揚塵：

- (1) 慣性衝擊或單一掉落法：利用轉動快門將受測樣品在瞬間從一定高度落入一密閉腔體，當粉體在掉落的途中，有些許的小微粒逸散出，大部分粉體則繼續掉落至底部的金屬板上，此時因慣性衝擊造成微粒反彈而造成揚塵逸散[68]。此方法以德國國家標準局(Deutsches Institut für Normung, DIN)所公佈的標準試驗程序 DIN 55992-2 (1999)最爲典型，其優點是操作簡便、構造簡單容易清理和迅速測量。缺點是樣品的測試量大(通常爲 30~100 g)，所費不貲。
- (2) 流體化床法：受測樣品放置在垂直圓管底部的流體化床中，再令垂直上升氣流通過，此一上升氣流具有一定流速，將樣品微粒帶起進入氣流中，若受測樣品具有較大的聚結性不易分散成細微粒時，則需放入某種揚塵介質(例如砂礫或銅珠)與樣品均勻混合，利用介質與樣品間的摩擦產生粉塵[69]。此方法的缺點一爲構造較爲複雜，清潔不易。二爲放入揚塵介質時，介質本身具有一定的逸散量，會干擾受測物質的揚塵量進而影響評估受測粉體的揚塵特性。



(3) 旋轉腔試驗機法：如圖 16 所示，將受測樣品均勻地鋪在旋轉腔體內的底部，當腔體開始旋轉時，受測樣品在旋轉腔中連續不斷地被升起、落下，因而產生揚塵。大微粒因重力繼續往下掉落，小微粒則會隨著水平氣流被帶至微粒採樣區段中[70,71]。此方法之優點為能夠模擬許多的處理程序且適用於各種不同特性的物質[65]。此方法用於歐洲標準化委員會(European Committee for Standardization, CEN)和 DIN 在 2006 年發表不同的標準旋轉腔試驗機試驗程序[72-74]。

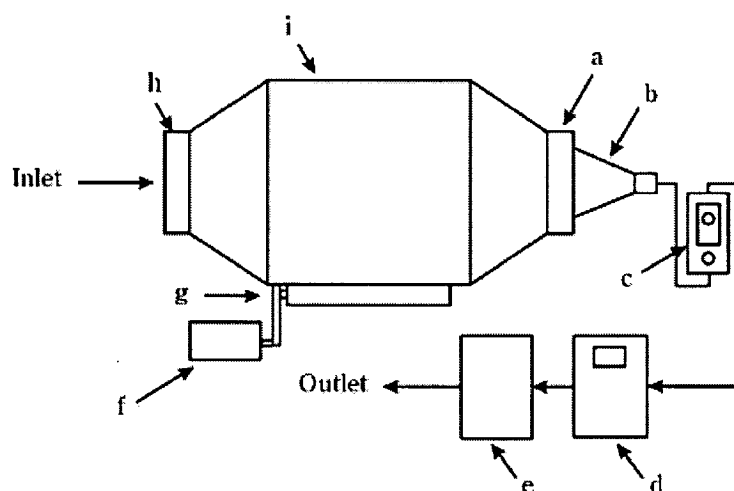


圖 16 旋轉腔試驗機法儀器構造圖[70]。a：旋轉腔本體出口，b：採樣裝置，c：浮子流量器與流量控制計，d：壓力計，e：抽氣幫浦，f：傳動馬達，g：傳動滾軸。

Petavratzi 等人比較了上述三種試驗法(表 7)，發現旋轉腔體試驗法最能夠有效地模擬各種工業製程程序，例如物料混合、細粒化和塗敷(mixing, granulation, coating)、氣動式乾燥及輸送(pneumatic drying, conveying)以及機械式傳輸及抬升(mechanical conveying-elevating)等[75]。所以 Petavratzi 選擇旋轉腔體試驗法作為研究開採石灰石時微粒逸散情形的最佳實驗方法[75]。Mark 等人和 Schneider and Jensen 亦因上述理由選擇使用此方法研究奈米粉體的逸散特性[76,77]。

表 7 三種揚塵特性試驗方法與各種工業製程程序的適用性比較 [75]

	衝擊試驗 法 (impact tests)	旋轉腔試驗 機法 (rolling drum)	流體化床 法 (fluidized bed)
揚塵等級 (dustiness ranking)	√	√	√
除塵效益 (effectiveness of dedusting)	!	√	√
磨損影響 (effects of attrition)	×	!	!
揚塵產生之工業製程程序			
篩選分級 (screening-classification)	!	!	√
混合、細粒化、塗敷 (mixing, granulation, coating)	×	√	!
氣動式乾燥及輸送 (pneumatic drying, conveying)	×	√	√
裝料及卸料 (loading-unloading)	√	!	!
機械式輸送及抬升 (mechanical conveying-elevating)	!	√	!
裝袋 (bagging)	√	!	√
車輛運輸 (vehicle movement)	√	√	√
堆料時的損失 (losses from stockpiles)	!	!	√

√ 表示適用性佳；×表示適用性不佳；！表示適用性尚可。

近年來，CEN EN15051 發表了兩套標準揚塵測試方法，其一為旋轉腔試驗機法，旋轉腔試驗機法的產塵原理與實驗設備已如前所述。其二為連續落下法 (continuous drop)，主要用來模擬粉體裝料/卸料 (loading-unloading) 與裝袋 (bagging) 時的微粒逸散情形 [72]。產塵原理類似前述的單一掉落法，方法為利用螺旋葉片與震動器將受測粉體從樣品槽中不斷落下並進入一密閉腔體中，樣品的落下量由螺旋葉片的轉速控制為每分鐘 6~10 g，接著進入一慢速的垂直上升氣流中，流速為 0.05 m/s，大部份的粉體因團聚力的關係不易分散，並受重力繼續往下掉落，只有少部份的小微粒會被氣流帶起進入微粒採樣器中，當繼續落下的粉體掉落至

腔體底部，會因慣性衝擊的力量使粉體分散並造成微粒反彈揚起，再隨著上升氣流進入採樣器中。最後由採樣器收集到的微粒質量與粉體落下量，計算得到粉體的揚塵特性質量分率(dustiness mass fraction)。

## 貳 揚塵等級指標(dustiness index)

將奈米粉體逸散形成揚塵後，利用重力沉降、慣性衝擊、截留或靜電力等收集機制將塵粒依照其粒徑大小，篩選分級，再利用秤重或光學量測方式分析粉塵的質量濃度分布與數目濃度分布並判斷其揚塵等級。EN 15051 旋轉腔試驗機法的粉塵分析技術是利用慣性衝擊與重力沉降的機制，將揚起的微粒分成可吸入性、胸腔區和可呼吸性三種粉塵，使用採樣器的濾材為多孔性泡棉與濾紙[72]。依據美國政府工業衛生組織(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH, 1997)、國際標準組織(International organization for standardization, ISO, 1983)及 CEN (1992)針對工作場所的粉塵提出此三種粉塵採樣的規範[22]，並定義了此三種粉塵。包含進入頭部呼吸道之後的粉塵稱為可吸入性粉塵(inhalable particulate mass, IPM)，穿過頭部呼吸道進入支氣管之後的粉塵稱為胸腔區粉塵(thoracic particulate mass, TPM)、及達到氣體交換區的粉塵稱為可呼吸性粉塵(respirable particulate mass, RPM)。Lyons and Mark 指出使用多孔性聚酯泡綿作為旋轉腔體試驗機法中的粉塵篩選器與採樣器，是因為多孔泡綿對微粒的主要收集機制為慣性衝擊與重力沉降，與人體呼吸系統對微粒的收集機制相似，因此利用多孔泡綿做為微粒的篩選器與採樣器最為合適[70]。

Lyons 和 Mark 利用不同單徑微粒測試旋轉腔體圓錐出口及泡綿的實際穿透效率，發現微粒對圓錐出口的實際穿透效率數據與可吸入性粉塵的理論穿透效率曲線符合，微粒對 30 ppi 泡綿的實際穿透效率較胸腔性粉塵的理論穿透效率曲線稍低，實際截取氣動直徑約為 9  $\mu\text{m}$ ，微粒對 90 ppi 泡綿的實際穿透效率則與可呼吸性粉塵的理論穿透效率曲線符合[70]。利用旋轉腔試驗機法量測出各種粉體的揚塵特性，以可吸入性粉塵、胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵微粒的質量分率表示(mg/kg)，即表示每公斤的粉體能逸散出多少毫克的粉塵，並根據 EN 15051 提供的揚塵等級指標，如表 8 所示，將樣品的揚塵特性分成：極低等(very low)、

低等(low)、中等(moderate)和高等(high)四個揚塵等級[72]。表 9 為硫酸鋇(barium sulphate)、煤灰(coal dust)、滑石粉(talc)、麵粉(flour)、二氧化鈦(titanium dioxide)和石英粉(quartz flour)等 14 種不同粉體在三種粉塵中的質量分率與揚塵等級 [65]。

表 8 可吸入性粉塵、胸腔區粉塵和可呼吸性粉塵的揚塵等級指標 [72]。

揚塵等級	可吸入性粉塵 質量分率 (inhalable dustiness mass fraction) (mg/kg)	胸腔區粉塵 質量分率 (thoracic dustiness mass fraction) (mg/kg)	可呼吸性粉塵 質量分率 (respirable dustiness mass fraction) (mg/kg)
極低等 (very low)	< 200	< 40	< 10
低等 (low)	200 to 1000	40 to 200	10 to 50
中等 (moderate)	> 1000 to 5000	> 200 to 1000	> 50 to 250
高等 (high)	> 5000	> 1000	> 250

表9 14種不同粉體在三種粉塵中的質量分率與揚塵等級 [65]。

粉體	可吸入性粉塵 質量分率 (inhalable dustiness mass fraction) (mg/kg)	胸腔區粉塵 質量分率 (thoracic dustiness mass fraction) (mg/kg)	可呼吸性粉塵 質量分率 (respirable dustiness mass fraction) (mg/kg)
硫酸鋇	1620 (M)	720 (M)	240 (M)
煤灰	16340 (H)	4020 (H)	615 (H)
研磨粉	340 (L)	210 (M)	78 (M)
滑石粉	5600 (H)	1300 (H)	120 (M)
皂土	2630 (M)	1010 (H)	212 (M)
硫磺	310 (L)	4 (VL)	3 (VL)
鑄粉	3717 (M)	1710 (H)	390 (H)
麵粉	621 (L)	147 (L)	12 (L)
飼料小球	55 (VL)	11 (VL)	4 (VL)
碳黑	19645 (H)	2073 (H)	103 (M)
二氧化鈦	1280 (M)	112 (L)	8 (VL)
凹凸棒石黏土	5055 (H)	1224 (H)	229 (M)
石英粉 A	3222 (M)	1417 (H)	436 (H)
石英粉 B	100 (VL)	53 (L)	17 (L)

### 參 奈米粉體逸散特性之最新研究

Ibaseta等人利用自由落體的方法進行二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )以及二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )奈米粉體揚塵特性研究。其試驗方法是將粉體放置在樣品儲存槽中，儲存槽的底部具有一螺旋葉片能夠將樣品帶入測試腔體中並由重力方式落下，再利用氣動式震盪器使儲存槽不斷震動，讓粉體往槽體底部移動以防止堵塞，並在測試腔體的不同高度處量測微粒數目濃度分佈。結果顯示當奈米粉體落下高度為160 cm時， $\text{SiO}_2$ 奈米粉體逸散的微粒數目濃度主要分布在小於100 nm以下，最大值出現在第一階，對應的微粒氣動直徑為38 nm、電移動度直徑為18 nm。而 $\text{TiO}_2$ 奈米粉體產生的超細氣懸微粒很少，最大值出現在第八階，對應的微粒氣動直徑為1.22  $\mu\text{m}$ 、電移動度直徑為0.66  $\mu\text{m}$ 。由掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察發現 $\text{TiO}_2$ 微粒的聚集狀態較為緊實，而 $\text{SiO}_2$ 呈現較鬆散的聚集狀態，由此可知結構鬆散的微粒較輕容易逸散[78]。

Maynard等人在實驗室以及工作場所對雷射剝蝕法(Laser ablation)和高壓一氧化碳法(high-pressure carbon monoxide, HiPCO)產生的未純化單壁奈米碳管(single-walled carbon nanotube, SWCNT)進行逸散試驗與測量。在實驗室的量測中，利用流體化床的原理，將裝有單壁奈米碳管的離心管放在漩渦震盪器(Vortex shaker, Vortex genie, Cole Parmer, Vernon Hills, IL)之上振盪，並在試管內通入乾淨空氣用以攜帶出微粒，再量測微粒的數目濃度分布。此方法的優點在於購買測試樣品的花費較少，一次實驗通常只需數十毫克，以及能夠有效將粉體分離揚起。缺點為此產塵方法無法有效模擬工業處理程序，得到的粉體逸散特性不能夠代表工作人員暴露在作業環境中的危害風險。實驗結果則分別如圖17及圖18所示，圖17是使用由雷射剝蝕法所產生的SWCNT來做試驗，由於其結構較緊實，所以在振盪產塵時需在離心管中加入青銅小珠，以便微粒分散之用，此實驗結果顯示雷射剝蝕法之SWCNT在初始5分鐘有一些奈米微粒(< 100 nm)之排放，但之後即無奈米微粒釋出。圖18是使用高壓一氧化碳法所產生的SWCNT來做試驗，由實驗結果可以發現SWCNT會隨著振盪強度之增加而釋出更多的奈米微粒及100 nm以

上的微粒，且在15分鐘之內濃度穩定。由兩者結果得知高壓一氧化碳法產生的SWCNT較雷射剝蝕法產生的SWCNT較易逸散奈米微粒。在工作場所現場的SWCNT監測實驗顯示，次微米微粒不會隨著SWCNT之使用而增加，且SWCNT的濃度在 $0.7\sim 53\text{ g/m}^3$ 之間，但是使用真空吸塵器清理密閉操作房時會使奈米微粒之數目濃度增加[79]。

Maynard等人利用氣膠質量監測儀(aerosol particle mass monitor, APM)及穿透式電子顯微鏡(transmission electron microscope, TEM)進一步發現，如圖4所示，SWCNT在漩渦震盪器逸散出在100 nm電泳直徑下的聚集微粒以非管狀的緊密碳粒為主(如圖19 (a))，但另一批SWCNT在150 nm電泳直徑下的聚集微粒又以較為鬆散含有成捆奈米碳管的奈米索(nanoropes)為主(如圖19 (b))；30 nm電泳直徑微粒則以含有鬆散的奈米索為主[79]。

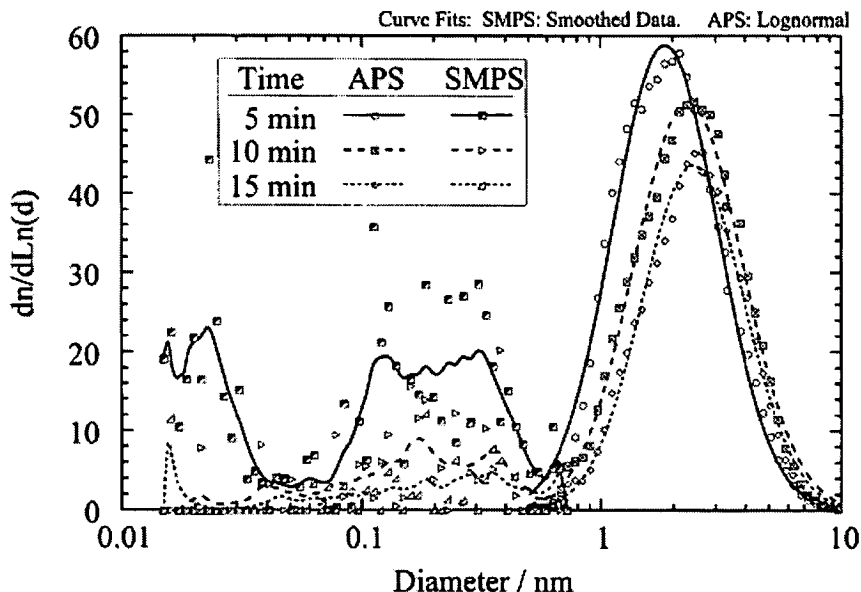


圖17 以漩渦震盪器分散單壁奈米碳管的微粒逸散數據 [79]。

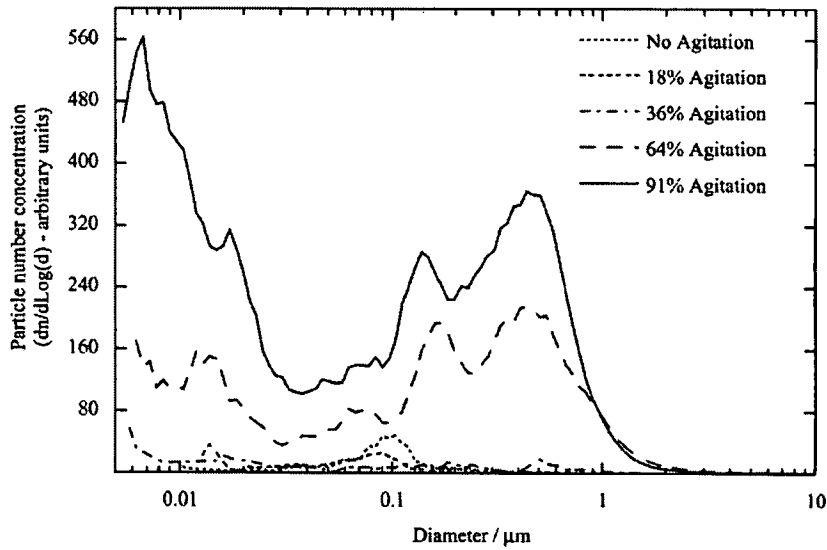


圖18 以漩渦震盪器分散單壁奈米碳管的微粒逸散數據 [79]。

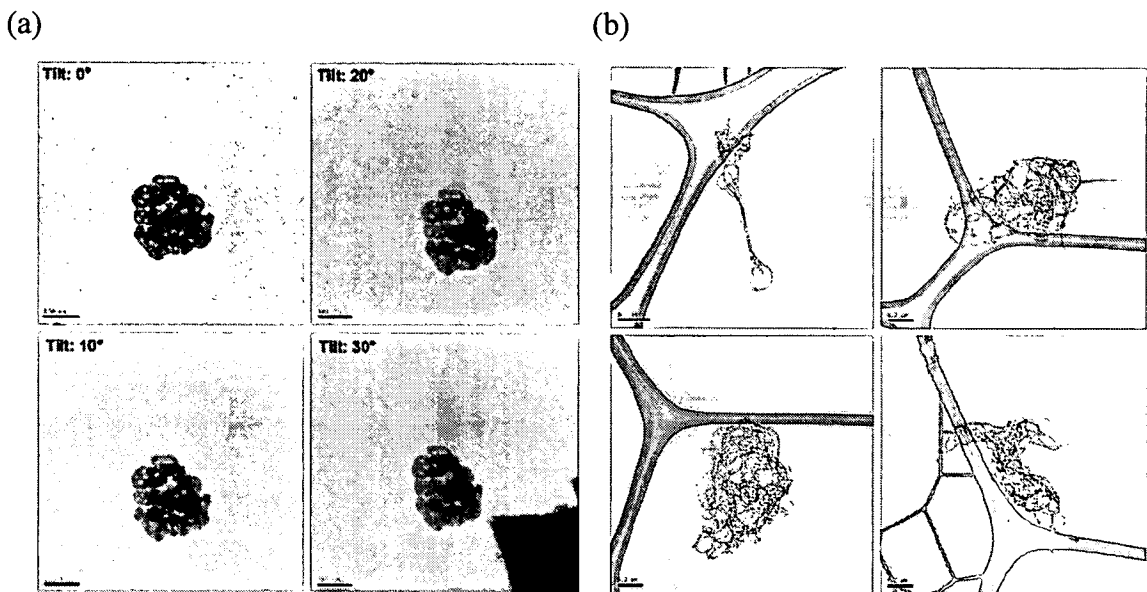


圖19 利用TEM觀察觀察SWCNT形貌[80]，(a)微粒以非管狀的緊密碳粒為主；(b)鬆散含有成捆奈米碳管的奈米索。

Isamu等人也利用Maynard的漩渦震盪法對高壓一氧化碳法產生的SWCNT與TiO<sub>2</sub>奈米粉體進行逸散特性試驗。實驗結果顯示，SWCNT和TiO<sub>2</sub>奈米粉體所逸散出的微粒分布範圍很廣，微粒粒徑從奈米到微米都有，雖然數目濃度的峰值都出現在次微米到微米的粒徑，也有小於100 nm的奈米微粒逸散出來，但可以發現兩者的奈米微粒逸散量皆不多。並且發現在不同震盪頻率(40~80 %的最大震盪頻率)以及不同的樣品測試量(0.25~1.0 cm<sup>3</sup>)下，微粒數目濃度會隨著震盪頻率增加

而上升，每單位重量的TiO<sub>2</sub>奈米粉體所逸散出微粒數目濃度(#/cm<sup>3</sup>/g)會隨著粉體測試量增加而降低，而SWCNT的逸散量則不會隨著粉體測試量增加而變化，但其微粒數目濃度分布的型態均維持不變[81]。

Mark等人利用CEN的標準旋轉腔體試驗機產生揚塵，針對TiO<sub>2</sub>、CeO以及奈米碳纖維(Carbon nanofibers)三種奈米粉體的揚塵特性進行研究，腔體轉速為4 rpm，粉體的測試量為5 cm<sup>3</sup>。結果發現當初始粒徑越小(CeO)，可呼吸性粉塵的質量分率就越大，小於200 nm微粒的數目濃度和表面積濃度也越大；TiO<sub>2</sub>微粒與奈米碳纖維逸散時呈單峰分佈，CeO微粒呈雙峰分佈，數目濃度最高為CeO，其次為奈米碳纖維，TiO<sub>2</sub>最小，因此可知越細的粉體，逸散性越好，逸散時大多聚集成為1 μm大小的微粒，小於100 nm以下的奈米微粒很少[76]。

由以上奈米粉體逸散特性之最新研究發現，奈米粉體的逸散性比一般細微粉體的逸散性高出很多，但不論是奈米粉體或次微米粉體，逸散出的微粒均成聚集的結構。奈米粉體逸散出小於100 nm以下的奈米微粒均很少，微粒數目濃度呈雙峰或多峰分佈。使用的微粒量測設備大多以即時監測儀器為主，例如SMPS、FMPS以及APS。由於上述這些儀器的微粒粒徑監測範圍較窄，單一使用時無法涵蓋奈米粉體逸散時的整個微粒粒徑分布(分布範圍通常為數奈米至數十微米)，因此往往必須合併使用。但不同儀器的量測原理及計數效率(counting efficiency)有所差異，造成整合數據時會有誤差，例如APS可能有低估微粒數目濃度的問題。為了改善此問題，往後相關的研究應加入濃度分布範圍較廣、技術較成熟的MOUDI(0.56 μm~18 μm)進行量測，收集到的微粒可進行後續的分析，以觀察微粒的實際尺寸、形貌與聚集狀態，並與直讀式監測儀器量測數據比較，驗證其準確性。

本研究團隊也曾針對揚塵特性此重要課題進行研究，選用的測試方法為較能模擬出較多處理程序的旋轉腔試驗機法。傳統的旋轉腔體試驗機法只能得到奈米粉體逸散時在可吸入性粉塵、胸腔區粉塵以及可呼吸性粉塵三種粒徑範圍的質量分率，並不能夠針對100 nm以下的奈米微粒進行分析。因此進一步地修改旋轉腔體試驗機法，如圖20所示。將微粒採樣區中的最後一階石英濾紙移除，然後將描



瞄式電動度粒徑分析儀SMPS、APS和MOUDI接到微粒採樣區的第二階之後進行量測[82]。測試的粉體有二氧化鈦奈米粉體與氧化鋅細粉體，二氧化鈦奈米粉體由德國Degussa公司所生產，型號為AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25，平均初始粒徑為21 nm，粉體密度為0.13 g/cm<sup>3</sup>；氧化鋅粉體為國內慈陽公司(Sun Beam)所製造，等級為A級鋅氧粉，初始粒徑為250-300 nm，粉體密度和晶體密度分別為0.60 g/cm<sup>3</sup>與5.61 g/cm<sup>3</sup>。

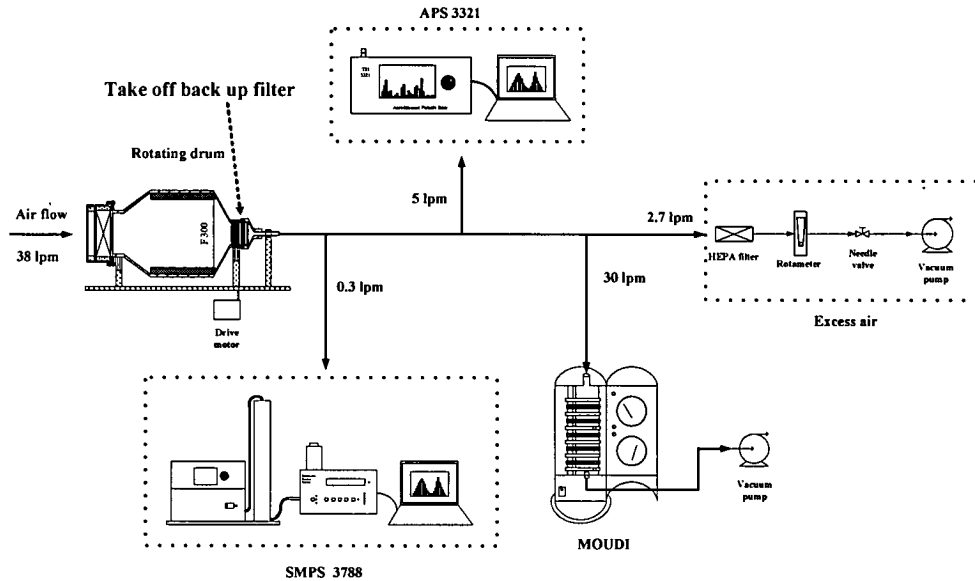


圖 20 分析奈米揚塵粒徑分佈之實驗裝置圖。

傳統旋轉腔體法的實驗結果如表 10、表 11 所示。TiO<sub>2</sub> 奈米粉體逸散時，可吸入性粉塵所佔的質量為  $6713 \pm 546$  mg/kg，揚塵等級為高等；胸腔區粉塵所佔的質量分布比例為  $576 \pm 37$  mg/kg，揚塵等級為中等；可呼吸性粉塵為  $15 \pm 2$  mg/kg，揚塵等級為低等。而 ZnO 奈米粉體逸散時在三種粒徑範圍中所佔質量分率分別為  $142 \pm 20$ 、 $72 \pm 6$ 、 $11 \pm 0.3$  mg/kg，揚塵等級分別為極低等、低等以及低等。比較兩種粉體逸散時，在可吸入性和胸腔區粉塵中，TiO<sub>2</sub> 的逸散性比 ZnO 明顯大很多，但在可呼吸性粉塵中的質量分率相近。在可呼吸性粉塵粒徑範圍中 ( $4\mu\text{m}$  以下) TiO<sub>2</sub> 及 ZnO 奈米微粒逸散數目及質量濃度分佈如圖 21-圖 24 所示，可看出大多數的微粒均大於 100 nm 以上。100 nm 以下的 TiO<sub>2</sub> 及 ZnO 奈米微粒逸散量很少。結果顯示，不論是 TiO<sub>2</sub> 或 ZnO 的奈米粉體揚塵中均以聚集態的次微米微粒為主，100 nm 以下的奈米微粒數目濃度及質量濃度均很低。

表 10 TiO<sub>2</sub> 奈米粉體逸散實驗結果

可呼吸性粉塵 的質量分布比 例 (mg/kg-min)	胸腔區粉塵的 質量分布比例 (mg/kg-min)	可吸入性粉塵 的質量分布比例 (mg/kg-min)
15 ± 2	576 ± 37	6713 ± 546
低等揚塵等級	中等揚塵等級	高等揚塵等級

表 11 ZnO 奈米粉體逸散實驗結果

可呼吸性粉塵 的質量分布比 例 (mg/kg-min)	胸腔區粉塵的 質量分布比例 (mg/kg-min)	可吸入性粉塵 的質量分布比例 (mg/kg-min)
11 ± 0.3	72 ± 6	142 ± 20
低等揚塵等級	低等揚塵等級	極低等揚塵等級

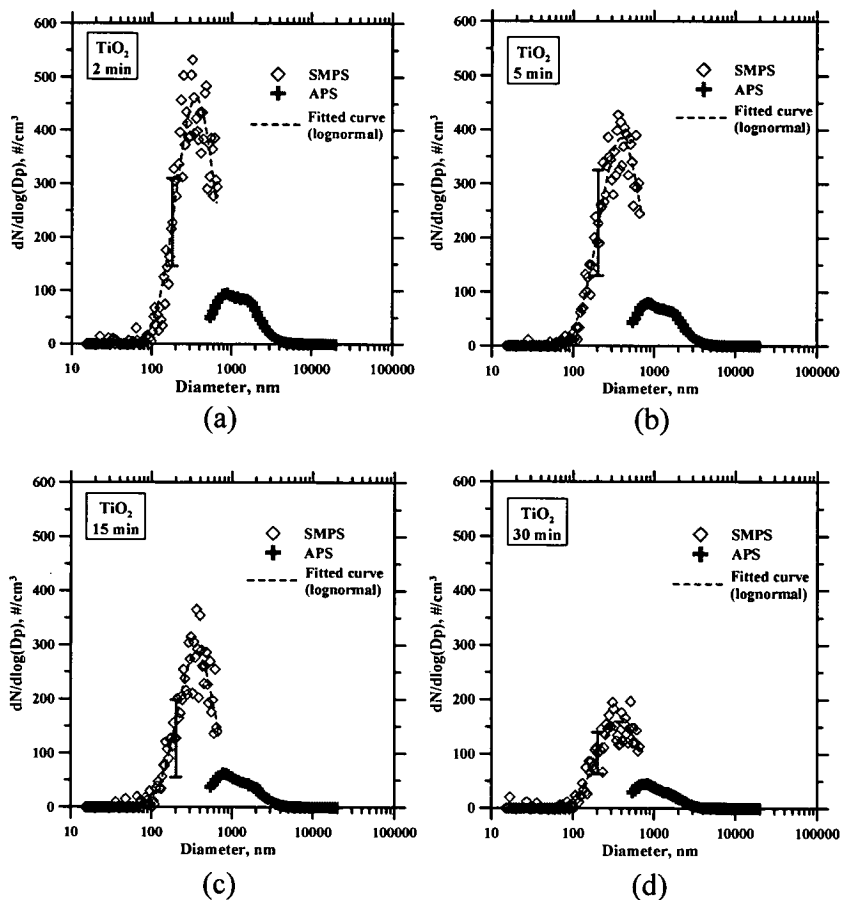


圖21 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，TiO<sub>2</sub>粉體在不同時間的逸散數目濃度分布圖。

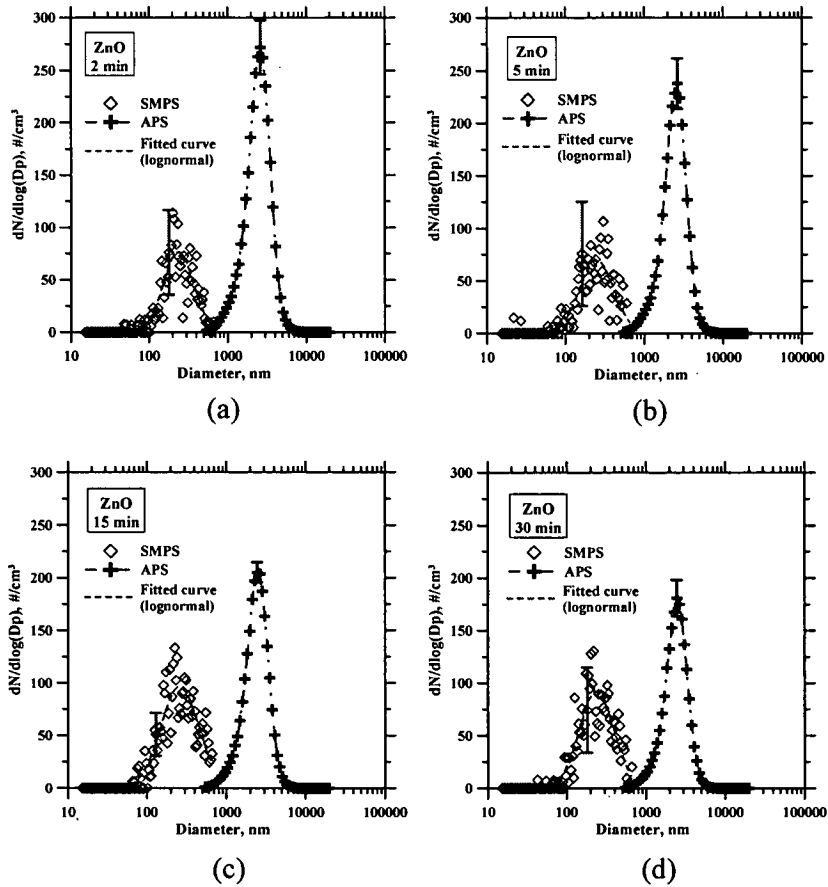


圖 22 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，ZnO 粉體在不同時間的逸散數目濃度分布圖。

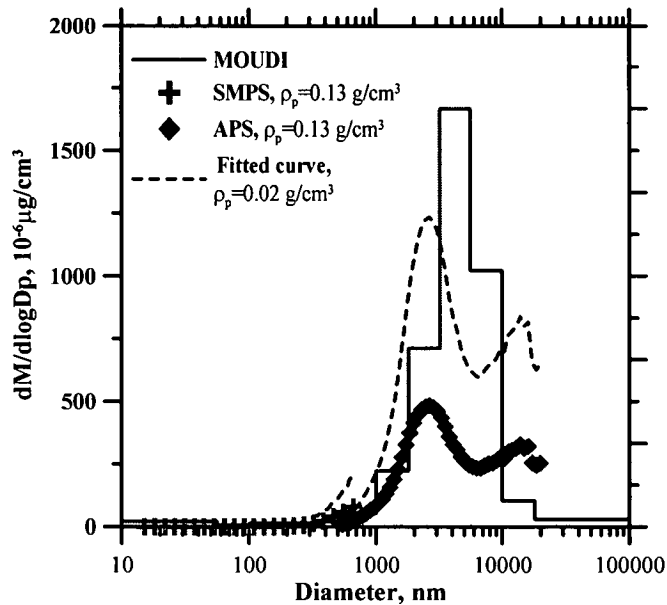


圖23 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，TiO<sub>2</sub>奈米微粒在30分鐘內逸散的平均質量濃度分布圖。

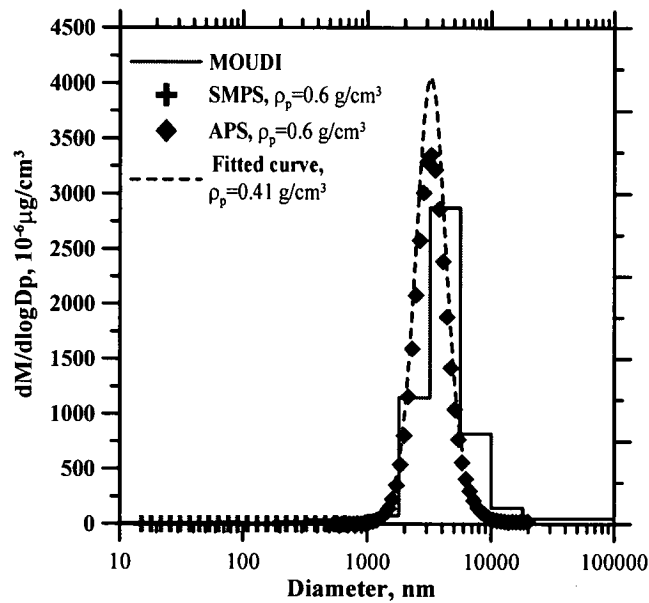


圖24 可呼吸性粉塵粒徑範圍下，ZnO微粒在30分鐘內逸散的平均質量濃度分布圖。

### 第三節 作業環境奈米微粒暴露測量

#### 壹 奈米微粒暴露監測及採樣設備

英國標準協會(British Standards Institution, BSI)整理出目前市面上常用的奈米微粒暴露監測及採樣設備，並以儀器量測到的微粒單位作為分類的依據，共分為：採樣器、質量濃度監測儀、數目濃度監測儀以及表面積濃度監測儀等四大類[11]。其中採樣器部分可分為個人採樣器以及固定點採樣器，個人採樣器的部份目前世界上尚無合適的奈米微粒個人採樣器，而定點採樣器部分目前主要被用來收集奈米微粒的採樣器是多階衝擊採樣器。能即時監測奈米微粒質量濃度的儀器為錐狀元件震動微量天平(TEOM, Tapered Element Oscillating Microbalance)監測器，入口需搭配一合適的奈米微粒分徑器，但目前尚未有此分徑器，若將來發展出來後，其他儀器如貝他計監測器(beta gauge)亦可用於奈米微粒濃度之即時監測；奈米微粒數目濃度監測儀有掃描式電動度粒徑分析儀(SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer)、快速電移動度粒徑分析儀(FMPS, Fast Mobility Particle Sizer)、光學顯微鏡雷射微粒計數器(OPC, Optical microscopes)以及(LPC, Laser particle counters)，其中 OPC 的最低量測的粒徑介於 100-300 nm 之間，不適合用

於監測奈米微粒，而 LPC 的偵測下限則可以低至 70nm；奈米微粒表面積分析儀有電子低壓衝擊器(ELPI, Electrical Low Pressure Impactor)以及奈米微粒表面積分析儀(NSAM, Nanoparticle Surface Area Monitor)，其中 ELPI 所量測到的表面積濃度可轉換為數目濃度，由於 ELPI 與 SMPS 均可以得到微粒數目濃度的資訊，且 ELPI 使用的是氣動直徑而 SMPS 使用的則是電移動度直徑，因此若能同時以 ELPI 以及 SMPS 進行奈米微粒濃度的監測，則可以在得到奈米微粒數目濃度以及表面積濃度的同時計算出奈米微粒的形狀係數。雖然依據儀器所偵測到的微粒濃度單位可將奈米微粒監測儀劃分為質量、數目以及表面積等三種種類，但是如果奈米微粒的有效密度以及形狀係數為已知，或為奈米微粒假設一個合理的有效密度以及形狀係數，則質量濃度、數目濃度以及表面積濃度之間的關係可以相互轉換。

為了清楚的了解各種儀器所能夠偵測到的粒徑範圍，本文參考 Marjamäki and Keskinen 中不同儀器與量測粒徑範圍之間的關係圖並加以修正而成圖 25[83]。由圖中可看出適合使用於量測奈米微粒的儀器有掃描式電動度粒徑分析儀(SMPS)、擴散器組加凝結微粒計數器(Diffusion batteries and Condensation Particle Counter, CPC)、微孔均勻沉降衝擊器(Multiple-Orifice Uniform Deposit Impactor, MOUDI)、電子低壓衝擊器(ELPI)、掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)與穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)。其中 SEM 與 TEM 主要用以觀測微粒的外觀，藉以了解微粒的幾何直徑、聚集的情況。擴散器組為利用微粒的擴散原理做成的儀器，可分為串聯式擴散器組(serial diffusion battery)與並聯式擴散器組(parallel flow diffusion battery)，需搭配 CPC 才可使用，但目前並不常用。SMPS 量測微粒數目濃度分布，由微分式電移動度分析儀(Differential Mobility Analyzer, DMA)與 CPC 組成，為目前世界上最常使用的環境奈米微粒即時監測系統[84]。衝擊器主要可分為低壓衝擊器(LPI, low pressure impactor)及微孔均勻沉降衝擊器，可以採集不同粒徑的奈米微粒，採集的樣本可以作後續的化學成份分析。目前最常使用的奈米微粒採樣器為電子低壓衝擊器(ELPI, Dekati Ltd., Finland)及多微孔均勻沉積衝擊器 (MOUDI, MSP Corporation, Minneapolis, MN)，後者使用的情形更為普遍。

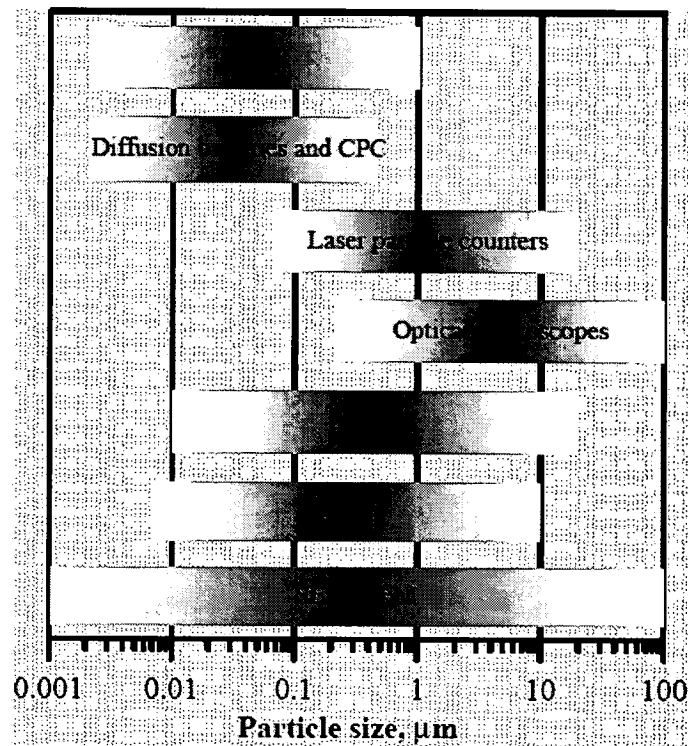


圖 25 不同的儀器所適用的粒徑範圍。SMPS—掃描式電動度粒徑分析儀，Diffusion batteries and CPC—擴散器組加凝結微粒計數器，Laser particle counters—雷射微粒計數器，Optical microscopes—光學顯微鏡，MOUDI—微孔均勻沉降衝擊器，ELPI—電子低壓衝擊器，SEM—掃描式電子顯微鏡，TEM—穿透式電子顯微鏡。

### (1). 奈米微粒的採樣

常用於收集不同粒徑奈米微粒的衝擊器主要可分為 LPI 及 MOUDI，可以量測奈米微粒的質量濃度分佈，其中以 MOUDI 最常被使用。Chow and Watson 將自 1972 年至今曾被使用以收集奈米微粒的 LPI 及 MOUDI 整理成一表格如表 12 所示，其中除 MOUDI 及 nano-MOUDI 外，均為 LPI [84]。

表 12 各式多階衝擊器及其截取直徑 [84]。

衝擊器	流量 (L/min)	衝擊 板 階 數	截取微粒 範圍 ( $\mu\text{m}$ )	可 截 取 奈 米 微 粒 的 階 數	奈米微粒 截取粒徑 (nm)
LPI	10 or 30	13	<0.03–10	5	30, 60, 108, 170
BLPI	30	8	0.034–11.3	4	34, 65, 94, 160
ELPI	10 or 30	13	0.007–10	4	30, 60, 108, 170
SDI	11	12	0.045–8.5	3	45, 90, 150
ALPI	22.2	12	0.056–9.5	2	56, 130
	20	12	0.06–11	2	60, 120
	24.2	11	0.11–11	1	110
	24.5	13	0.01–10.85	3	10, 50, 120
MOUDI	10 or 30	10	0.056–18	3	56, 100, 180
Nano-MOUDI	10 or 30	13	0.01–18	4	10, 18, 32, 56

操作 LPI 時，因為微粒在低壓的環境下被收集，因此可能在分析微粒的化學成分時低估揮發性物質的含量[85]，而 MOUDI 的壓力降較 LPI 低因此預期其揮發的問題較小。操作衝擊器時要注意乾微粒在收集板上反彈而被帶至下游階層的問題，衝擊板需要塗油以防止微粒反彈。Hering 等人設計了 LPI，每一階的衝擊板之前都有一個圓形的噴嘴，當流量為設計流量 10 L/min 時各階層的截取直徑分別為 0.05, 0.075, 0.11, 0.26, 0.50, 1.0, 2.0, and 4.0  $\mu\text{m}$ [86]。Hillamo 與 Kauppinen 曾使用 DOP 微粒對 BLPI (Bernier low pressure impactor) 進行效率測試[87]。ALPI (Andersen low pressure impactor) 與 BLPI 類似，均為多噴嘴的設計，有多種不同的設計。ELPI 量測範圍介於 30~10  $\mu\text{m}$  的儀器，其外觀與原理如圖 26 所示，王竹方曾經描述過此儀器[56]。ELPI 結合了氣膠電流計與 12 階的衝擊器，先以擴

散充電的方式使微粒帶電，再利用 12 階的衝擊器收集不同粒徑範圍的微粒，最後以靜電計測量收集板上的帶電量便可以得知微粒的表面積濃度。

若想要了解環境中微粒的數目濃度，可藉充電效率函數  $E_{ch}(d_a)$  將 ELPI 所量測到的電流訊號轉換為數目濃度，詳細的計算方法如下式：

$$N = \frac{I}{E_{ch}(d_a)} = \frac{I}{PneQ} \quad (1)$$

其中  $N$  為微粒的數目濃度,  $\#/m^3$ ； $I$  為 ELPI 所量測到的電流,  $A$ ； $P$  為充電器的穿透能力； $n$  為平均每顆微粒所攜帶的電子數； $e$  為單顆電子的帶電量,  $1.602E-19$   $C$ ； $Q$  為儀器的操作流量,  $m^3/sec$ 。

在使用 ELPI 計算微粒的粒徑分佈時，第  $i$  階所收集到的微粒其幾何中位數被定義為  $(d_i d_k)^{1/2}$ ，其中  $d_i$  為第  $i$  階的截取直徑；而  $d_k$  為  $i-1$  階(第  $i$  階上面一階)的截取直徑。而第  $i$  階的微粒數目濃度的計算方法如下式：

$$n_i = \frac{I_i}{E_{ch}(d_i)} \quad (2)$$

其中  $n_i$  為第  $i$  階的微粒數目濃度,  $\#/m^3$ ； $I_i$  為 ELPI 中第  $i$  階的所量測到的電流,  $A$ 。

若微粒的有效密度  $\rho_{eff}$ ,  $kg/m^3$  為已知，則可藉由下式的計算求得環境中微粒的質量濃度：

$$m_i = \rho_{eff} \frac{\pi}{6} d_i^3 n_i \quad (3)$$

在 Gulijk 等人的研究中指出使用 ELPI 的標準衝擊板測量引擎燃燒所排放出的微粒時，會因為微粒的負荷量超過衝擊板所能容許的負荷上限或是因微粒堆疊在衝擊板上，導致 ELPI 量測到錯誤的微粒數目濃度以及衝擊器分離出錯誤的微粒粒徑等問題[88]。為了防止這種錯誤的發生，必須使用 ELPI 的製造廠商(Dekati Ltd., Finland)所提供的浸油燒結衝擊板(Oil-soaked sintered impactor stages)，可以提高 ELPI 50 倍的微粒負荷量。標準衝擊板與浸油燒結衝擊板的截取直徑比較以及外觀分別如表 13 及圖 27 所示，其中浸油燒結衝擊板之截取氣動直徑較標準衝擊板小。



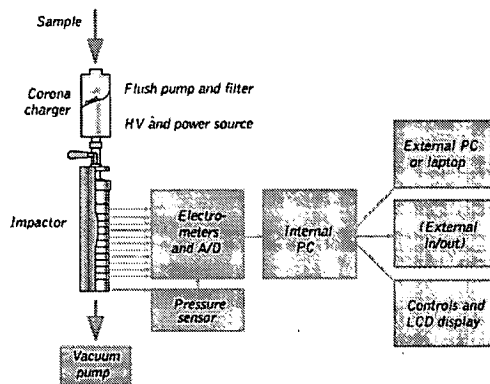
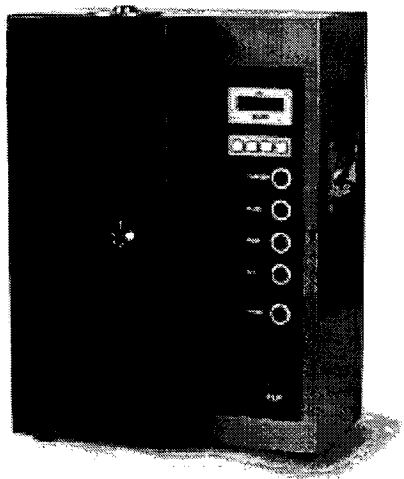


圖 26 ELPI 的實際照片及內部構造的示意圖[89]。

表 13 比較兩種不同的衝擊板(Standard configuration impactor, Sintered metal impactors impactor)各階層的截取直徑 [88]。

Stage number	Standard configuration impactor cut-off size/(nm)	Sintered metal impactors impactor cut-off size/(nm)
Pre-impactor	$10.3 \times 10^3$	$9.75 \times 10^3$
1	$6.79 \times 10^3$	$6.43 \times 10^3$
2	$4.03 \times 10^3$	$3.82 \times 10^3$
3	$2.49 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$
4	$1.63 \times 10^3$	$1.54 \times 10^3$
5	$1.01 \times 10^3$	956
6	647	612
7	399	333
8	259	210
9	169	106
10	105	56.0
11	60	32.9
12	30	25.3

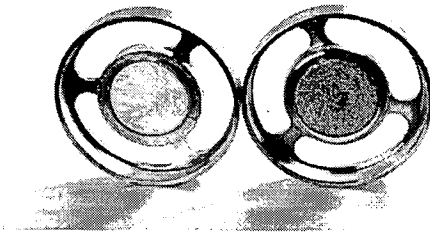


圖 27 兩種不同衝擊板(Standard configuration impactor stage, left; oil-soaked sintered impactor stage, right)的實際照片[88]。

圖 28 為 MOUDI 的實際照片及內部構造的示意圖。MOUDI 是一台串聯式的 10 階衝擊器，其將微粒分徑收集的原理是利用不同粒徑微粒有不同的慣性力來進行分徑，大的微粒因慣性力大，所以會衝擊在上面的衝擊板上，小的微粒則會隨著氣流轉向而到下一階衝擊器。利用不同噴嘴數目及大小來決定哪個粒徑以上的微粒會被收集，較上面階層的衝擊器噴嘴數目較少孔徑也較大。在設計流量 30 L/min 的操作條件下，可將懸浮微粒分徑為 18、10、5.6、3.2、1.8、1.0、0.56、0.32、0.18、0.10、0.056 及  $<0.056 \mu\text{m}$  (after filter)。

Nano-MOUDI-II Impactor 的原理及內部構造與 MOUDI 相同，其外觀如圖 2.3.5 所示，在設計流量 10 L/min 的操作條件下它比 MOUDI 多出 3 階截取氣動直徑為 32, 18 以及 10 nm 的衝擊器，因此能夠更有效的量測到奈米微粒的重量濃度分佈。

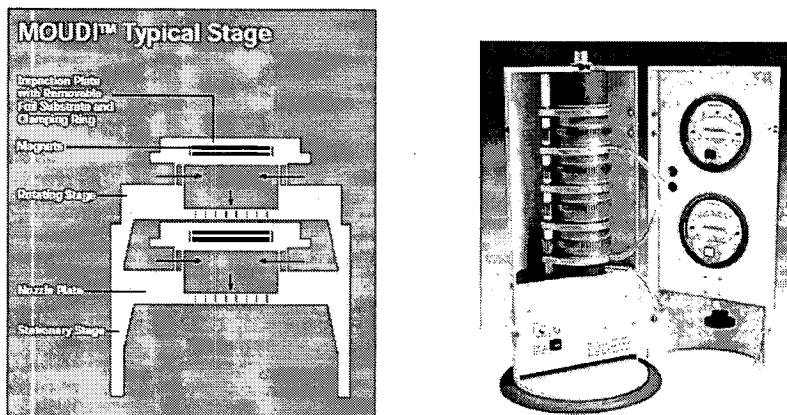
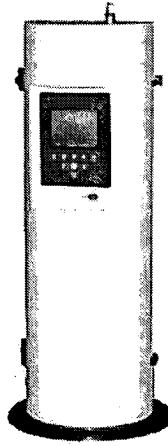


圖 28 MOUDI 的實際照片及內部構造的示意圖[90]。



M125

圖 29 Nano-MOUDI-II Impactor 的實際照片[91]。

由於使用低壓衝擊器與 MOUDI 收集奈米微粒時，因為儀器內的壓力遠低於大氣壓力，因此會造成揮發性物質因低壓而揮發，進而在後續的稱重以及分析試驗時低估奈米微粒的數量以及忽略了某些可能對人體造成重大影響的化學成分。Otani 等人設計了一個使用如圖 30 所示的衝擊器，以不鏽鋼濾材作為衝擊板，壓損為 28 kPa，比一般低壓衝擊器小，可降低因奈米微粒揮發而造成的採樣誤差。本採樣器可依流量不同(25-100 L/min)而截取不同粒徑之奈米微粒，同時可作  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$  以及  $PM_{0.1}$  之固定點採樣[85]。

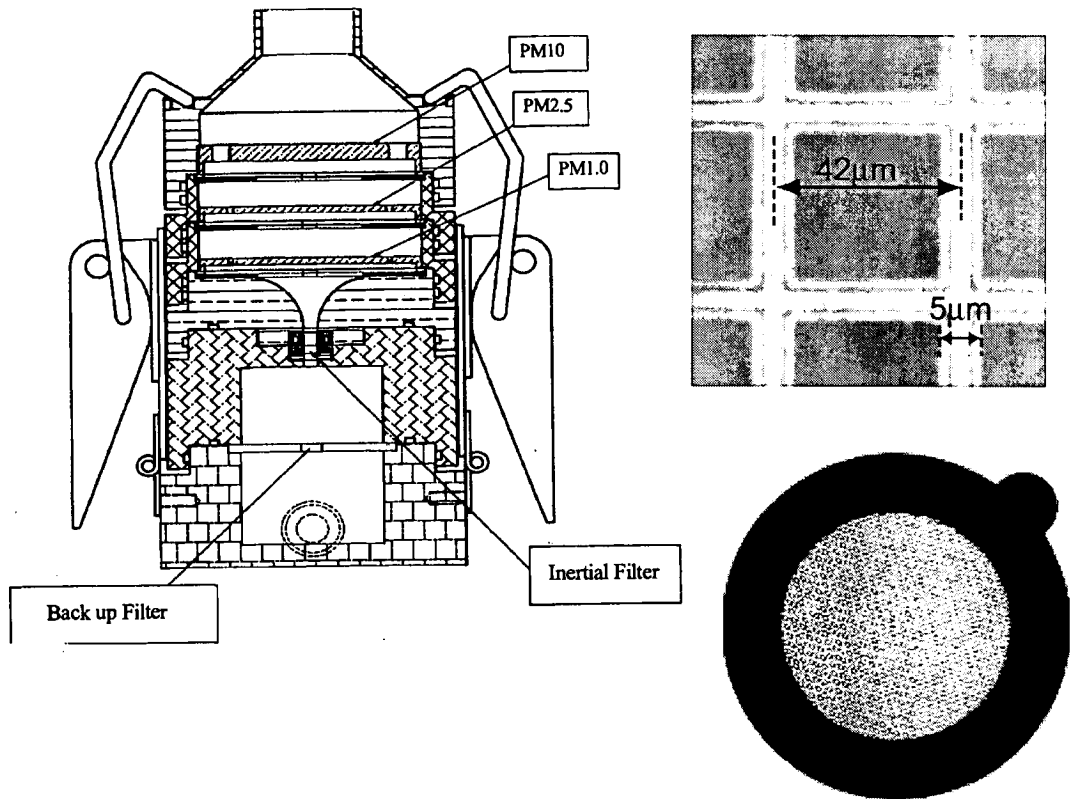


圖 30 Otani 等人所設計的奈米微粒採樣器以及使用不鏽鋼濾材作為衝擊板[85]。

上述的採樣器均為非即時的採樣器，若使用如圖 31 所示的 TEOM 搭配合適的奈米微粒分徑器不但可以即時監測到奈米微粒的質量濃度，也能利用收集到的微粒進行後續的化學分析，但目前尚無合適的奈米微粒分徑進口，若有的話常用的貝他計也可用於奈米微粒質量濃度之即時監測。

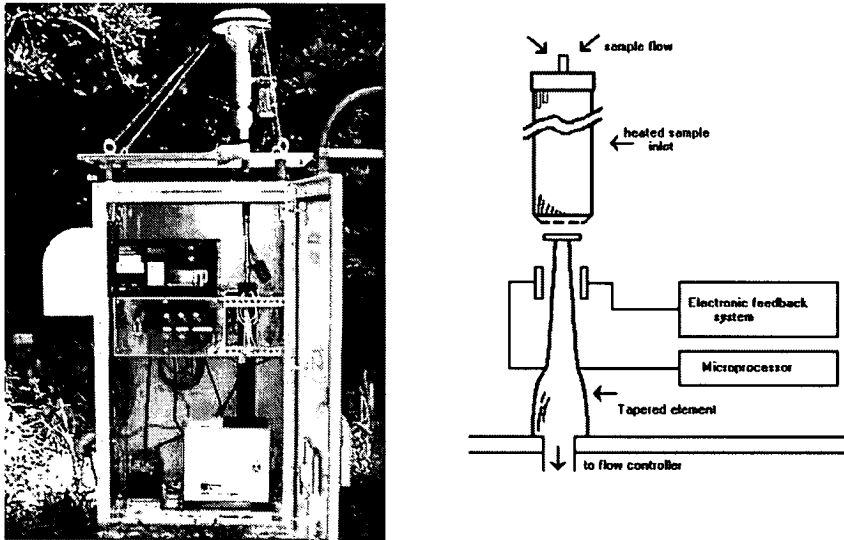


圖 31 TEOM 的外觀與內部構造圖[92]。

## (2). 即時奈米微粒粒徑分佈測量

CPC(Condensation Particle Counter, 核凝微粒計數器)常用於量測微粒數目總數目濃度的儀器，但無法測得奈米微粒的粒徑。CPC 的主要原理是將利用液體蒸氣包覆微粒，再使液體蒸氣因為過飽合而凝結成液體，此時微粒的外圍會附著一層液體而成長，最後再利用光偵測器來測得微粒的數目。目前的 CPC 根據液體使用種類的不同，主要可分為使用正丁醇的 CPC 與使用蒸餾水的 WCPC，其原理如圖 32 所示。一般 CPC 的偵測下限為 4~10 nm 之間，如手提式核凝微粒計數器(TSI 3007 CPC)的偵測下限為 10 nm，圖 33 為手提式核凝微粒計數器實體照片及構造示意圖。TSI 有兩款 Ultrafine CPC 的偵測下限可以到 2.5 nm。一般 CPC 與 Ultrafine CPC 的偵測效率如圖 34 所示。

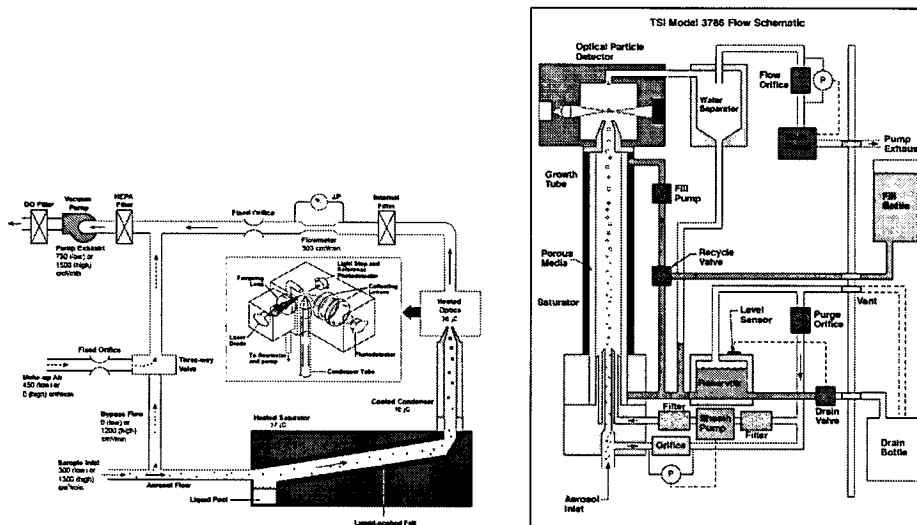


圖 32 使用正丁醇的 CPC(左圖)與使用蒸餾水的 WCPC(右圖)[93]。



圖 33 手提式核凝微粒計數器照片[94]。

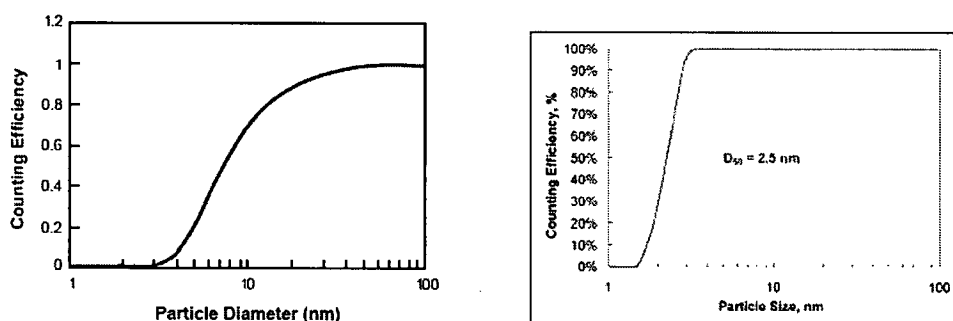


圖 34 一般 CPC 的偵測效率(左圖)與 Ultrafine CPC 的偵測效率(右圖)[95]。

SMPS 為結合 DMA 與核凝微粒計數器的儀器，可以即時測量奈米微粒的粒徑分佈，為目前研究奈米微粒之重要儀器，但是它無法採集奈米微粒以進行化學分析。圖 35 為掃描式微粒電動度分析儀 SMPS 的實際照片及構造示意圖。在進

入 SMPS 主體 DMA 之前，多徑微粒會先通過一慣性衝擊器去除 500 nm 以上的微粒，和一個靜電中和器使微粒帶電情形成波茲曼分佈。DMA 有兩種可替換，一種為尺寸較短、可用來量測 2-150 nm 的 Nano-DMA 如圖中所示；一種為較長、可用來量測 10-1000 nm 的 Long-DMA。帶電荷成波茲曼分佈的微粒進入 DMA 之後，因帶有電壓的 DMA 中心柱和不帶電的圓筒內壁形成一電場，此時帶有和中心柱相反電性、且電移動度剛好的微粒，就會從中心柱下方一小缺口被分離出來，分離出的微粒就成單徑分佈的微粒，接著單徑微粒被導入 CPC 來計算微粒的數目。從中心柱電壓大小可計算出微粒的粒徑，配合波茲曼分佈數據和 CPC 測到微粒的數目，可推算出此粒徑微粒進入 SMPS 之前的濃度，如果控制中心柱電壓隨時間而慢慢變大，則我們就可得到整個多徑微粒的濃度及粒徑分佈。此外，ELPI™為量測範圍介於 7~10 μm 的儀器，它結合了氣膠電流計與多階衝擊器，能夠對於微粒的粒徑分佈進行即時的量測，也可以將 ELPI™ 採集到的微粒進行後續分析、秤重。

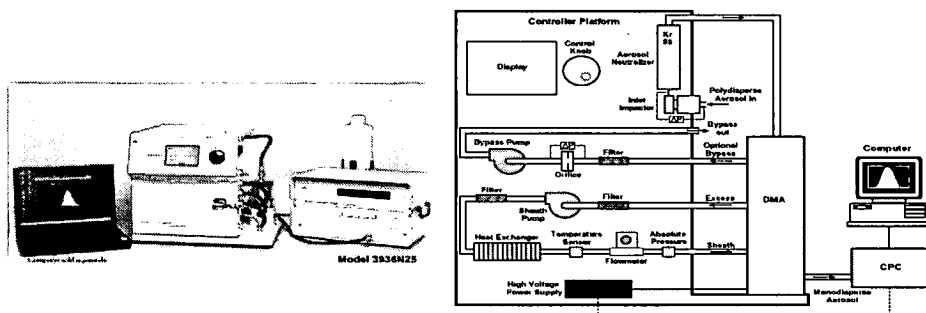


圖 35 掃描式微粒電動度分析儀 SMPS [96]。

有別於 SMPS 以 CPC 作為微粒計數器使用靜電中和器來控制微粒的帶電量；如圖 36 所示的 FMPS 使用擴散充電的方式來控制微粒的帶電量，並利用許多並連的靜電計作為微粒計數器，有效的降低了掃描微粒的粒徑範圍所需要的時間，能夠每秒得到一筆微粒粒徑分佈的資料，其粒徑範圍介於 5.6~560 nm。

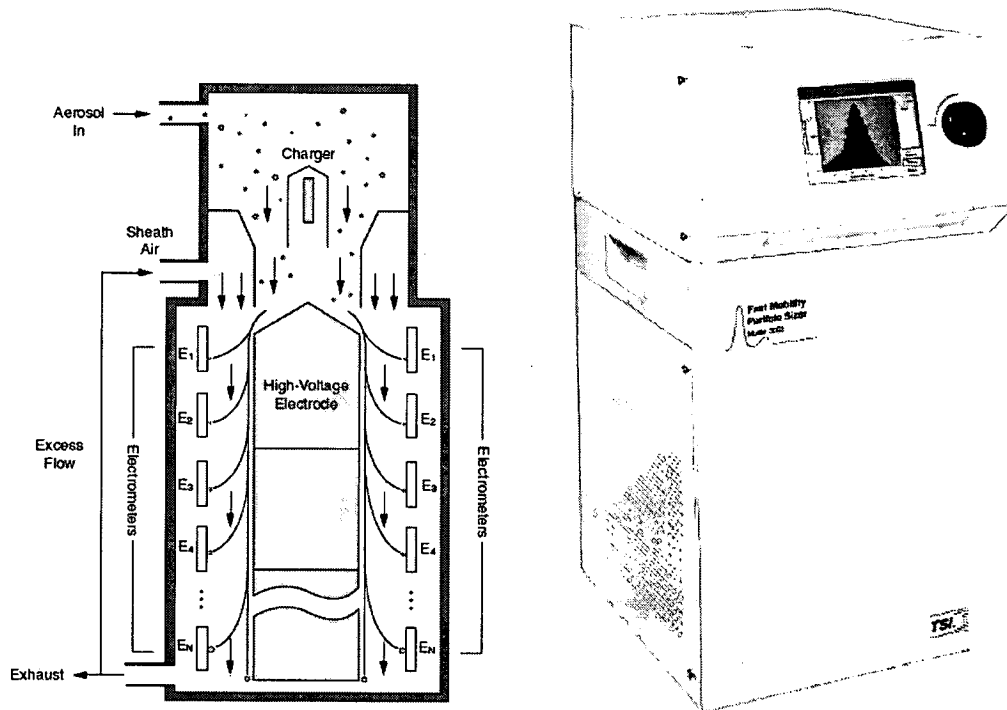


圖 36 快速微粒電動度粒徑分析儀 FMPS [97]。

### (3). 奈米微粒表面積測量

由於近年來的毒理學家指出奈米微粒的粒徑、表面積以及表面活性對人體健康所造成的影響較質量嚴重，因此越來越多的研究重點著重於奈米微粒的表面積濃度，目前能夠有效監測奈米微粒的表面積濃度的儀器有 TSI 公司所生產的奈米微粒表面積分析儀(NSAM, nanoparticle surface area monitor , TSI model 3550)以及 Ecochem 公司所生產的氣膠表面積分析儀(DC 2000 CE Diffusion Charger Sensor)，NSAM 的外觀以及內部構造圖如圖 37 所示，其原理為先在 NSAM 之前利用旋風集塵器去除 1 微米以上的微粒，接著使進入的奈米微粒均勻帶電，再利用電荷分離的原理使帶電後的奈米微粒被收集到靜電電流計，能夠監測到奈米微粒的表面積。奈米微粒表面積監測儀可作個人的奈米微粒暴露評估之用，但無法採集到微粒，無法得知微粒的重量濃度及成份。

在分析 NSAM 所得到的數據時要注意 NSAM 所量測到的並非總懸浮微粒的表面積濃度，而是沉積在胸腔區及肺泡區微粒的表面積濃度。



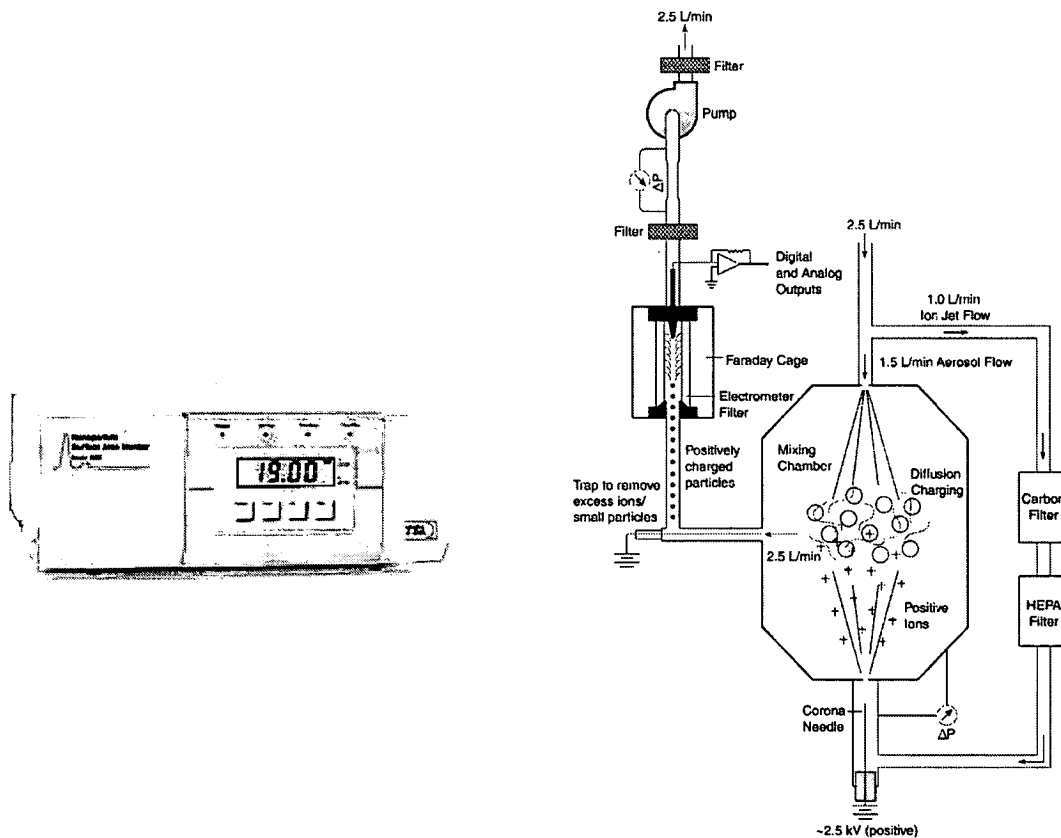


圖 37 奈米微粒表面積監測儀的外觀以及內部構造圖 [98]。

DC 2000 CE Diffusion Charger Sensor 的外觀與內部構造圖如圖 38 所示，該儀器先以擴散充電的方式讓微粒附著上正電荷，當帶電微粒被收集到濾紙上時再利用靜電計偵測其帶電量。

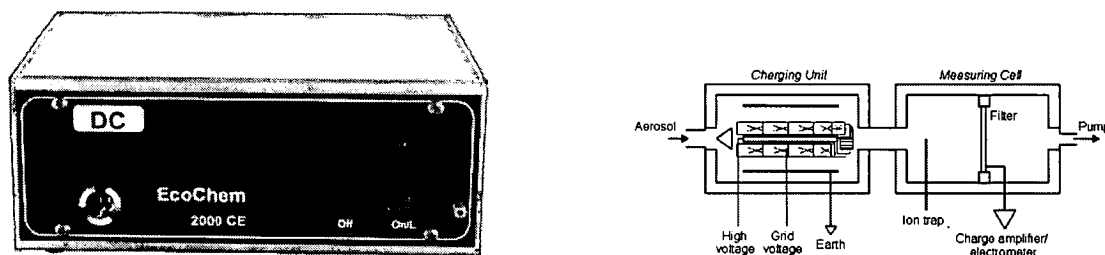


圖 38 DC 2000 CE Diffusion Charger Sensor 的外觀與內部構造 [99]。

#### (4). 個人暴露量測

個人奈米微粒的暴露來源除了來自於大氣之外，特定的工作場所也會產生相當高濃度的奈米微粒，因而影響作業人員的健康。然而目前並無適當的奈米微粒

個人採樣器可以量測個人的奈米微粒暴露。現階段在工作場所量測  $\text{TiO}_2$  細微粒 ( $< 4 \mu\text{m}$ )的個人標準採樣方法是使用  $4\text{-}\mu\text{m}$  截取氣動直徑的旋風器(如 10-mm 尼龍旋風器)及後端濾紙(NIOSH Method 0600)，但在超細微粒方面尚無標準的採樣方法。決定  $\text{TiO}_2$  是否會超過 REL 值時可利用 TEM 搭配能量分散式 X 光分析儀 (EDXA, energy dispersive X-ray analyzer)，觀察濾紙樣本中細微粒、奈米微粒的比例再加以推估。另一個分析濾紙中的 Ti 含量的方法為感應耦合式電漿(ICP, induced coupled plasma, NIOSH 7300)，但是它只能推估出細  $\text{TiO}_2$  的濃度，無法分析出奈米  $\text{TiO}_2$  的濃度。目前對於工作場所個人奈米微粒的暴露評估，多使用 MOUDI、LPI...等儀器於固定點採樣後再搭配工作人員的時間行為模式來推估出個人奈米微粒的暴露量，然而 Misra 等人指出因為不同區域的污染物濃度不同，再加上個人的行為模式會影響其暴露的濃度量，因此用定點採樣所得到的暴露值來代表個人的暴露值並不恰當[100]。

為了直接評估工作人員在作業場所時的個人奈米微粒暴露量，本研究室於 2007 年設計了一個三階個人奈米微粒採樣器，如圖 39 所示。採樣器包括第一階為 IOSH 旋風集塵器，以分離可呼吸性微粒，第二階為有效過濾直徑 10 mm 的 PCTE 薄膜，其前端加裝一直徑為 1 mm 的加速噴嘴以產生局部的高速過濾速度以分離奈米微粒，第三階為終端濾紙作為收集奈米微粒之用。

使用孔隙為  $20 \mu\text{m}$  的 PCTE 薄膜進行實驗後發現當流量為  $5.3 \text{ L/min}$ 、噴嘴流速為  $112.47 \text{ m/sec}$  時(壓損為  $110\pm 10 \text{ cm H}_2\text{O}$ )，對於粒徑大小為  $101.05 \text{ nm}$  微粒的收集效率會落在  $49.02\pm 7.33 \%$ 之間，如圖 40 所示，接近  $100 \text{ nm}$  截取直徑的要求。在此流量下的奈米微粒收集效率曲線也發現是陡峭的，因此本採樣器能夠有效的分離出奈米微粒並加以收集。

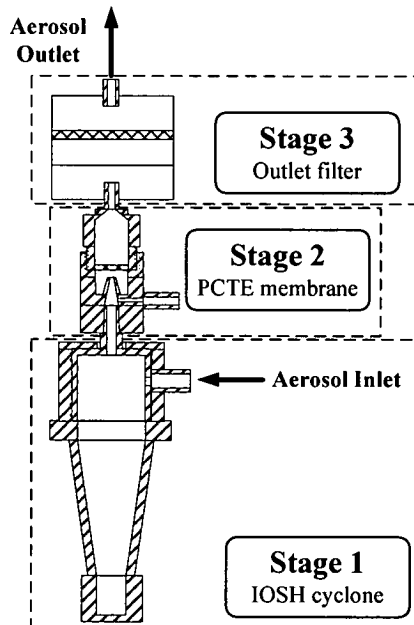


圖 39 2007 年設計的奈米微粒個人採樣器。

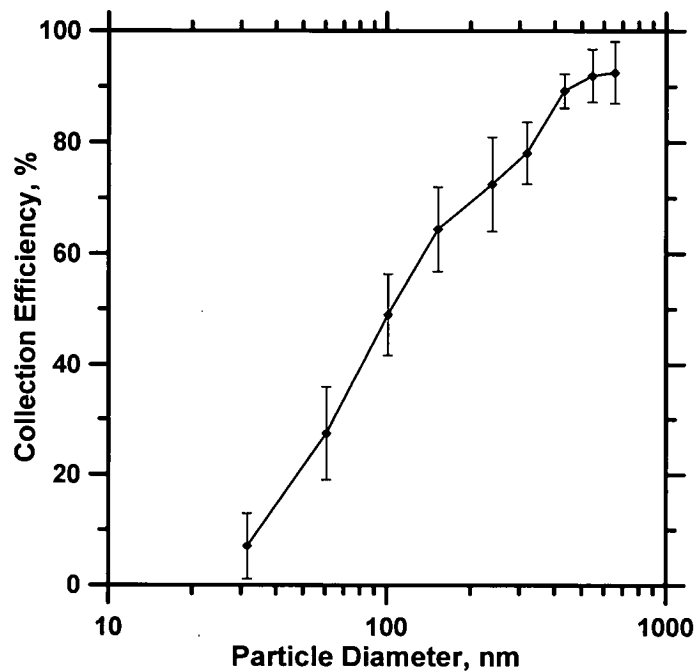


圖 40 PCTE 薄膜孔隙直徑為  $20\ \mu\text{m}$  的採樣器在  $5.3\ \text{L}/\text{min}$  下的收集效率曲線，截取直徑為  $104\ \text{nm}$ 。

### (5). 奈米微粒分析方法

除了奈米微粒的粒徑、表面積以及表面活性之外，不同化學成分的奈米微粒對人體健康所產生的影響也不同[101]，因此分析奈米微粒的化學成分也是一項重要的工作。目前較常用的奈米微粒分析方法，包括(i)重量分析方法；(ii)元素分析方法含 X-ray 螢光法(XRF, X-ray Fluorescence)，質子誘發 X-射線法(PIXE,

Proton Induced X-ray Emission), 儀器中子活化法(INAA, Instrumental Neutron Activation Analysis), 原子吸收光譜儀(AAS, Atomic Absorption Spectrometry), 感應耦合電漿原子放射光譜儀(ICP/AES, Inductively-coupled Plasma with Atomic Emission Spectroscopy) and 感應耦合電漿質譜儀(ICP/MS, Inductively-coupled Plasma with Mass Spectrometry); (iii) IC(Ion Chromatograph)離子層析儀分析離子的方法; (iv)加熱/光學法 Thermal/Optical method) 分析有機碳(OC, Organic Carbon)及元素碳(EC, Elemental Carbon)的方法。奈米氣膠中有機成份的進一步分析則使用溶劑萃取(SE, Solvent Extraction)或熱脫附(TD, Thermal Desorption)加上氣相層析質譜儀(GC/MS, Gas Chromatography with MS)。

使用 SEM 或 TEM 可以分析出單一奈米氣膠的形貌、大小及顏色等特性，若要同時分析微粒的化學成分則可利用 SEM 或 TEM 搭配能量分散式 X 光分析儀(EDXA)[84]，然而在使用 EDXA 分析微粒的化學成分時無法使用於小於 1  $\mu\text{m}$  的微粒。雖然目前已發展出能觀察到粒徑小於 1 nm 微粒的 STEM，然而由於限制於 X 光的投影面積，因此還是無法使用 EDXA 來分析小微粒的化學成分。由於 TEM 在使用時會以強烈的電子束撞擊樣品，使樣品產生能量上的損失，由於此能量損失與樣品本身的化學成分有關，因此科學家們利用測量此能量損失的情況設計出電子能量損失譜儀(EELS, Electron Energy Loss Spectroscopy)，使用 EELS 可以分析出 2 nm 以下奈米微粒的化學成分，是一種理想的奈米微粒化學成分分析儀。

#### (6). 即時奈米微粒分析方法

隨著計算與光學技術上的突破，近 15 年來已開發出能夠即時分析微粒化學成分的氣膠質譜儀(AMS, Aerosol Mass Spectrometry)(ISO/TR 27628: 2007)，通常這一類的儀器可以分為四個階段：首先去除氣體以形成微粒束，其次利用 TOF(Time-of-Flight, 飛行時間)的方式量測微粒的速度以判斷出其氣動直徑，再其次為將待測的微粒利用雷射光將其蒸發並離子化，最後使用質譜儀分析出離子的化學成分。由於 AMS 可偵測到的濃度下限會隨著微粒粒徑的下降而上升，再考慮到小微粒容易因損失於 AMS 內，因此傳統的 AMS 通常被使用於分析 100 nm 以上的微粒。

爲了改善 AMS 不適用於奈米微粒的缺點，美國 TSI 公司結合了氣膠飛行時間質譜儀(ATOFMS, Aerosol Time-of-Flight Mass Spectrometers)與氣動聚焦攝影技術(AFLT, Aerodynamic Focusing Lens Technology)，成功的將 AMS 的偵測下限降低至 30 nm，如圖 41 所示。

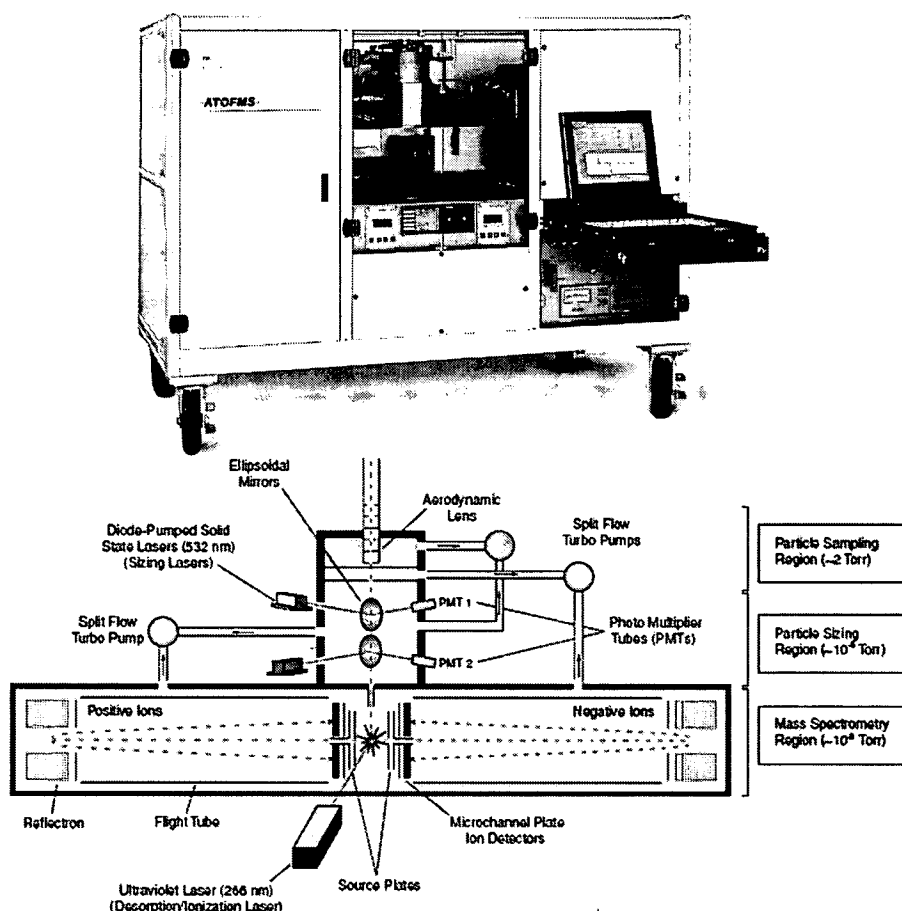


圖 41 ATOFMS 的實際照片及內部構造的示意圖[102]。

目前的奈米微粒的採樣及監測儀器以固定點採樣爲主，尚無合適的奈米微粒個人採樣器，全世界目前均積極在發展當中。現階段奈米微粒相關暴露數據相當不足，無法正確地評估出勞工的奈米微粒暴露對職業健康的影響。奈米微粒的粒徑分佈及暴露濃度與工作項目的關係是相當重要的資訊，這些數據應與流行病學的數據結合，才能研究出個人奈米微粒暴露量對於健康的影響，也是全世界職業衛生科學家共同努力的目標。

## 貳 作業環境奈米微粒暴露濃度評估

作業環境的奈米微粒暴露濃度評估大部分以定點固定式的測量方式為主。Kuhlbusch 和 Fissan 曾於三個不同碳黑廠(Carbon black)之不同工作場所測量原始粒徑為<10 nm~500 nm 之碳黑微粒之逸散濃度，結果發現小於 500 nm 氣動直徑之微粒很少，只有在使用柴油堆高機之工作場所才有許多<100 nm 之超細微粒存在，在粉體包裝區則有粗微粒濃度之增加[103]。Mohlmann 發表 BGIA (德國勞工安全衛生研究所)在不同工作場所的奈米微粒粒徑分佈及濃度測量結果。研究發現雷射光柱焊接，PVC 紙之熱空氣熔接，以及鎢金屬—惰性氣體焊接等作業之奈米微粒濃度較高。本項研究所使用的及時微粒監測儀器很多，包括 Dekati 電氣低壓衝擊器(ELPI, electrical low pressure impactor)、SMPS、多階衝擊器等[104]。Peters 和 Heitbrink 曾在一個柴油引擎工廠的加工及組裝區進行全區域及時的濃度與粒徑分佈測量，並製作成空間濃度分佈圖。結果發現於冬天時，由於使用氣體燃燒加熱器而產生大量的奈米微粒，以 condensation particle counter 測得之濃度大於 1,000,000 p/cc [105]。此外，D'Arcy 等人在汽車工廠的 15 個工作場所進行微粒質量、表面積及數目濃度之分佈測量，使用之儀器為 APS(氣動直徑測定儀)、SMPS、MOUDI、P-trak(TSI 公司，類似手提式 CPC)等，研究結果發現不同車體焊接和鋁件模具鑄造(die cast)之奈米微粒(<100 nm)及細微粒(<1 μm)之微粒濃度最高，不同工作場所中，奈米微粒(<100 nm)質量濃度為 0.02~0.1 mg/m<sup>3</sup>，而總質量為 0.08~1.1 mg/m<sup>3</sup>(VMD=440~10,000 nm)；沈積於呼吸系統之次微米濃度為 0.007~0.058 mg/m<sup>3</sup>，微粒數目濃度為 9,000~380,000 1/cm<sup>3</sup>間(NMD=42~160 nm)，表面積濃度為 460~12,000 μm<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>(SMD=130~490nm) [106]。蔡春進等人於鉛粉廠與鑄造廠進行 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 與奈米微粒的濃度測量，測量結果發現鉛粉廠 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 的關係式為  $PM_{2.5} = 0.6 \times PM_{10} + 14.63$ ，100 nm 以下奈米微粒數目濃度約介於  $7.76 \times 10^3 \text{ \#/cm}^3$  至  $4.65 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ ，平均濃度約為  $1.78 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。鑄造廠 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>2.5</sub> 的關係式為  $PM_{2.5} = 0.65 \times PM_{10} + 63.71$ ，100 nm 以下奈米微粒數目濃度約介於  $2.31 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$  至  $2.96 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ ，平均濃度約為  $9.21 \times 10^4 \text{ \#/cm}^3$ 。鑄造廠 PM<sub>10</sub> 與 PM<sub>0.1</sub> 的關係式為  $PM_{0.1} = 0.03 \times PM_{10} + 4.88$ ，可見 PM<sub>10</sub> 與 100nm 以下的奈米微粒重量濃度具有一定的正關係性[107]。

近來，Hsu 和 Chein 利用模擬箱進行二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)粉體塗敷介質的奈米微粒排放實驗。研究結果顯示，在模擬過程中，二氧化鈦塗敷在磁磚表面的奈米微粒排放率高於二氧化鈦塗敷在木材或聚合物表面的奈米微粒排放率，對於 55 nm 的奈米微粒而言，磁磚表面的排放率為 22 #/cm<sup>3</sup>。此外，利用 UV 光照射已塗敷二氧化鈦的不同物質表面，會增加粒徑小於 200 nm 的奈米微粒排放率。因此，研究中建議須要對塗敷奈米粉體的產品進行奈米微粒排放評估[108]。Lee 等人在焊接進行中的作業環境中，測量不同通風型態下岡亭內的奈米微粒粒徑分佈。研究結果顯示，當岡亭採用上部通風導管時，在焊接過程中接近焊接作業人員面罩附近的微粒數目濃度為  $7.78 \times 10^5$  particles cm<sup>-3</sup>，幾何平均粒徑為 181 nm，幾何標準偏差為 1.8。然而，利用下部通風導管時，在接近焊接作業人員面罩附近的微粒數目濃度下降為  $1.48 \times 10^4$  particles cm<sup>-3</sup>[24]。

在從事機械生產的工人常會暴露在多種的職業疾病的風險下，如聽力損失、呼吸道疾病等，其中呼吸道疾病與金屬加工潤滑劑(MWF)液滴有很大的相關性。在1998年，美國NIOSH建議MWF液滴的時量平均值為0.4 mg/m<sup>3</sup>，對此汽車製造業者將朝著近乎完全圍封機械作業區的方向進行以控制液滴的暴露風險。最近流行病學及毒理學研究顯示奈米微粒會對人體的呼吸道及肺部產生健康上的危害[109-111]，非溶解性微粒對人體所造成的健康危害主要是與微粒的數目濃度及[112,113]表面積濃度有關[114]，雖然在大部分的機械作業過程中被認為會產生大於1μm的微粒，但是仍有可能會產生次微米及奈米等級的微粒，在許多機械作業中常涉及到熱有關的處理過程，如高速機械[115]、熱處理[116]、研磨、焊接[117]等，在這作業過程中將會產生小於1μm的微粒，所以在工作場所中的奈米微粒暴露性評估要審慎且明確地進行，以確保工作人員的健康。

Peters 等人在某一引擎加工和裝配廠利用即時監測儀器評估細微粒和超細微粒在工廠裡的濃度分佈情形，此工廠主要分成三大區，分別為凸輪曲軸區、引擎本體-引擎蓋-連桿區和裝配區，此研究所使用的量測儀器有 CPC(核凝微粒計數器)、OPC(光學微粒計數器)、DC(擴散充電表面積監測器)和 DustTrak(氣膠光度計)，其中 CPC 為量測微粒粒徑從 0.01~1μm 的數目濃度，OPC 主要量測微粒粒徑從 0.3~20μm 的數目濃度。量測情形為冬天(2004 年 12 月)裡共量測四次，其

中這四次量測集中在一個禮拜內的四天進行，另外一次在春天(2005年3月)進行量測，採樣結果可比較這三區在冬天與春天的數目濃度與質量濃度分布情形 [105]。

研究結果顯示，在冬天時引擎本體-引擎蓋-連桿區的數目濃度最高(濃度為  $831000 \text{ \#/cm}^3$ )，主要原因為直燃式加熱器用來加熱此區的溫度且大門會關閉，造成此區的超細微粒數目微粒明顯高於其他作業區(如表 14 所示)。另外藉由量測位置較多的細格點與較少的粗格點的量測方式來評估數據空間解析度的適當性，圖 42(A)~(C)與圖 43(A)~(C)為粗格點，量測點數在 59~102 個之間；圖 42(D)與圖 43(D)為細格點量測點數為 192 個。結果為在微粒數目濃度量測上細格點量測只比粗格點量測提供多一點量測資料，所以在微粒數目濃度分布圖上看不出細格點和粗格點量測有差異性。由結果可知，可知在冬天時凸輪曲軸區的可呼吸性微粒的質量濃度為最高(濃度為  $0.180 \text{ mg/m}^3$ )，主要原因是高速機械和熱處理過程會產生大量的金屬加工潤滑劑霧滴，金屬加工潤滑劑霧滴的形成機制可分成蒸發-核凝、離心力和衝擊三種，其中離心力和衝擊主要產生大於  $1\mu\text{m}$  的液滴，而蒸發-核凝為金屬加工潤滑劑在高溫金屬表面上蒸發後核凝產生大量的次微米霧滴，所以導致此區的可呼吸性微粒的重量濃度高於其他作業區。在空間解析度上可看出細格點比粗格點量測提供了更詳細的質量濃度分佈圖，所以可知在微粒質量濃度分布上選用越細的格點量測，就能呈現越精確的質量濃度分佈圖。

此外，由在春天實驗結果可知凸輪曲軸區的微粒數目濃度和可呼吸性微粒的質量濃度都是最高(濃度分別為  $290000 \text{ \#/cm}^3$  和  $0.196 \text{ mg/m}^3$ )，主要原因為高速機械和熱處理過程產生大量的次微米霧滴。在引擎本體-引擎蓋-連桿區的微粒數目濃度比在冬天時小 4.8 倍，主要原因為在春天時此區的直燃式加熱器會關閉且大門會開放，因此對流效應會增加導致此區的微粒數目濃度會下降。此外，在裝配區的氣體加熱器用來加熱此作業區的溫度，但是由表一可知裝配區的微粒的數目濃度在冬天和春天都是呈現偏低，會造成此差異可能是因為與引擎本體-引擎蓋-連桿區的加熱器燃燒技術或是氣流的流動形式不同的緣故所造成。



表 14 採樣的微粒濃度 [105]。

Data set	Number concentration		Respirable mass concentration	
	<i>n</i>	GM (GSD) particle cm <sup>-3</sup>	<i>n</i>	GM (GSD) mg m <sup>-3</sup>
<b>Winter</b>				
Assembly	64	318 000 (1.71)	64	0.015 (2.06)
Block-head-rod	183	831 000 (2.01)	178	0.036 (1.93)
Cam-crank	170	318 000 (2.04)	150	0.180 (2.39)
All	417	484 000 (2.29)	392	0.057 (3.37)
<b>Spring</b>				
Assembly	19	143 000 (1.41)	19	0.022 (1.87)
Block-head-rod	38	172 000 (1.72)	38	0.056 (2.20)
Cam-crank	35	290 000 (1.28)	35	0.196 (1.80)
All	92	202 000 (1.65)	92	0.074 (2.94)

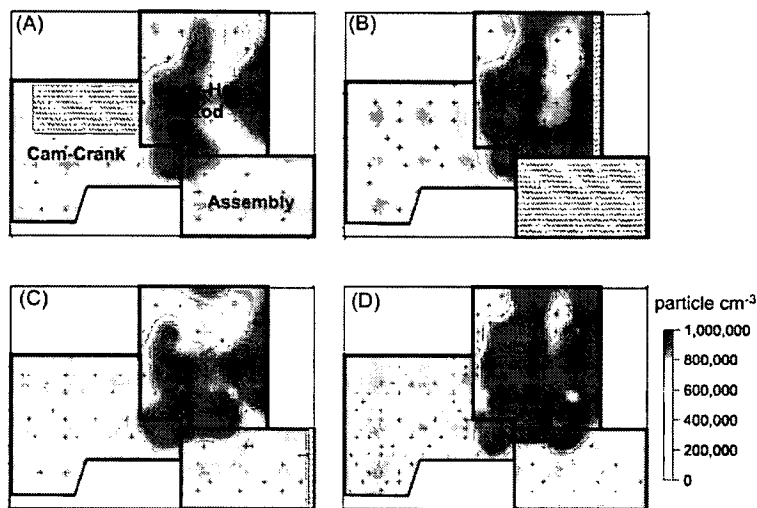


圖 42 冬天時的數目濃度分佈圖(A)粗格點 1；(B)粗格點 2；(C)粗格點 3；(D)細格點 [105]。

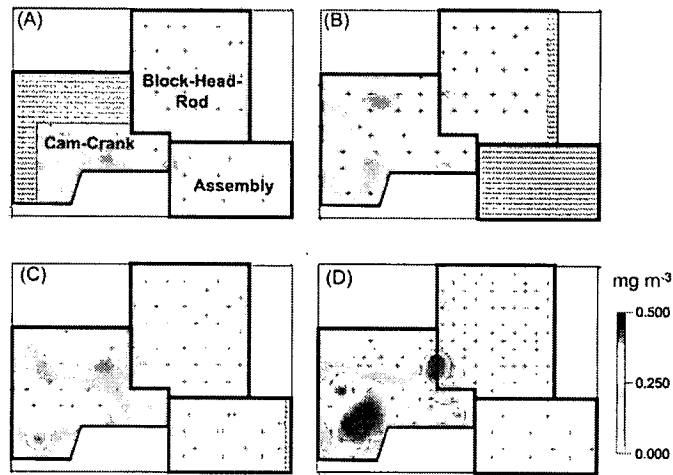


圖 43 冬天時可吸入性微粒的質量濃度分佈圖(A)粗格點 1；(B)粗格點 2；(C)粗格點 3；(D)細格點 [105]。

由表 14 和圖 44 可知在春天時可知凸輪曲軸區的微粒數目濃度和可呼吸性微粒的質量濃度都是最高(濃度分別為  $290000 \text{ \#/cm}^3$  和  $0.196 \text{ mg/m}^3$ )，主要原因為高速機械和熱處理過程產生大量的次微米霧滴。在引擎本體-引擎蓋-連桿區的微粒數目濃度比在冬天時小 4.8 倍，主要原因為在春天時此區的直燃式加熱器會關閉且門會開放，因此對流效應會增加導致此區的微粒數目濃度會下降。此外，在裝配區的氣體加熱器用來加熱此作業區的溫度，但是由表一可知裝配區的微粒的數目濃度在冬天和春天都是呈現偏低，會造成此差異可能是因為與引擎本體-引擎蓋-連桿區的加熱器燃燒技術或是氣流的流動形式不同的緣故所造成。

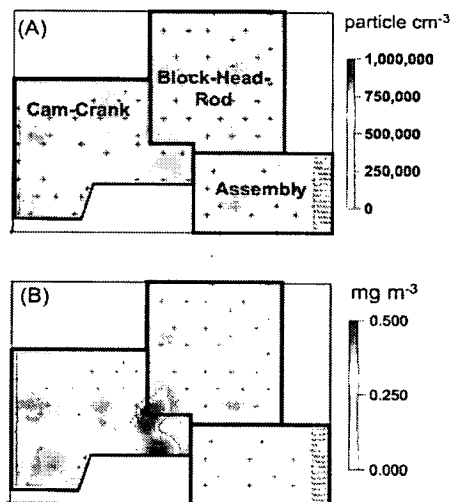


圖 44 春天時的濃度分佈圖：(A)數目濃度；(B)可吸入性微粒的質量濃度[105]。

另外，Heitbrink 等人在 2005 年夏天和冬天又在此工廠進行微粒濃度量測，這次量測儀器多了採樣儀器(PM<sub>2.5</sub> 採樣器和可呼吸性微粒採樣器)，量測項目多了微粒污染源的粒徑分佈量測和供給空氣採樣，其中使用採樣儀器主要爲了比對即時監測儀器的量測結果[118]。在微粒污染源的粒徑分佈量測上利用 ELPI(電子低壓衝擊器)作即時粒徑分佈的量測，ELPI 的粒徑量測範圍爲 0.07~10 μm，爲了防止在衝級版上微粒彈跳，作者在衝擊板上塗敷一層油以減少量測誤差。OPC 所量測的微粒數目濃度換算至質量濃度後再與採樣儀器所量測的微粒質量濃度進行比較，發現經由 OPC 所推估的重量濃度都較採樣儀器所量測的質量濃度低，如表 15 所示其比例在可呼吸性微粒和 PM<sub>2.5</sub> 分別爲 0.66 和 0.62

表 15 OPC 所推估的質量濃度與採樣儀器量測的質量濃度之比較 [118]。

Statistic	Respirable	PM <sub>2.5</sub>
Geometric mean ratio	0.66	0.62
Geometric standard deviation	1.52	1.35
Number (n)	11	10
Upper 95% confidence limit on geometric mean ratio	0.93	0.80
Lower 95% confidence limit on geometric mean ratio	0.47	0.48
Probability of larger deviation from normality (Shapiro- Wilk)	0.51	0.81

如圖 45 和表 16 所示在微粒濃度分佈上發現在夏天時在凸輪曲軸區的超細微粒數目濃度最高(84000 #/cm<sup>3</sup>)，主要原因爲高速機械和熱處理過程有關，冬天時在引擎本體-引擎蓋-連桿區的超細微粒的數目濃度最高(750000 #/cm<sup>3</sup>)，主要原因與直燃式天然氣加熱器有關，從數目濃度分佈圖上可看出受季節和作業區的影響很大，這顯示廠內超細微粒的數目濃度會隨季節、作業區改變而產生很大的變化。

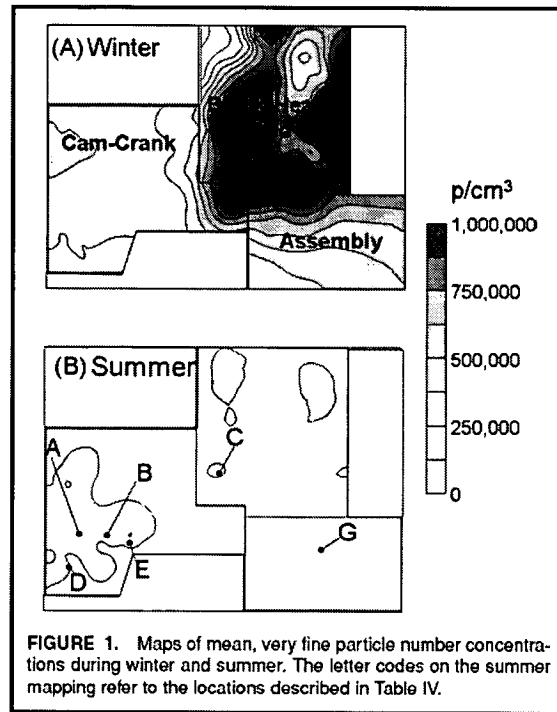


圖 45 2005 年夏天及冬天超細微粒的數目濃度分佈圖 [118]。

表 16 2005 年夏天及冬天各作業區超細微粒的幾何平均數目濃度 [118]。

Area of Plant	Winter		Summer	
	Geometric Mean (GSD) Particles/cm <sup>3</sup>	Grouping Code	Geometric Mean (GSD) Particles/cm <sup>3</sup>	Grouping Code
CC	$3.0 \times 10^5$ (1.56)	B	$0.84 \times 10^5$ (1.95)	A
BHR	$7.5 \times 10^5$ (1.23)	A	$0.78 \times 10^5$ (2.16)	A
Assembly	$4.4 \times 10^5$ (1.24)	B	$0.29 \times 10^5$ (1.92)	A

如圖 46 和表 17 所示，在夏天和冬天時凸輪曲軸區的可呼吸性微粒的質量濃度都是最高(分別為  $0.15 \text{ mg/m}^3$  和  $0.12 \text{ mg/m}^3$ )，主要原因為高速機械和熱處理過程有關。從質量濃度分佈圖看出隨季節性的變化不像數目濃度分佈圖那麼明顯，這顯示可呼吸性微粒在廠內的重量濃度不隨季節性變化

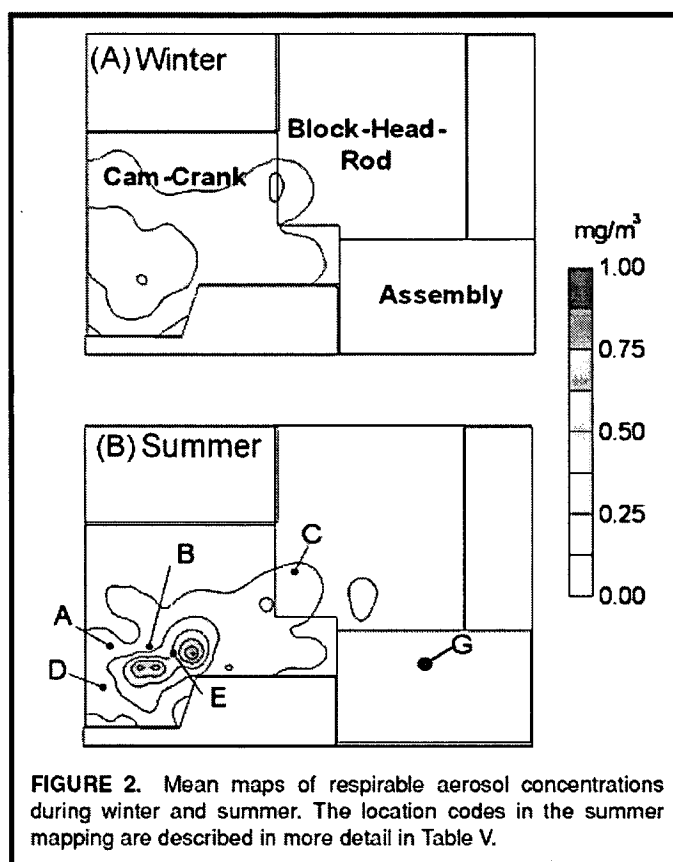


圖 46 2005 年夏天及冬天可呼吸性微粒的質量濃度分佈圖 [118]。

表 17 2005 年夏天及冬天各作業區可呼吸性微粒的幾何平均質量濃度 [118]。

Area of Plant	Winter		Summer	
	Geometric Mean (GSD) mg/m <sup>3</sup>	Grouping Code	Geometric Mean (GSD) mg/m <sup>3</sup>	Grouping Code
CC	0.15 (1.33)	A	0.12 (1.61)	A
BHR	0.04 (1.13)	B	0.05 (1.12)	B
Assembly	0.02 (1.66)	C	0.04 (1.07)	B

2005 年夏天，作者利用 CPC 在工廠屋頂的供應氣體通風口燃燒器的下游的空器處理單元中進行微粒數目濃度的即時量測，其結果為在工廠屋頂的微粒數目濃度為 54000 #/cm<sup>3</sup>，當燃燒器關閉在空器處理單元中的數目濃度為 88000 #/cm<sup>3</sup>，燃燒器開啓時空器處理單元中的數目濃度為 2600000 #/cm<sup>3</sup>，由此可知燃燒器會對微粒數目濃度的影響性很大，另外作者也在燃燒器開啓的狀況下利用 ELPI 量測冰水機(空器處理單元中的其中一種設備)上下游的粒徑分佈，其結果如圖 47(左)所示在冰水機上下游的微粒粒徑都是以 70 nm 以下的微粒為主且眾數為

在 7~23 nm 之間，下游的微粒數目濃度約為上游微粒數目濃度的一半，會造成此差異是因為微粒在冰水機裡的傳輸損失和其他混和空氣稀釋所造成，若是燃燒器關閉其結果如圖 47(右)所示在工廠屋頂的微粒數目濃度會下降且眾數在 30~40 nm 之間，另外廠外的微粒粒徑分佈圖的形狀與冰水機上下游的微粒粒徑分佈圖很相似，由此可知廠外的超細微粒是由廠內所傳輸出去的。

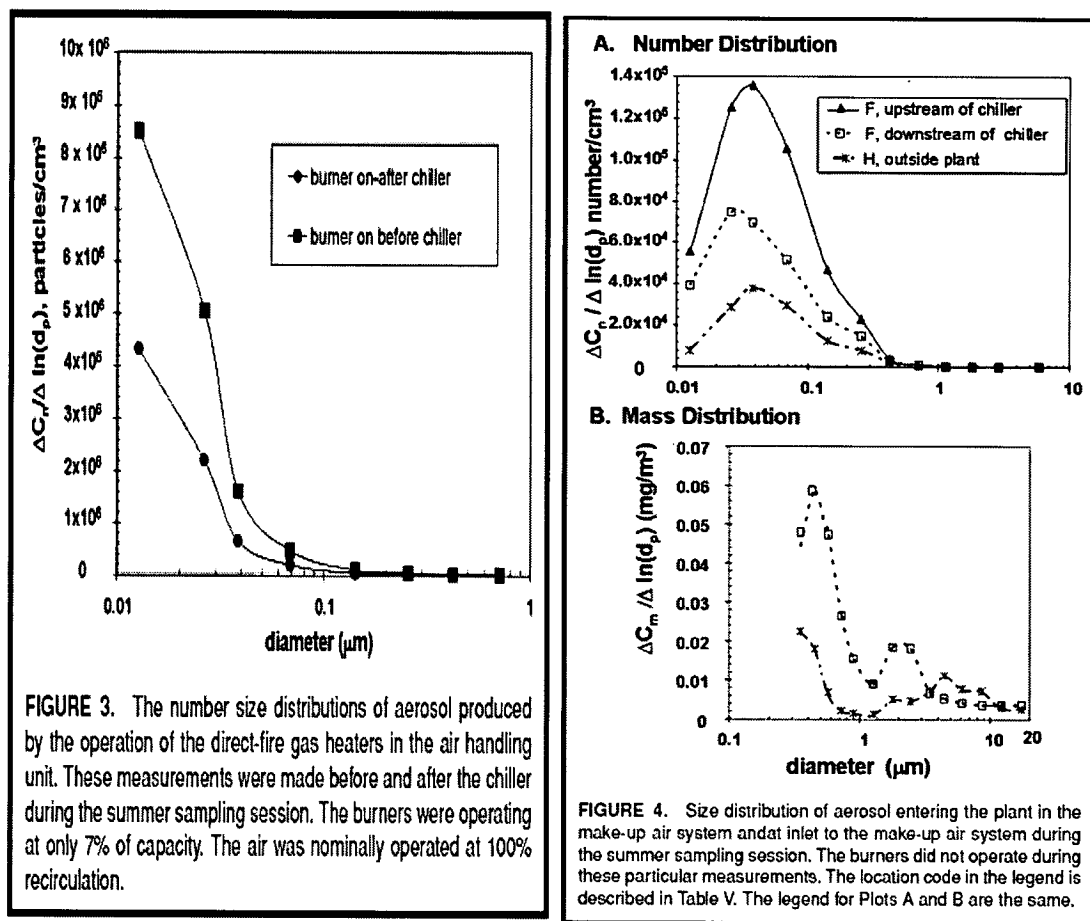


圖 47 冰水機上下游的微粒濃度：(左)燃燒器開啓 (右)燃燒器關閉 [118]。

Heitbrink 的研究主要結論為廠內超細微粒的主要來源為引擎本體-引擎蓋-連桿區的直燃式天然氣加熱器，而可呼吸微粒的主要來源為凸輪曲軸區的機械運作和金屬加工潤滑劑液滴的產生所造成[118]。

此外，Fujitani 等人在富勒烯工廠分別採樣兩天，採樣點分為室內與戶外，而室內的採樣點又區分成工作時段與非工作時段，第一天在非工作時段採樣，第二天在工作時段採樣，工作時段採取不同動作如裝袋、使用吸塵器和攪拌等，量測微粒數目濃度與體積濃度[119]。

作者利用 SMPS 量測小於 294.3 nm 以下之微粒粒徑，OPC 量測大於 300 nm 以上之微粒粒徑。在非工作時段的室內與戶外的微粒數目濃度與體積濃度量測結果如圖 48、圖 49 所示，可發現非工作期間室內的每一個粒徑大小範圍的數目濃度都相當穩定，粒徑小於 50 nm 的濃度大約在  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  左右。換句話說，戶外的數目濃度變化大

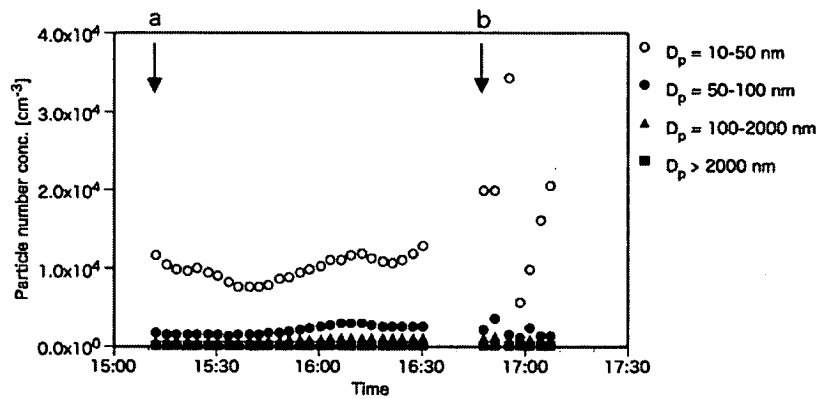


圖 48 第一天採樣時間列表與數目濃度關係(a-室內開始測量，b-室外開始測量)

[119]。

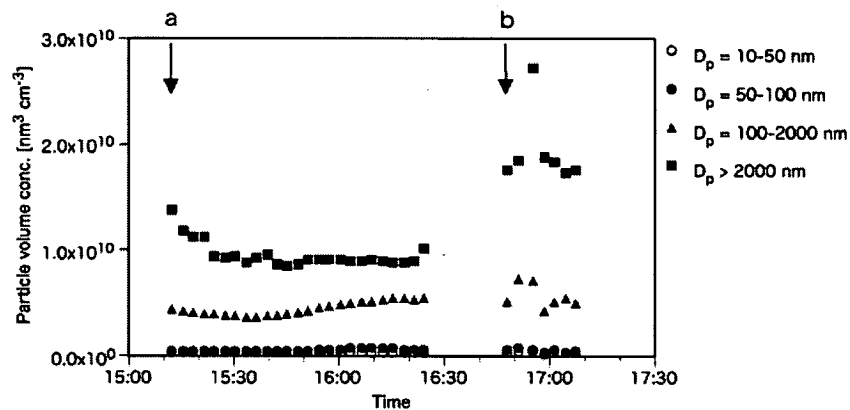


圖 49 第一天採樣時間列表與體積濃度關係(a-室內開始測量，b-室外開始測量)

[119]。

工作時段的室內與戶外量測微粒數目濃度與體積濃度圖如圖 50、圖 51 所示，在富勒烯裝袋階段時，粒徑小於 50 nm 的數目濃度與粗微粒的體積濃度有明顯的上升，後來這兩種濃度在沒有工人在採樣區時開始下降，開始使用吸塵器後，粒徑小於 50 nm 的數目濃度急速上升，但是粗微粒的體積濃度卻沒如同裝袋階段時改變的多。攪拌富勒烯期間，粒徑小於 50 nm 的微粒數目濃度開始下降，粗微粒的體積濃度急速上升。

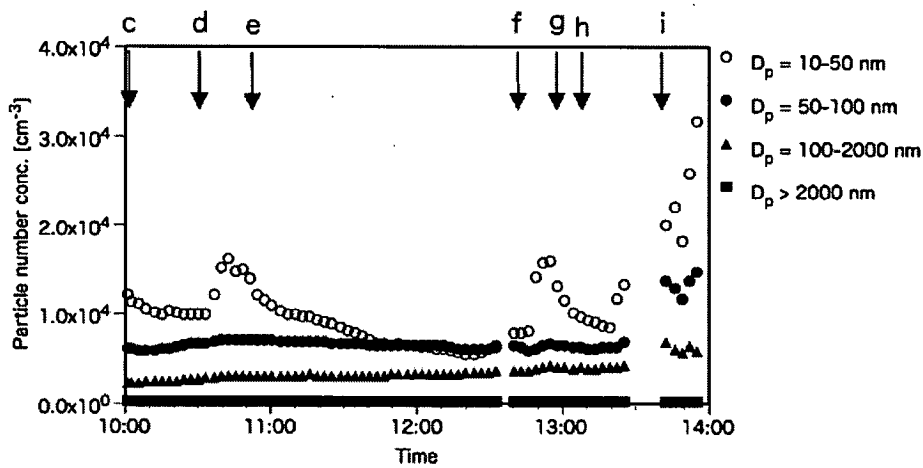


圖 50 第二天採樣時間列表與數目濃度關係(c-室內開始測量但無作業，d-開始裝袋，e-裝袋結束，f-使用真空吸塵器，g-開始溫和攪拌，h-開始激烈攪拌，i-開始室外測量) [119]。

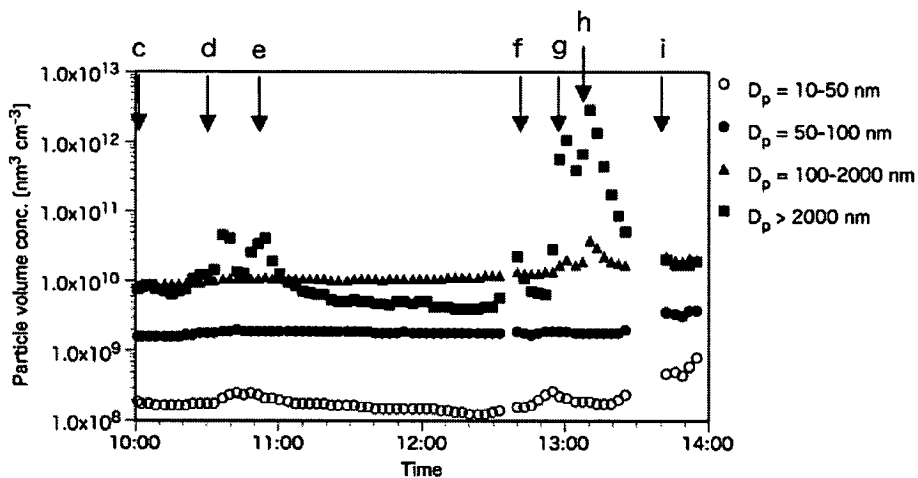


圖 51 第二天採樣時間列表與體積濃度關係 [119]。



## 第四節 奈米微粒的呼吸防護

呼吸防護具的功能目的就是避免吸進有害性物質，主要是提供乾淨空氣或是利用濾材將有害物清除，也就是分為供氣式 (air-supplying) 和淨氣式 (air-purifying)，供氣式乃以清淨空氣源供給配戴者所需之呼吸空氣。淨氣式呼吸防護具又可分為無動力與動力兩種。無動力呼吸防護具完全依靠配戴者自己的肺力提供呼吸所需的空氣；而動力呼吸防護具則是以攜帶型送風機等裝備提供呼吸氣流。無動力淨氣式呼吸防護具分成防塵口罩 (dust mask) 及防塵面具 (dust respirator)，空氣經由濾材或吸收罐進入面體。防塵口罩具價格低廉、構造簡單、對作業活動妨礙較少、易於維修保養，因此在事業單位使用最為普遍[120-122]。目前大部分的防塵口罩須具備高效率與低阻抗的特性，一般纖維性濾材的最易穿透粒徑約略在 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$  之間，有許多因素會影響到最易穿透粒徑的大小，其中包括：纖維的大小、帶電量、充填密度、表面風速等等[123,124]。理論上，由於奈米微粒具有較大的擴散係數，因此很容易被一般的防塵口罩所捕集[122]，其捕集效率會隨著粒徑減小而增加。在實際應用時，防塵口罩要能夠真正達到保護配戴者的目的除了口罩本身必須具備高過濾效率之外，其與臉部間之密合度也是重要的影響因素。因此，當口罩與臉部之間若不密合時，其對於奈米微粒之防護效果的影響，也是值得注意的問題。

根據[2]調查目前全球84%奈米相關機構要求員工使用個人防護設備，而[8]對國內奈米相關產業所做的調查發現僅有五成的機構要求員工供配戴個人防護具，這對員工是相當不利的。

### 壹 國內外的防塵口罩測試標準

歐美等國對防塵面具所使用的濾材均有認證測試標準。雖然所使用的測試方法與條件都不相同，但所測試的項目不外：過濾效率與呼吸阻抗。過濾效率代表濾材對空氣中粒狀物的過濾能力，而呼吸阻抗則與配戴者的舒適度相關，過高的呼吸阻抗將使配戴者呼吸感到困難。國內外的防塵口罩測試標準如下：

#### A. 美國 42 CFR Part 84 [125]

美國國家職業安全衛生研究院 (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 所頒佈的呼吸防護具測試方法 42 CFR Part 84 測試標

準，將防塵口罩的濾材依其所適用的環境分成 N、R 與 P 等三類(如表 18 所示)，而每一類的濾材依據其捕集的效能又分成 100、99 與 95 等三個等級，其捕集效率則分別為 99.97%、99%與 95%。N 類的濾材指的是以氯化鈉微粒來測試(數目中間直徑 count median diameter CMD=0.075±0.02 μm; 幾何平均標準偏差 geometric standar deviation GSD<1.86)，因此用該類濾材所組成的防塵口罩只能在不具有油性微粒的環境中使用；R 與 P 類的濾材則是以 DOP(Dioctyl Phthalate) 做為測試微粒 (CMD=0.185±0.02 μm; GSD<1.60)，因此在使用上就無上述 N 類濾材的限制。為了提高人員配戴呼吸防護具時的舒適性，防護具所造成的呼吸阻抗是一個必須考量的因素，在 42 CFR Part84 中並沒有針對不同等級的濾材做規定，只在規定測試的流量為 85 ± 2 L/min，所允許的最大吸氣與呼氣阻抗分別為 35 mm-H<sub>2</sub>O、25 mm-H<sub>2</sub>O。

#### B. 歐盟 EN 149：2001 [126]

在歐洲標準 EN 149：2001 中，將濾材分成 FFP1、FFP2 與 FFP3 三級如表 19 所示，而個別的等級需分別以 NaCl 微粒(CMD=0.6 μm)與 Paraffin oil (石蠟油)液滴(CMD=0.26 μm)在流量 95 L/min 下測試，各個等級所對應的效率分別為 80%、94%、99%。在阻抗方面，於 EN149：2001 中並無明確規定吸氣與呼氣的阻抗，但是每一等級的濾材都必須以三種不同的流量(30、95、160 L/min)來測試，而各等級的通過標準亦有所差異。

#### C. 中華民國國家標準 CNS 14755 Z2125 [127]

CNS 14755 Z2125 為我國經濟部中央標準檢驗局所頒布的拋棄式防塵口罩標準，其將防塵口罩分成 D3、D2、D1 三個等級(如表 20 所示)。D3 是指口罩防塵效率在 99%以上者，D2 是指口罩防塵效率在 95%~99%之間，D1 則是指防塵效率在 95%以下者。防塵效率之測試流量為 85±4 L/min，而測試微粒均為 NaCl，也就是說此標準只對在不具有油性微粒的環境中使用的口罩來做測試。在阻抗方面有針對不同等級的口罩做規定，D3 及 D2 等級之吸氣及呼氣阻抗分別為 35 mm-H<sub>2</sub>O 及 25 mm-H<sub>2</sub>O，D1 等級的吸氣及呼氣阻抗則均為 19 mm-H<sub>2</sub>O。而阻抗的測試流量，則與防塵效率測試之流量

相同。另外我國防塵面具之國家標準 CNS6637 Z2024 (87 年修定)將面具內之濾材分成三級，其效率分別為 99.9 %、99 %及 95 %，測試流量為 30 L/min,採用 NaCl 及 DOP 為測試微粒，粒徑分布要求為粒徑在 0.1 μm 以下不計, 0.5 μm 以下的微粒數佔 90 %以上。

#### D.日本 JIS 防塵口罩驗證標準

日本對於防塵口罩的驗證標準也在 2000 年 9 月進行修訂，其中新標準中根據防塵口罩的種類（替換式-R；拋棄式-D）、接受測試微粒的種類（固體-S；液體-L）、以及過濾效率（≥80.0%；≥95.0%；≥99.9%）將防塵口罩分成 12 個等級（如表 20）。在測試微粒的種類上，以氯化鈉以及 DOP 為固體與液體微粒，進行濾材過濾效率的測試。新、舊標準在測試條件上的差異如表 6 所示：除了測試微粒的種類與粒徑分佈的不同之外，負載測試是新標準中所增加的項目，其次，測試流量也從舊標準的 30 L/min 增加至 85 L/min。而從過濾的觀點來看，新標準著實地比舊標準來的嚴苛。在口罩的呼吸阻抗方面，則依據不同的過濾效率訂定個別之最大之吸氣與呼氣阻抗（如表 21）。

表 18 美國 NIOSH 42 CFR Part 84 防塵口罩捕集效率之標準 [125]

測試 氣膠	NaCl	DOP	DOP
過濾效率			
99.97%	N100	R100	P100
99%	N99	R99	P99
95%	N95	R95	P95
N：不具抗油性、R：具抗油性、P：完全防油			
最大阻抗， 吸氣	35 mm-H <sub>2</sub> O		
最大阻抗， 呼氣	25 mm-H <sub>2</sub> O		
最大呼吸阻抗之測試流量 = 85±2L/min			

表 19 歐盟 EN 149：2001 防塵口罩捕集效率之標準 [126]

測 試 微粒	最大初始穿透率 (%)		
	NaCl	煤油	
過濾等級			
FFP1	20		20
FFP2	6		6
FFP3	1		1
最大呼吸阻抗 (mbar)			
流量 (L/min)	30	95	160
FFP1	0.6	2.1	3.0
FFP2	0.7	2.4	3.0
FFP3	1.0	3.0	3.0
1mbar=10.62mm-H <sub>2</sub> O			

表 20 中華民國國家標準 CNS 14755 Z2125 防塵口罩防護效率之標準(92 年 5 月公佈) [127]

口罩等 級	防護效率 * (%)	吸 氣 阻 抗 (mm-H <sub>2</sub> O)	呼 氣 阻 抗 (mm-H <sub>2</sub> O)
D3	99 以上	35 以下	25 以下
D2	95 以上	35 以下	25 以下
D1	80 以上	19 以下	19 以下
* 測試微粒：NaCl			

表 21 日本新、舊標準中濾材等級分類

標準	新標準							舊 標 準 石 英
	測試微粒	NaCl			DOP			
等 級	替換式	RS1	RS2	RS3	RL1	RL2	RL3	—
	拋棄式	DS1	DS2	DS3	DL1	DL2	DL3	—
過 濾 效 率 (%)		≥80.0	≥95.0	≥99.9	≥80.0	≥95.0	≥99.9	≥95

表 22 日本新標準中濾材效率測試之條件比較

標準	新標準		舊標準
測試微粒	NaCl	DOP	石英
粒徑 (μm)	0.06~0.1	0.15~0.25	≤2
幾何標準偏差	≤1.8	≤1.6	—
$\sigma_g$			
濃度 (mg/m <sup>3</sup> )	≤50	≤100	30±5
負載 (mg)	100	200	—
流量 (L/min)	85	85	30

表 23 日本新標準中濾材等級與呼吸阻抗

種類	等級	吸氣阻抗 (Pa)	呼氣阻抗 (Pa)
替換式	RS1	≤70	≤70
	RL1		
	RS2	≤80	≤70
	RL2		
	RS3	≤160	≤80
	RL3		
拋棄式(無排氣閥)	DS1	≤60 (≤45)	≤60 (≤45)
	DL1		
	DS2	≤70 (≤50)	≤70 (≤50)
	DL2		
	DS3	≤150 (≤100)	≤80 (≤100)
	DL3		

另外在 NIOSH 42 CFR Part 84 及 CNS14755 Z2125 之規範中，亦規範對於 N 與 R 類濾材的負載能力的規定是以 200 mg 為標準，以 N95 或 R95 為例，該類的濾材在負載微粒總量為 200 mg 後，其對微粒的收集效率不得低於 95% (其餘的等即以此類推)。因此在實際使用上，該類的防塵口罩有負載超過 200 mg 之虞時，就應該停止使用，因為測試規範對於該類的濾材在超過 200 mg 負載量的效率並無明確的定義，所以在管理上必須對不同的濃度條件下的使用時間有不同的規範。至於 P 類的濾材，在微粒的負載實驗中是以達到其最低捕集效率為準，以 P95 為例，意即其收集效率因微粒負載而降低的過程中，其最低的效率不得低於 95%，而對於最大的負載量並無限制，因此在能克服其呼吸阻抗的情況下，在管理上並無使用時間的限制[128]。

## 貳 國內外針對防塵口罩的研究

目前國內外學者皆曾針對防塵口罩對奈米微粒的防護效率的研究。我國勞工安全衛生研究所測試發現市售防塵口罩性能有很大的差距，陳春萬研究市售防塵口罩在 3 cm/sec (測試流量 30 L/min), 8.5 cm/sec (85 L/min), 9.5 cm/sec(95 L/min)三種不同表面風速下的捕集效率，結果顯示在表面風速為 3 cm/sec 之一般呼吸狀況時，0.1 至 1.0  $\mu\text{m}$  間之過濾效率為 10~20%(機車用口罩), 30~70%(醫用口罩), >85%(工業用口罩)，當表面風速愈高，過濾效率降低(或穿透度提高)，如圖 52 和圖 53 所示[123]。簡弘民曾進行三種不同廠牌之口罩 (如美國 3M N95、台灣

三暉 SH9250、日本 TRUSCO X-1502) 濾除奈米微粒的效率評估實驗。從其數據結果 (圖 54) 可知, 3M N95 口罩對奈米微粒的防護效率都比其他兩個廠牌的口罩較佳; 相較於 3M N95, TRUSCO 與三暉的口罩對 50~90 nm 粒徑範圍的微粒有較差的過濾效率, 曲線形成 V-curve, 甚至有低於 95%, 而 3M N95 卻沒有此現象, 原因在於 3M N95 口罩的濾材經過靜電帶電處理, 因此可大大提升濾材對奈米微粒之防護效率[129]。在呼吸阻抗研究發現, 3M 與 TRUSCO 兩廠牌的口罩有較低的呼吸阻抗; 而作業人員在配戴時, 會有較佳的舒適性。三暉的口罩爲了提高口罩之防護效率, 而增加濾材之密度, 反而增加了呼吸阻抗, 降低使用者配戴的意願。

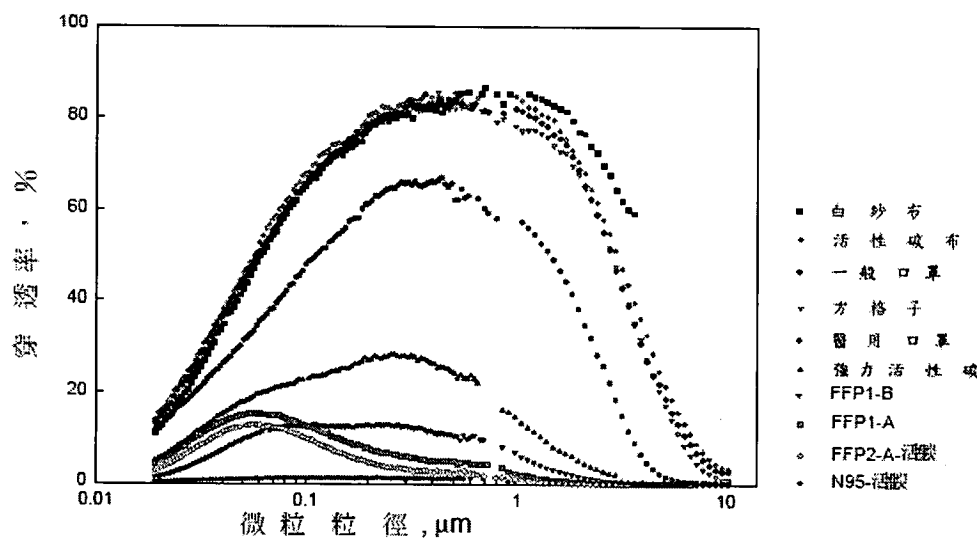


圖 52 市售口罩之穿透率, 表面風速 3.0 cm/sec [123]。

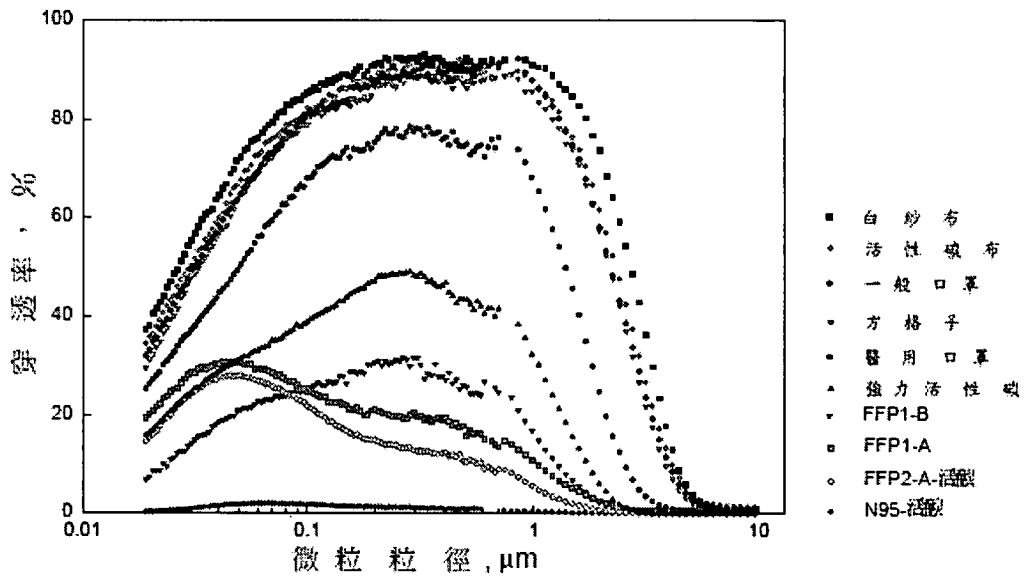


圖 53 市售口罩之穿透率，表面風速 8.5 cm/sec [123]。

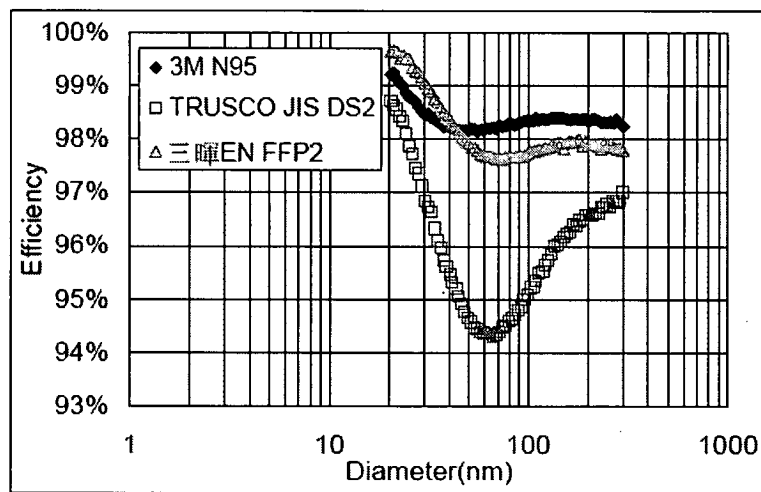


圖 54 三種廠牌口罩平均效率比較圖 [129]。

在過去數年間，行政院勞委會勞工安全衛生研究所已針對國內外微粒防護具對奈米微粒的防護效果進行研究，且獲致具體的研究成果。葉文裕的研究報告

指出N95濾材為效率最好的帶電濾材，除了N95口罩外，目前市售防塵口罩有許多在100 nm以下粒徑的微粒穿透率超過5%，且防塵口罩之最易穿透粒徑有偏往奈米粒範圍的趨勢，最易穿透粒徑約分布在50~80 nm之間，此研究結果與國外結果類似(圖55) [130]。N95B濾材帶電時的最易穿透粒徑為60 nm（微粒去除率為98%）；濾材不帶電時其帶電時的最易穿透粒徑變為340 nm（微粒去除率為74%）。靜電力是N95口罩去除奈米微粒的重要機制之一的研究結果與國外結果相同。

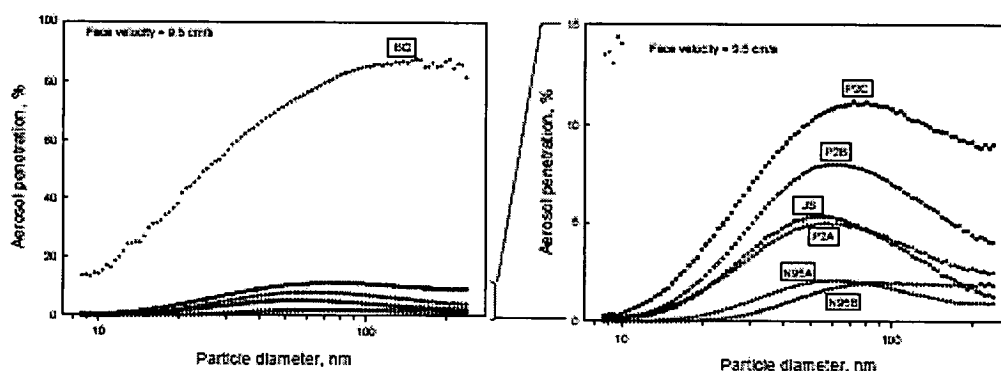


圖 55 不同市售防塵口罩的穿透率比較圖，表面風速 9.5 cm/sec (95 L/min)[130]

陳春萬及Huang等人指出N95防塵口罩濾材對於粒徑10 nm 以下以及5 μm 以上之微粒，不論濾材帶電與否其收集效率均達到 99%以上，而且當測試流率由30 L/min 增加至100 L/min時，對於10 nm 以下微粒之貫穿率影響也不顯著，此結果顯示奈米微粒並不會熱反彈而降低過濾效率[61,131]。N95帶電濾材的最大穿透率的粒徑在50 nm左右，與Balazy等人的研究結果相同[132]，當濾材的靜電被消除後最大穿透率的粒徑變成200 nm左右(圖56)。



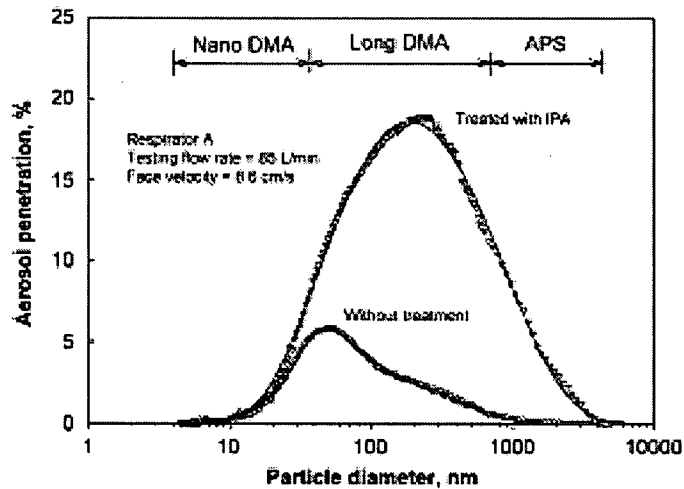


圖 56 N95 防塵口罩的穿透率，表面風速 8.6 cm/sec (85 L/min) [61]。

在口罩的密合度研究方面，本國勞委會勞工安全衛生研究所開發密合度的測試方法，以國人標準頭型配合呼吸模擬器，量測在一般的呼吸型態下測試正常配戴及口罩-臉部接合處完全密封下的穿透率，可以算出密合度係數(FF, fit factor) (圖57)[132]。測試結果顯示某立體杯型N95口罩的保護係數(PF, protection factor)可達20，其他的口罩不論價格高低，保護因子在0至5.0之間，有許多在1.5至2.0之間，效果並不佳；而在配戴時的密合度方面，N95口罩可達20.5，其他口罩在7至2.0之間，密合效果不好。R95密合度為3.5，顯示此高效率口罩效率高的原因主要是濾材的機械過濾機制而非濾材靜電機制所造成，因此壓降較高易造成配戴時的洩露，在設計需要考慮密合度的問題(圖58)。

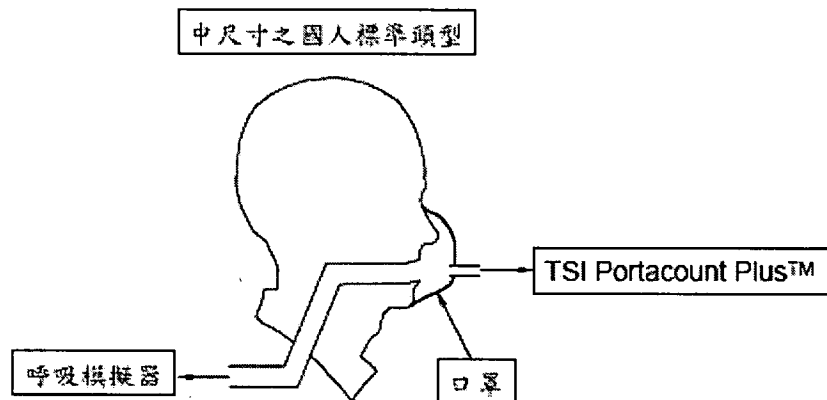


圖57 本國勞工安全衛生研究所密合度的測試方法 [132]。

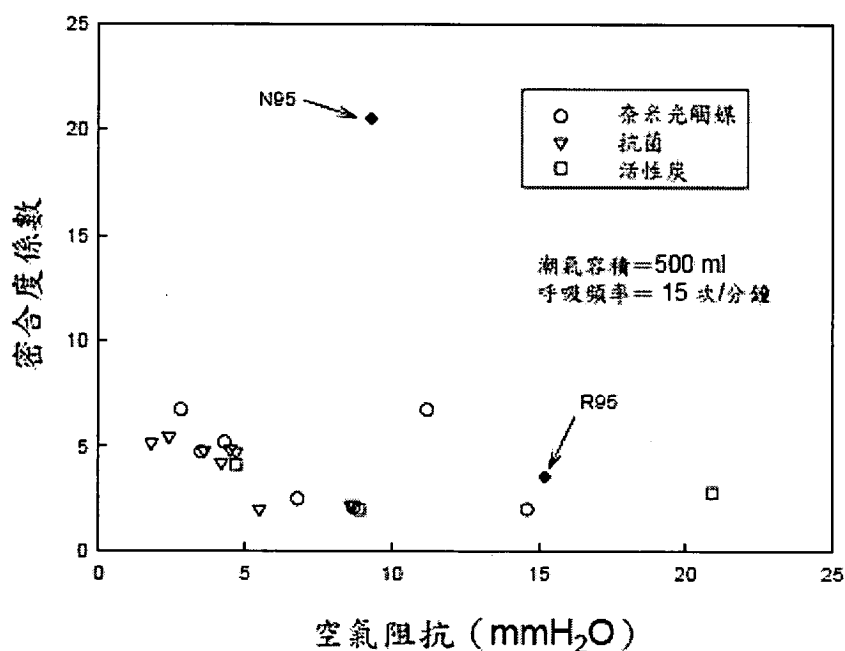


圖58 不同特殊機能口罩之密合度測試結果 [132]。

圖59為不同大小的洩漏孔對某N95防塵口罩的穿透率的影響，表面風速為8.6 cm/sec (85 L/min)，顯示洩漏孔愈大，微粒穿透度愈大[131]。在無洩漏之情況下，10 nm的微粒之穿透率0.17 % (密合係數為588)，因此即使以TSI Portacount Plus™ 搭配N95-Companion™ 所測得之值也不能代表其密合度[131]。[131]指出若要增加儀器所測得密合度值之代表性，建議不應以TSI建議的40 nm作為指標，而應該選擇以10 nm 的微粒進行測試會具有較高的代表性(圖60)。溫度是直接造成濾材帶電量減少的因素，常溫之下，濾材帶電量隨時間的衰減並不顯著，然而在100 °C的環境下，只要數十小時的時間就能夠使濾材帶電量減少，並造成濾材效率的降低。相對濕度會因為改變濾材的表面導電特性而促使濾材帶電量的衰減，因此其影響的程度取決於濾材本身的吸水特性[131]。

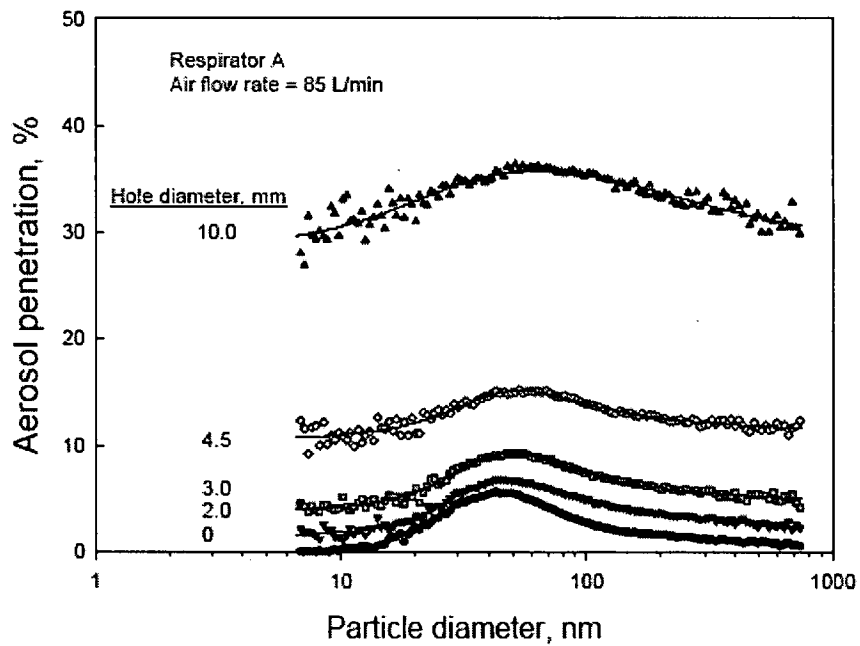


圖 59 不同大小的洩漏孔對某 N95 防塵口罩的穿透率的影響，表面風速 8.6 cm/sec (85 L/min) [131]。

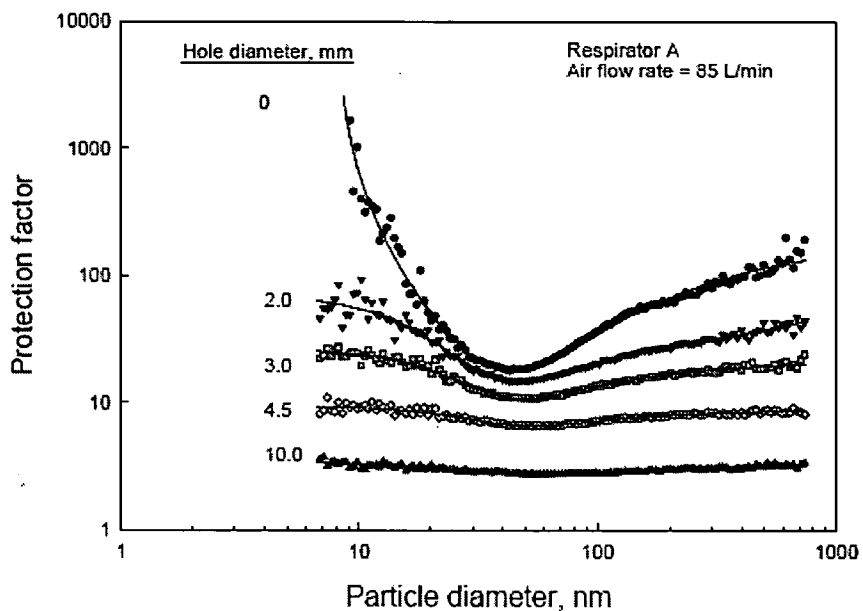


圖 60 不同大小的洩漏孔對某 N95 防塵口罩保護係數的影響，表面風速 8.6 cm/sec (85 L/min) [131]。

Balazy等人以10~600 nm粒徑範圍奈米微粒對市售兩間廠牌之N95口罩進行微粒穿透效率測試，發現靜電效應是N-95口罩效率高的主要原因，其中一N95口罩對30~80 nm粒徑範圍奈米微粒之去除效率會低於95%，且最低去除效率所對應之微粒直徑在40~50 nm之間，此粒徑範圍比口罩驗證時使用的300 nm測試微粒小很多[132]，此結果讓我們必須重新思考口罩驗證時使用300 nm測試微粒是否恰當(表24, 圖61)。此研究結果與本國之研究結果相類似。

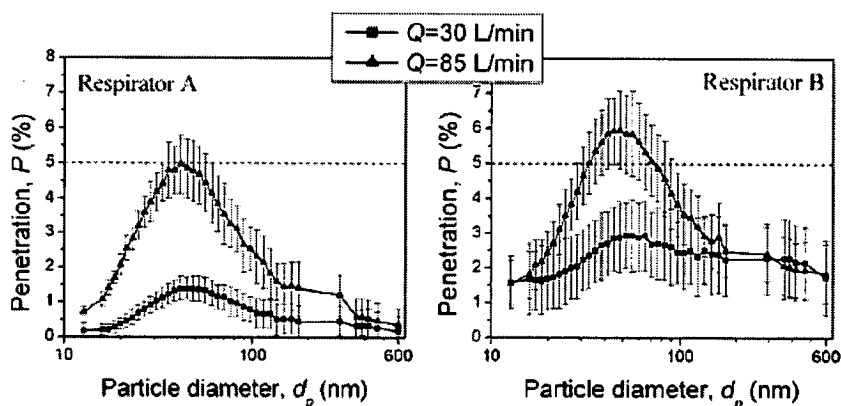


圖 61 不同的測試流量下 N95 防塵口罩的穿透率 [132]。

表 2.4.7 N95 口罩的測試結果超過 5 % 穿透率的統計表 [132]。

Respirator	Inhalation flow rate, $Q$ ( $l\ min^{-1}$ )	Coefficient of variation of the penetration for particle diameter 20–100 nm	Fraction of respirators for which the test demonstrated penetration in excess of 5%
A	30	0.21–0.48	0/10
A	85	0.10–0.29	6/10
B	30	0.32–0.54	0/10
B	85	0.16–0.26	9/10

根據以上的文獻回顧，以下列出與本計劃以奈米微粒作業環境控制為主要的研究方向：

- (1) 國內外的不同研究機構已提出許多奈米微粒作業環境控制技術、暴露量測及評估方法、最佳工作法則及研究需求，有必要再進一步深入探討，以研擬適合本國的奈米微粒控制策略。
- (2) 傳統試驗奈米粉體揚塵特性的標準旋轉腔體方法過於繁複且設備過於笨重，本計畫擬使用較簡便的漩渦震盪器與微小粉塵分散器來進行奈米粉體揚塵特

性測試，並與標準測試方法作比較，以期能夠縮短測試的時間及成本。

- (3) 對於排煙櫃/化學排氣櫃的控制效果的研究在國內已有很好的成果，可以應用在奈米微粒控制上。對於工業級高效率真空 HEPA 吸塵器對奈米粉體的過濾效果、與奈米粉體負荷後的過濾效果等研究較缺乏，且高效率真空 HEPA 吸塵器在清理、維護保養工作時有很大的需求，在沒有中央集塵系統的工作場所也可以當成局部微粒抽除系統(dust extraction system)的一部分，因此值得在本計劃中研究探討，本研究的成果也可用於提昇本土化的高效率工業真空吸塵器的技術水準。
- (4) 現階段奈米微粒作業環境測定數據過於缺乏，美國 NIOSH 已提出  $\text{TiO}_2$  奈米微粒建議暴露限值，其他奈米物質的暴露限值也正積極的研究當中，因此有必要在二氧化鈦製程及其他作業場所測量奈米微粒的暴露現況，了解污染來源及評估控制技術的性能。

## 第三章 研究方法

### 第一節 作業環境奈米微粒控制策略

本計畫首先進行奈米微粒作業環境控制技術相關文獻的收集，本計畫將透過網路資訊搜尋、參與研討會及圖書搜尋的方式，收集各國奈米微粒的作業環境控制相關技術之研究報告、論文、期刊、新聞等。相關之研究報告將來自於：美國工業衛生學會 AIHA (<http://www.aiha.org/content>)、美國國家職業安全衛生研究所 NIOSH (<http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>)、美國環境保護署 USEPA (<http://www.epa.gov/>)、英國健康與安全部 HSE (<http://www.hse.gov.uk/index.htm>)、歐洲安全衛生機構 EASH (<http://agency.osha.eu.int/info>)、世界衛生組織 WHO (<http://www.who.int/en/>)、PEN(The Project on Nanotechnologies, <http://www.nanotechproject.org/>)、ICON (International Council on Nanotechnology, <http://icon.rice.edu/>)、ISO(TC229, [http://www.iso.org/iso/standards\\_development/technical\\_committees](http://www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees))等機構。

相關之期刊論文將來自於：Journal of Nanoparticle Research, Occupational and Environmental Medicine , Occupational and Environmental Medicine, Journal of Aerosol Science, Aerosol Science and Technology, Environmental Science & Technology, Toxicological Sciences, Environmental Health Perspectives, Journal of Aerosol Medicine, Inhalation Toxicology, Science, Nano Letters, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, Annals of Occupational Hygiene 等國際期刊及國際性奈米微粒研討會論文。收集的內容涵蓋奈米微粒作業環境控制技術、奈米微粒過濾、作業環境奈米微粒暴露評估、暴露控制方法、暴露測量方法等文獻。

以下為本計畫參考的重要研究報告：

1. NIOSH, 2006, Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH. [4]
2. NIOSH, 2007, Progress toward Safe Nanotechnology in the Workplace: A Report from the NIOSH Nanotechnology Research Center. [5]

3. NIOSH, 2005, NIOSH Current Intelligence Bulletin: Evaluation of Health Hazard and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide (draft). [6]
4. NIOSH, Safety and Health Topic: Control Banding <http://www.cdc.gov/niosh/topics/ctrlbanding/> [133]
5. ASTM, 2008, standard E 2535-07, Standard guide for handling unbound engineered nanoscale particles in occupational settings. [10]
6. BSI, 2007a, Nanotechnologies-Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials, published document, PD6699-2. [11]
7. BSI, 2007b, ISO/TR 27628, Workplace atmospheres-Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols-Inhalation exposure characterization and assessment. [134]
8. NIOSH, 2008, Qualitative risk characterization and management of occupational hazards (Control Banding (CB))—A literature review and critical analysis. [14]

## 第二節 實驗室奈米粉體揚塵逸散

目前用來研究粉體逸散特性的產塵方式主要分為三種：慣性衝擊或單一掉落法、流體化床法和旋轉腔體試驗機法。旋轉腔體試驗機法(rotating drum)是一種用來研究粉體揚塵指數(dustiness index)的標準方法之一。然而，從這個方法我們無法得到測試粉末粒徑分布的資料。因此，我們實驗團隊修正了這個實驗的採樣序列，使它可以得到由旋轉腔體產生的微粒粒徑分布。就另一個角度而言，旋轉腔體也是一種分散粉末的方法，因此我們將旋轉腔體測試機法得到的數據與別的儀器做比較，用以了解測試粉末的逸散狀況。旋轉腔體的實際外型可以參考圖 62 所示。

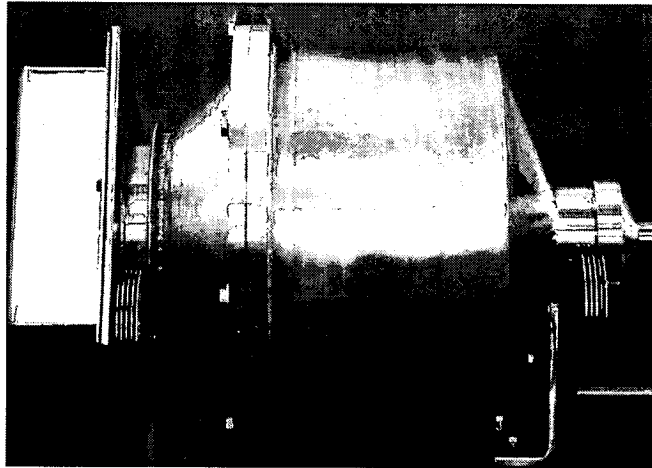


圖 62 實驗時使用的旋轉腔體

本研究使用的產塵方法是漩渦震盪法(vortex shaker)，Maynard 及 Isamu 等人在此之前都有利用此方法進行過粉體逸散的研究[79,81]，其原理與流體化床法相似，實驗時將待測試的粉體樣品裝入一圓底的玻璃試管中，再將試管放置在漩渦震盪器上，並通入乾淨空氣，用以把試管中因震盪和氣流擾動的粉體微粒帶出，最後接到微粒數目濃度及粒徑分布的儀器進行量測，藉此方法來觀察不同粉體的逸散行為和特性。漩渦震盪器的實際外型可以參考圖 63 所示。

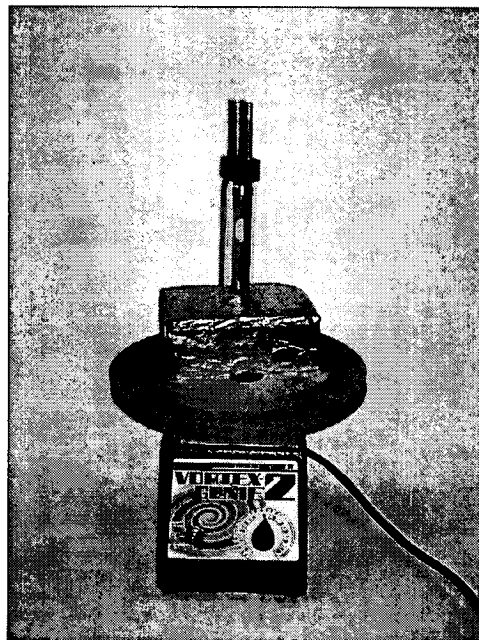


圖 63 實驗時使用的漩渦震盪器



微小粉末分散器(SSPD, small scale powder disperser, Model 3433, TSI Inc.)為另一個使用的實驗儀器，這台儀器一般的用途在於分散粉末，再利用APS(aerodynamic particle sizer)測量粉塵之粒徑分佈，此儀器的文氏管部分是以高能量來分散微粒，故預期其粉塵之分散特性較佳。微小粉末分散器的實際外型可以參考圖 64 所示。

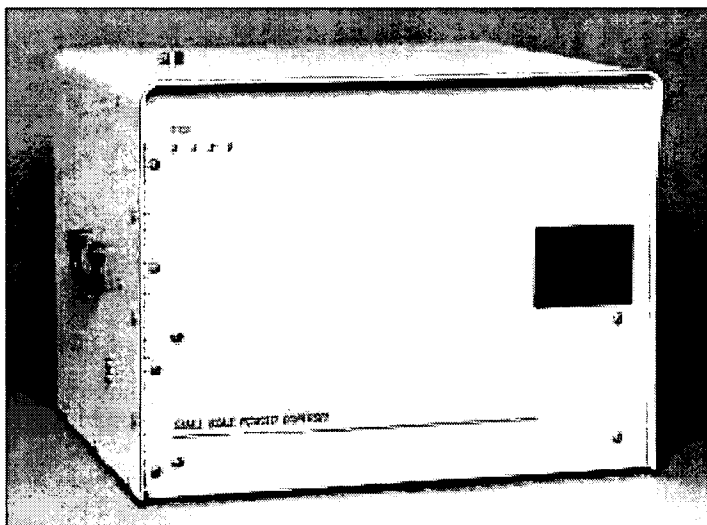


圖 64 實驗時使用的微小粉末分散器 [135]

本研究使用次微米級的二氧化鈦粉體( $\text{TiO}_2$ , submicron)、奈米級二氧化鈦粉體( $\text{TiO}_2$ , nano)、次微米級氧化鋅粉體( $\text{ZnO}$ , submicron)、奈米級氧化鋅粉體( $\text{ZnO}$ , nano)、次微米級二氧化矽粉體( $\text{SiO}_2$ , submicron)與奈米級二氧化矽粉體( $\text{SiO}_2$ , submicron)做為實驗對象，其中次微米級的二氧化鈦粉體是由台灣石原產業(Isk Taiwan CO., LTD.)生產，粉體的顯在密度(apparent density)為  $0.95 \text{ g/cm}^3$ ，初始粒徑大小為 200-300 nm；奈米級的二氧化鈦粉體則是由德國的 Degussa 公司所生產，型號為 AEROXIDE<sup>®</sup>  $\text{TiO}_2$  P25，平均初始粒徑為 21 nm，粉體顯在密度為  $0.13 \text{ g/cm}^3$ ；次微米級的氧化鋅粉體為台灣的慈陽公司(Sun Beam, Taiwan)所製造，初始粒徑為 250-300 nm，粉體顯在密度為  $0.6 \text{ g/cm}^3$ ；奈米級氧化鋅粉體、次微米級二氧化矽粉體與奈米級二氧化矽粉體皆由台灣的永朕材料科技公司

(Yong-Zhen Technomaterial .CO., LTD.)提供，其初始粒徑分別為 30-50 nm、0.8-1.2  $\mu\text{m}$  及 10-30 nm，自行量測的顯在密度為  $0.35 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.58 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.056 \text{ g/cm}^3$ 。為了減低粉體含水量對微粒逸散的影響，故在進行實驗之前，會將待測粉體放入烘箱中，以  $105^\circ\text{C}$  烘烤 2 小時以去除粉體中的水分。

漩渦震盪法實驗的系統架設主要是參考 Isamu 等人的實驗架設[81]，實驗系統分為兩個部份，前端為產塵的部份，後端是微粒特性的量測。前端產塵的部份是由高效率微粒空氣過濾器(High Efficiency Particulate Air Filter, HEPA)、容積約 90ml 的玻璃試管( $\varnothing 25 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ )及漩渦震盪器(vortex shaker, Vortex Genie 2, TSI Inc.)所組成，而帶有微粒的氣流會經過微粒靜電中和器(neutralizer, Model 3012, TSI Inc.)後，再分流至掃描式電動度粒徑分析儀(SMPS, Model 3936, TSI Inc.)和氣動微粒分析儀(APS, Model 3321, TSI Inc.)測量數目濃度和粒徑分佈。實驗系統架設即如圖 65 所示，在 APS 上面有擺放一台微粒濃度稀釋器(diluter, Model 3302, TSI Inc.)，用來避免過高的瞬間微粒濃度傷害 APS，稀釋倍率為 1:100。

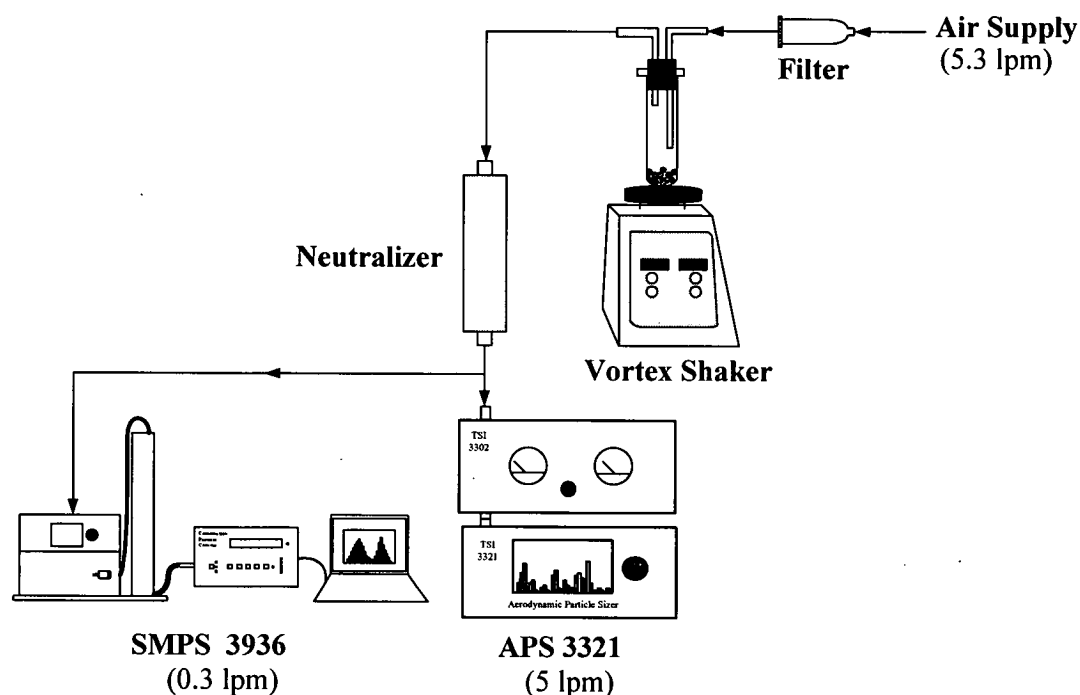


圖 65 漩渦震盪法實驗系統架設示意圖

當改用 SSPD 做為粉塵產生源時，實驗系統就將前端的漩渦震盪器置換為 SSPD，後端的實驗架設就和漩渦震盪法的實驗相同，皆使用 SMPS 和 APS 作為微粒數目濃度及粒徑分布量測的儀器，實驗架設則如圖 66 所示。

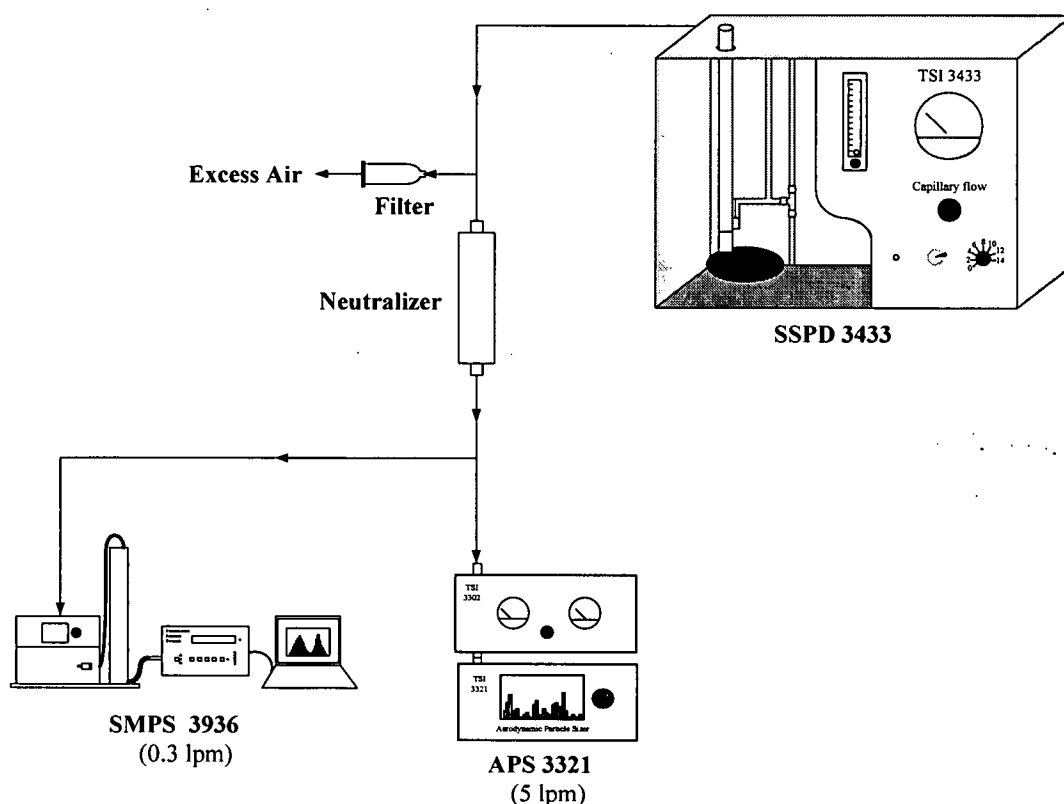


圖 66 微小粉末分散器實驗系統架設示意圖

由於粉體逸散或是分散實驗的微粒濃度變動情況較劇烈，而 SMPS 得到一筆粒徑分布的資料至少需要 45 秒至 300 秒之間，故希望使用可以快速掃描粒徑分佈的儀器，因此除了使用 SMPS 作為量測微粒數目濃度及粒徑分布的儀器之外，在微小粉末分散器的實驗系統亦加上快速電移動度微粒粒徑分析儀(FMPS, Fast Mobility Particle Sizer Spectrometer, Model 3091, TSI Inc.)與 SMPS 同時進行量測，並將結果進行比較。此外，為了得知實驗時分散微粒的重量濃度分布狀況，在此系統再加上 MOUDI 來進行分析。其實驗系統架設圖可參考圖 67。

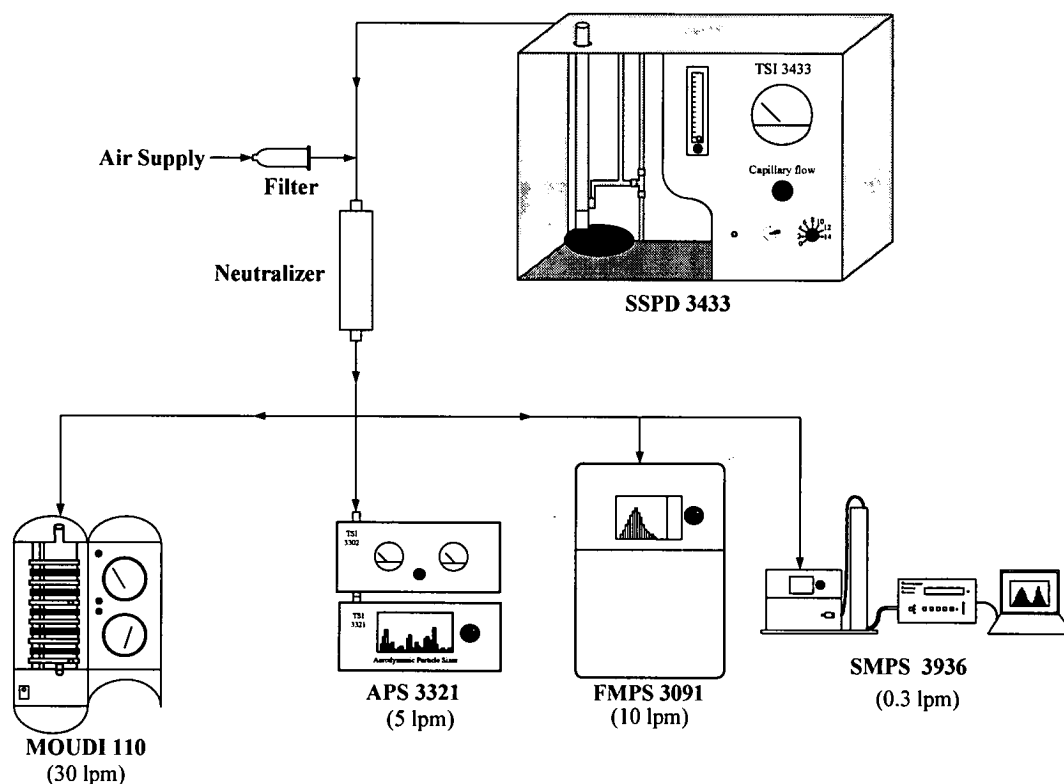


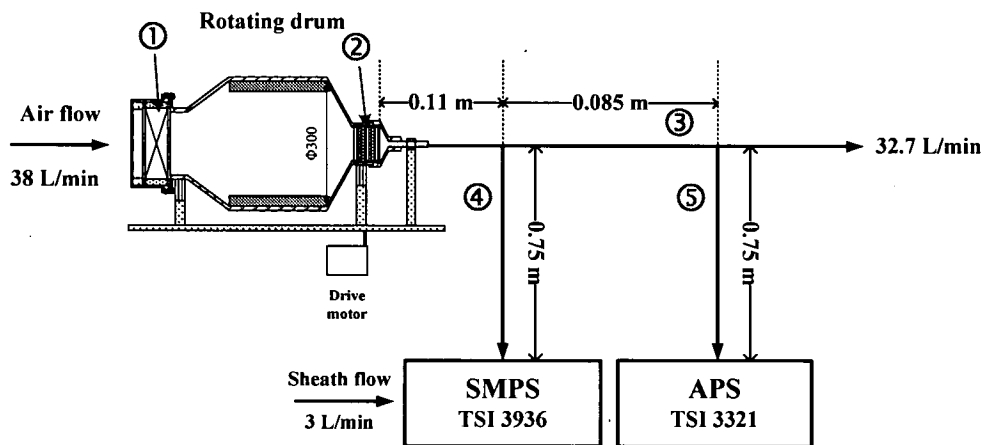
圖 67 微小粉末分散器實驗系統架設示意圖(加 FMPS 及 MOUDI)

進行漩渦震盪法實驗時將待測粉體取出約  $1 \text{ cm}^3$  體積的粉體，裝入玻璃試管中，之後先開啓 SMPS 以  $0.3 \text{ lpm}$  的流量抽取試管中殘存的大氣微粒，待試管中的總微粒數降至  $20 \text{ \#/cm}^3$  左右後，再開啓 APS 和漩渦震盪器，震盪器的盪頻率調至 55%(若把最大的震盪頻率當作 100%，則 5.5 的震盪頻率即可當做 55%)。而採樣時 SMPS 設定為每 45 秒掃描一筆數據，相對應的微粒粒徑掃描範圍為  $21.7\sim 429.4 \text{ nm}$ ，APS 則是每秒輸出一筆數據，其相對應的微粒粒徑掃描範圍為  $542\sim 19810 \text{ nm}$ ，實驗的總採樣時間約達 15 分鐘。而進行 SSPD 的實驗時，則是將測試粉末平鋪在圓盤的軌道上，並紀錄鋪在圓盤上的粉末重量，啓動儀器時以  $0.37\text{rph}$  的馬達轉速轉動圓盤，APS 和 SMPS 的採樣時間皆設定為 2 分鐘輸出一筆數據，其相對應的微粒粒徑掃描範圍分別為  $15.1\text{nm}\sim 661\text{nm}$  和  $542\sim 19810 \text{ nm}$ ，總採樣時間約達 30 分鐘。實驗進行時皆會記錄環境的溫溼度。

本實驗室曾利用旋轉腔體試驗機法進行奈米  $\text{TiO}_2$  與次微米  $\text{ZnO}$  揚塵實驗

[136]，其旋轉腔體試驗機法的實驗架設如圖 68 所示，圖中的 2 這個部份是放置泡棉濾材的位置，也就是傳統旋轉腔體試驗機法的微粒採樣區，在此若改變這個部份的泡棉放置，就可以得到不同定義的粉塵微粒分布，即欲分析可呼吸性粉塵的微粒分布時，則放入 20 ppi 和 80 ppi 泡棉；欲分析胸腔區粉塵的粒徑分布時，只需放入 20 ppi 泡棉；欲分析可吸入性粉塵的微粒分布則不需放入泡棉。本研究使用的旋轉腔體試驗機法實驗數據，是選用可呼吸性粉塵的微粒分布，因此進行實驗時需要放置 20 ppi 和 80 ppi 泡棉在旋轉腔體試驗機的微粒採樣區中。

實驗進行的步驟敘述如下，首先將 35 cm<sup>3</sup> 的體放入旋轉腔體底部，並且均勻平鋪。接著把泡棉裝入泡棉匣之後，依序放入旋轉腔體試驗機的微粒採樣區中，接著將出口蓋旋上並鎖緊。啟動真空幫浦與轉動馬達，抽氣量和轉速分別為 38 L/min 以及 4 rpm。採樣時間 30 分鐘，並紀錄環境的溫溼度，其 APS 和 SMPS 的採樣時間，皆設定為 2 分鐘輸出一筆數據，其相對應的微粒粒徑掃描範圍分別為 15.1~661 nm 和 542~19810 nm。



1. HEPA filter
2. Backing filter
3. ID=10 mm
4. Q=0.3 L/min, ID=3/8"
5. Q=5 L/min, ID= 9.6 mm

圖 68 旋轉腔體試驗機法實驗系統架設圖

### 第三節 作業環境奈米微粒暴露測量

#### 壹 奈米微粒即時監測儀器

本計畫利用掃描式微粒電動分析儀(TSI 3936 SMPS)，進行作業環境奈米微粒粒徑分布與數目濃度的測量。掃描式微粒電動分析儀為目前測量奈米微粒粒徑分布與數目濃度的主要設備，TSI SMPS 可測量粒徑範圍 3-1000 nm，適合作工作場所奈米微粒的定點、即時監測之用。本研究所使用的 SMPS 系統包含 TSI 3081 DMA、TSI 3022 CPC，由於工作場所奈米微粒濃度為本研究探討重點之一，因此 SMPS 的操作條件設定為 Sheath flow 15 L/min、Aerosol flow 1.5L/min，掃描範圍由 5.83 nm 至 228.8 nm，每次掃描時間為 135 秒。在進入掃描式微粒電動分析儀主體微分電動度分徑器之前，多徑微粒會先通過一慣性衝擊器去除較大微粒，和一個靜電中和器使微粒帶電情形成波茲曼分佈，帶電微粒呈波茲曼分佈後進入微分電動度分徑器，因為帶有電壓的微分電動度分徑器中心柱會和不帶電的圓筒內壁形成一電場，此時和中心柱電性相反且電動度剛好的微粒，就會從中心柱下方的狹縫被萃出，萃出的微粒就成單徑分佈的微粒，接著單徑微粒被導入核凝微粒計數器偵測微粒的濃度。藉由改變中心柱的電壓，將電壓隨時間慢慢變大，則將可得到多徑粒徑的濃度和粒徑分佈。除了掃描式微粒電動分析儀，本計畫也採用快速微粒電動度粒徑分析儀(TSI 3091 FMPS)，進行作業環境奈米微粒粒徑分布與數目濃度的測量。FMPS 使用擴散充電的方式來控制微粒的帶電量，並利用許多並連的靜電計作為微粒計數器，有效的降低了掃描微粒的粒徑範圍所需要的時間，能夠每秒得到一筆微粒粒徑分佈的資料，其粒徑範圍介於 5.6-560 nm。

在奈米微粒的表面積濃度量測方面，本研究利用TSI公司所生產的奈米微粒表面積監測儀(TSI 3550 NSAM)進行，奈米微粒表面積監測儀主要是利用擴散充電的原理使奈米微粒帶電，再利用電動電流計偵測奈米微粒的總表面積濃度。奈米微粒的偵測流程為先以2.5LPM的抽氣量抽氣進入儀器中，此氣流會被分成1LPM流經兩組濾紙(碳濾紙和HEPA濾紙)與負離子淨化器和1.5LPM的奈米微粒氣流。這兩道氣流會在混合腔體裡以逆流擴散充電的方式混合，因此奈米微粒會與含有離子的淨化空氣充分混和，利用電暈針所產生的電場使奈米微粒均勻帶

電，然後這些帶電微粒經由離子捕捉器去除多餘的正離子，最後進入電動電流計。在電動電流計裡，經由電流放大器偵測由微粒傳遞到具有電導性的濾紙上的電流大小。在奈米微粒表面積監測儀裡，微處理器控制儀器內的氣流和偵測多種操作參數，再將這些參數轉換至奈米微粒的總表面積濃度，進而能應用到監測到沈積於肺泡區或胸腔區奈米微粒的表面積。奈米微粒表面積監測儀可作個人的奈米微粒暴露評估之用，但無法採集到微粒，無法得知微粒的重量濃度及成份。

在奈米微粒的數目濃度量測方面，本研究利用手提式核凝微粒計數器(TSI 3007 CPC)進行監測，它是將微粒抽進一充滿正丁醇飽和蒸氣管內，在 37°C 下與正丁醇飽和蒸氣充分混和後送往溫度為 10°C 的冷凝管，使得正丁醇凝結在微粒的表面上，最後再利用光學計數器量測微粒的數目濃度。

另外，本研究採用 DustTrak 採集作業環境中的可呼吸性粉塵濃度。DustTrak 是一種攜帶方便、操作簡單的儀器，以內置氣泵將氣膠微粒吸入光學室中，利用偵測微粒 90 度直角光散射原理可量測懸浮微粒的總散光強度，DustTrak 可以用以即時量測可呼吸性粉塵以了解短時間內微粒的濃度變化。然而利用散光量量測微粒質量濃度的儀器，會受到微粒特性與環境條件的影響，因此在使用 DustTrak 這方便的儀器之前，必須先經過謹慎而仔細的校正。此儀器可量測的濃度範圍為 0.001 ~ 100 mg/m<sup>3</sup>，粒徑範圍為 0.1~10µm，適用於採樣環境溫度 0~50°C，本研究流量設定在 1.7 lpm。藉由簡單的操作方法，DustTrak 能夠即時且輕易的量測到微粒的可呼吸性粉塵質量濃度，並且能夠得到時間-濃度變化資料，本研究利用 DustTrak 作可呼吸性粉塵的全程質量濃度變化量測。

## 貳 微粒採樣及分析技術

本計畫使用 IOSH 個人旋風器採集可呼吸性粉塵，及利用 MOUDI (MSP Model 100) 進行工作場所中的奈米微粒現場採樣，測量作業環境空氣中奈米微粒質量濃度。MOUDI 採樣器在設計流量 30 lpm 的操作條件下可將懸浮微粒分徑為 18、10、5.6、3.2、1.8、1.0、0.56、0.32、0.18、0.10、0.056 及 <0.056 µm (after filter)。MOUDI 是一台串聯式的多階慣性衝擊器(Model 110 及 100 各有 10 及 8

個衝擊器)，其將微粒分徑的原理是利用不同粒徑微粒隨氣流加速後有不同的慣性力，大的微粒因慣性力大，所以會直接衝擊在較上層的衝擊板上，小微粒則會隨著氣流轉向而進到下一階衝擊器。為了能收集較小顆的微粒，必須逐漸將氣流加速，提高小微粒的慣性力，讓小微粒能衝擊到收集板上，所以 MOUDI 採樣器中各階衝擊器的氣流速度隨著階數增加而提高，上層衝擊器噴嘴的數目較少，孔徑也較大。將收集到的可呼吸性及奈米微粒以微量天平秤重得到微粒重量濃度。MOUDI 的最後一階衝擊板及終端濾紙使用鐵氟龍濾紙來收集 100 奈米以下的微粒。MOUDI 的最後一階是收集粒徑介於 56-100 nm 的微粒，而終端濾紙是收集小於 56 nm 的微粒，其餘各階的衝擊板皆使用噴灑矽油的鋁箔濾紙，來防止微粒的彈跳及影響奈米微粒收集的準確性，噴灑矽油的鋁箔僅做微粒重量量測，不做微粒化學成份分析。

本計畫使用的 IOSH 個人旋風器如圖 69 所示，IOSH 個人旋風器可以採集可呼吸性粉塵，微粒隨著氣流以 1.7 L/min 的流量經由進器口進入旋風器的主體內，在圓柱體內，超過 4 $\mu$ m 的微粒會因慣性力較大而衝擊在內壁上。在下部的圓錐區中因氣流旋轉速度增加，使得小於 4 $\mu$ m 的微粒會經由出口端而被收集在濾紙上。藉由採集小於 4 $\mu$ m 的微粒濃度，可知在奈米工作場所中可吸入性粉塵的濃度。

IOSH 個人旋風器及 MSP MOUDI 所使用的濾紙在秤重分析之初，需將濾紙置於乾燥箱中調理，並同時以一張空白濾紙作為標準檢查濾紙。在每組濾紙秤重之前，需將環境溫濕度控制在 RH=40 $\pm$ 5%，T=21.5 $\pm$ 1.5 $^{\circ}$ C，以防止濾紙吸收水氣的干擾，才能準確秤得粉塵重量，每組濾紙秤完後並隨機選取其中一張濾紙作重複秤重實驗。若標準空白濾紙重量偏差太大，則需重新校正天平直到合乎標準才繼續秤重。



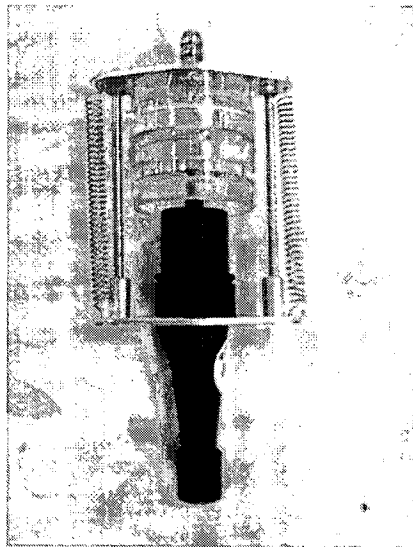


圖 69 IOSH 旋風器照片圖。

爲了分辨作業場所奈米微粒的來源，採集到的可呼吸性粉塵(IOSH 旋風器)及奈米微粒(MOUDI)樣本必須進行成分分析，才可以求出作業場所的奈米微粒污染真正的貢獻量。本計畫是利用感應耦合電漿放射光譜儀(ICP-OES, OPTIMA 2100 DV, PerkinElmer) (如圖 70 所示)進行微粒樣本的金屬成份分析。

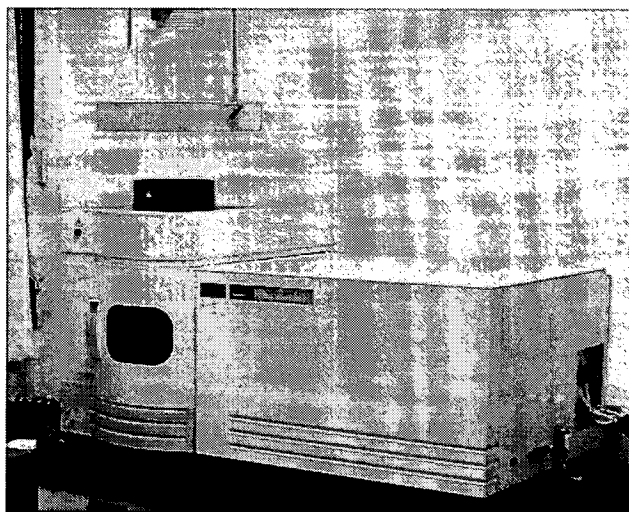


圖 70 感應耦合電漿放射光譜儀照片圖。

感應耦合電漿放射光譜儀主要部分包括進樣系統、電漿放射及光學系統三部分；其流程爲將樣品溶液經由霧化器霧化，進入感應耦合電漿中，霧化樣品在高能量電漿中氣化、原子化進而游離化；當離子化離子受到更高溫度游離化時，離

子在激發狀態不穩定之情況下必回到基態離子能階；在此過程中所有元素皆有其特定之光譜線且離子濃度越高其光之強度越強；再利用電子倍增器或固態半導體偵測器如等偵測定量。在進行感應耦合電漿放射光譜儀分析前須先將濾紙樣品進行消化步驟。本研究濾紙使用標準方法進行消化，樣品前處理流程圖如圖 71 所示。首先將濾紙浸泡至 4 份硝酸及 1 份過氧酸混合的溶液中 30 分鐘，隨後進行加熱消化處理，消化至澄清且溶液約為 0.5 mL 時，以配製的稀釋用酸，定量至固定體積後，使用感應耦合電漿光學發射光譜進行金屬離子的分析。

樣品前處理流程圖

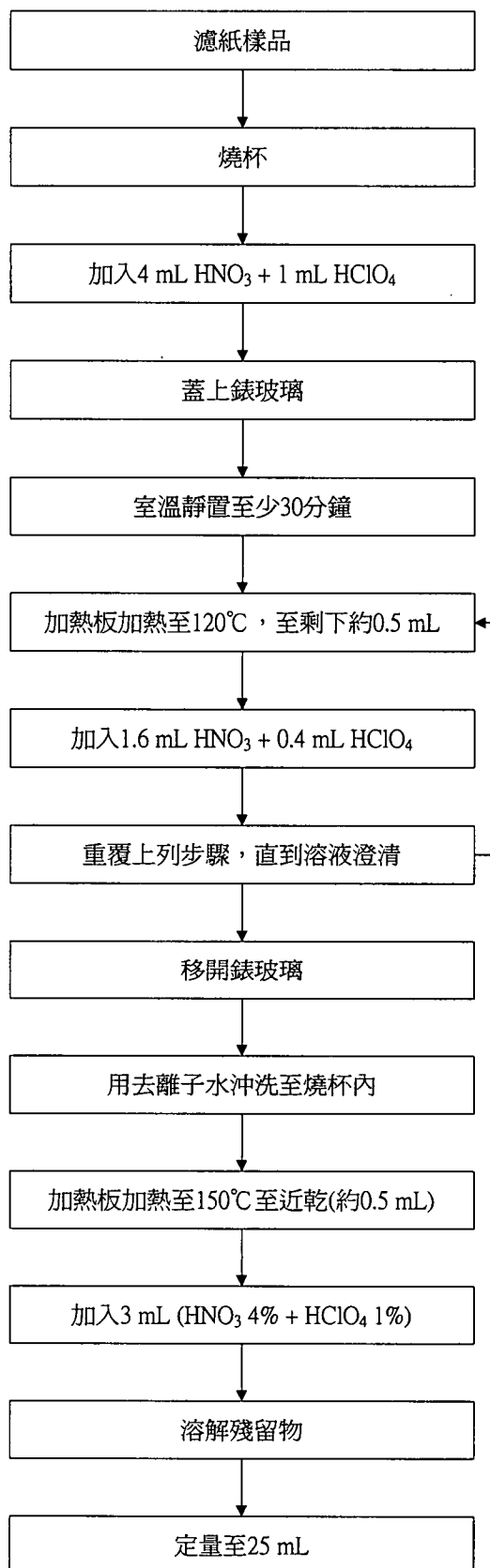


圖 71 樣品前處理流程圖

### 參 作業場所奈米微粒測量

本研究分別於 97 年 4 月 28(第一次)日、6 月 5 日(第二次)及 8 月 7 日(第三次)在某一二氧化鈦粉體包裝區進行現場微粒採樣及其粒徑分佈及濃度的即時量測。台灣石原產業公司主要為生產鈦白粉產品，其製造流程如圖 72 所示，主要為先將二氧化鈦的原料粉碎成較細小的顆粒分級後，再利用硫酸酸化水洗使顆粒的分散性、耐候性更好，再經由過濾、洗滌去除二氧化鈦粉漿中的游離鹽類，然後將其脫水、乾燥去除大部分的水分，接著再以蒸氣粉碎的方式將二氧化鈦顆粒研磨成更細小的微粒，最後利用空氣輸送的方式將二氧化鈦微粒送至粉體包裝區進行包裝。

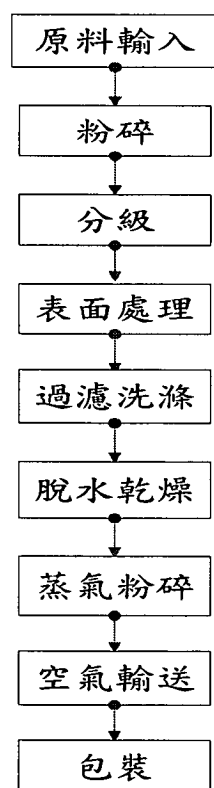


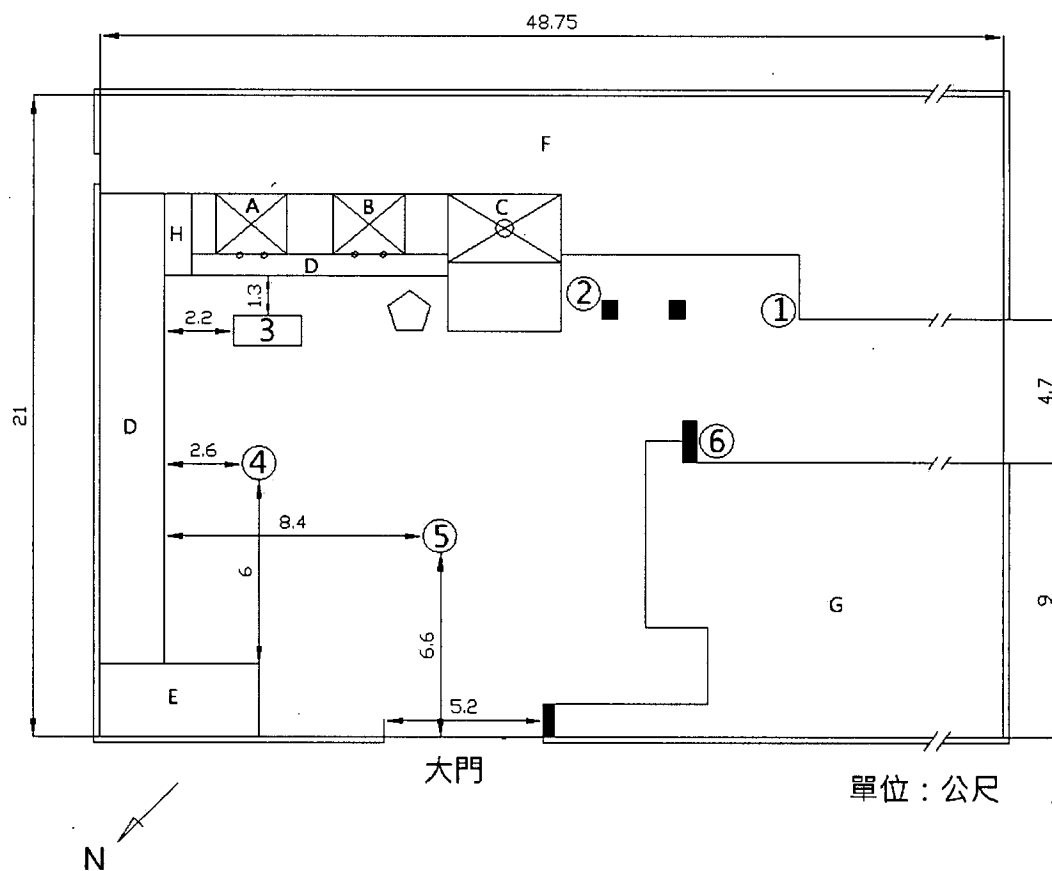
圖 72 製程流程圖

圖 73 為工廠的平面圖，量測點 1~6 為自動監測儀器的移動點量測位置，1、3、4、6 為固定點量測位置，作業場所照片如圖 74 所示。量測點照片如圖 75 所示。

在 1~6 移動點量測所使用的儀器有 FMPS (TSI Model 3091, Fast Mobility Particle Sizer) 1 台、Aerosol Trak (TSI Aero Trak 9000, Nanoparticle Aerosol Monitor)

1 台、手提式 CPC (TSI Model 3007, Condensation Particle Counter) 1 台、2 個 IOSH 旋風器，量測方式為將上述儀器放置在移動推車上在粉體包裝區進行循環性量測，每次循環都由量測點 1 開始至量測點 6 結束，每個量測點每次量測時間為 5 分鐘，每次循環量測約歷時 35 分鐘，一天內共做 4 次循環量測。手提式 CPC 及 FMPS 量測微粒的數目濃度及粒徑分布，Aerosol Trak 量測胸腔區微粒的總表面積濃度，IOSH 旋風器藉由採集粒徑在  $4\mu\text{m}$  以下的可呼吸性微粒的重量濃度(RPM, Respirable Particle Mass)。2 台 IOSH 旋風器分別使用鐵氟龍濾紙和酯化纖維素濾紙，採樣後的鐵氟龍濾紙利用微量天平量秤微粒重量得到 RPM 濃度，利用 ICP/OES 分析酯化纖維素濾紙得到可呼吸性微粒中的二氧化鈦及其他金屬濃度。

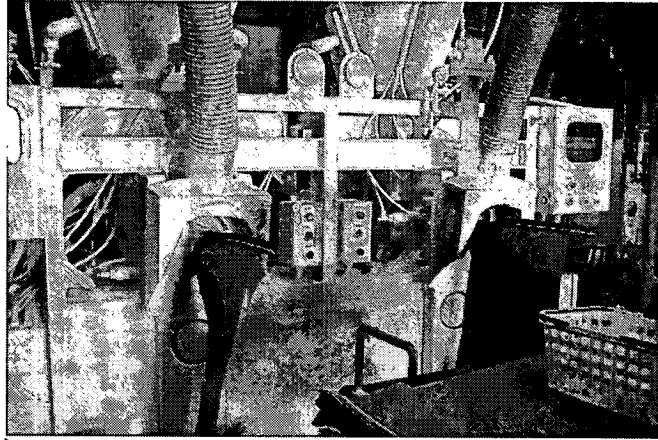
在 1、3、4、6 固定點量測所使用的儀器有 2 個 IOSH 旋風器/點，量測點 3 另有 2 台 MOUDI (Model 110, MSP Corp., St. Paul, USA) 及 1 台 Dust Trak，量測方式為將上述儀器放置在粉體包裝區的固定量測點進行至少 8 小時的粉體採樣。IOSH 旋風器的採樣高度為 1.5 公尺，其採樣濾紙及分析方式與移動點量測一樣。量測點 3 的 2 台 MOUDI 可量測懸浮微粒分徑為 18、10、5.6、3.2、1.8、1.0、0.56、0.32、0.18、0.10、0.056 及  $<0.056\ \mu\text{m}$  (After Filter)等 10 個粒徑區間的微粒重量濃度及粒徑分佈，MOUDI 的採樣高度為 1 公尺，其中 MOUDI A 的入口及第一階到第八階使用經矽油塗敷的鋁箔濾紙，第九階到 After Filter 使用鐵氟龍濾紙；MOUDI B 的入口及第一階到第八階使用經矽油塗敷的鋁箔濾紙，第九階到 After Filter 使用酯化纖維素濾紙，採樣後鋁箔濾紙及鐵氟龍濾紙利用微量天平量秤得到各階層的微粒重量濃度，接著利用 ICP/OES 分析酯化纖維素濾紙得到超細微粒的重金屬濃度。



- |   |  |                |
|---|--|----------------|
| 1. IOSH旋風器 2 台<br>即時監測儀器                              | 點1.點2.距離 6.4 m                                 | A.B.C. 粉體包裝區   |
| 2. 即時監測儀器   | 點2.點3.距離 10.4 m                                | D. 輸送帶         |
| 3. IOSH旋風器 2 台<br>Nylon旋風器 2 台<br>MOUDI 3 台<br>即時監測儀器 | 點3.點4.距離 4.3 m                                 | E. 裝貨台         |
| 4. IOSH旋風器 2 台<br>即時監測儀器                              | 點4.點5.距離 6.3 m                                 | F. 生產設備區       |
| 5. 即時監測儀器   | 點5.點6.距離 9.6 m                                 | G. 機台          |
| 6. IOSH旋風器 2 台<br>即時監測儀器                              | 點6.點1.距離 4.7 m                                 | H. 通往生產設備區樓梯   |
|   | 點5.大門距離 6.6 m                                  | ◡ 風扇位置 (往C送風)  |
|   | 即時監測儀器：<br>SMPS、CPC、Dust Trak<br>、Aerosol Trak | ■ 大柱子<br>■ 小柱子 |

圖 73 二氧化鈦粉體廠平面及採樣位置圖。

(a)



(b)

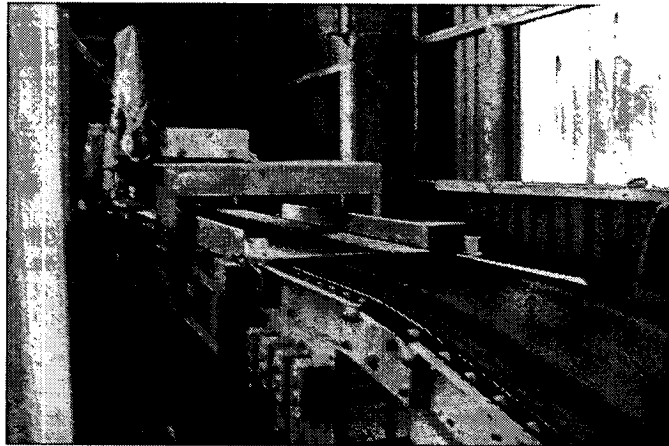


圖 74 作業場所照片(a)粉體包裝袋區 (b)輸送帶區

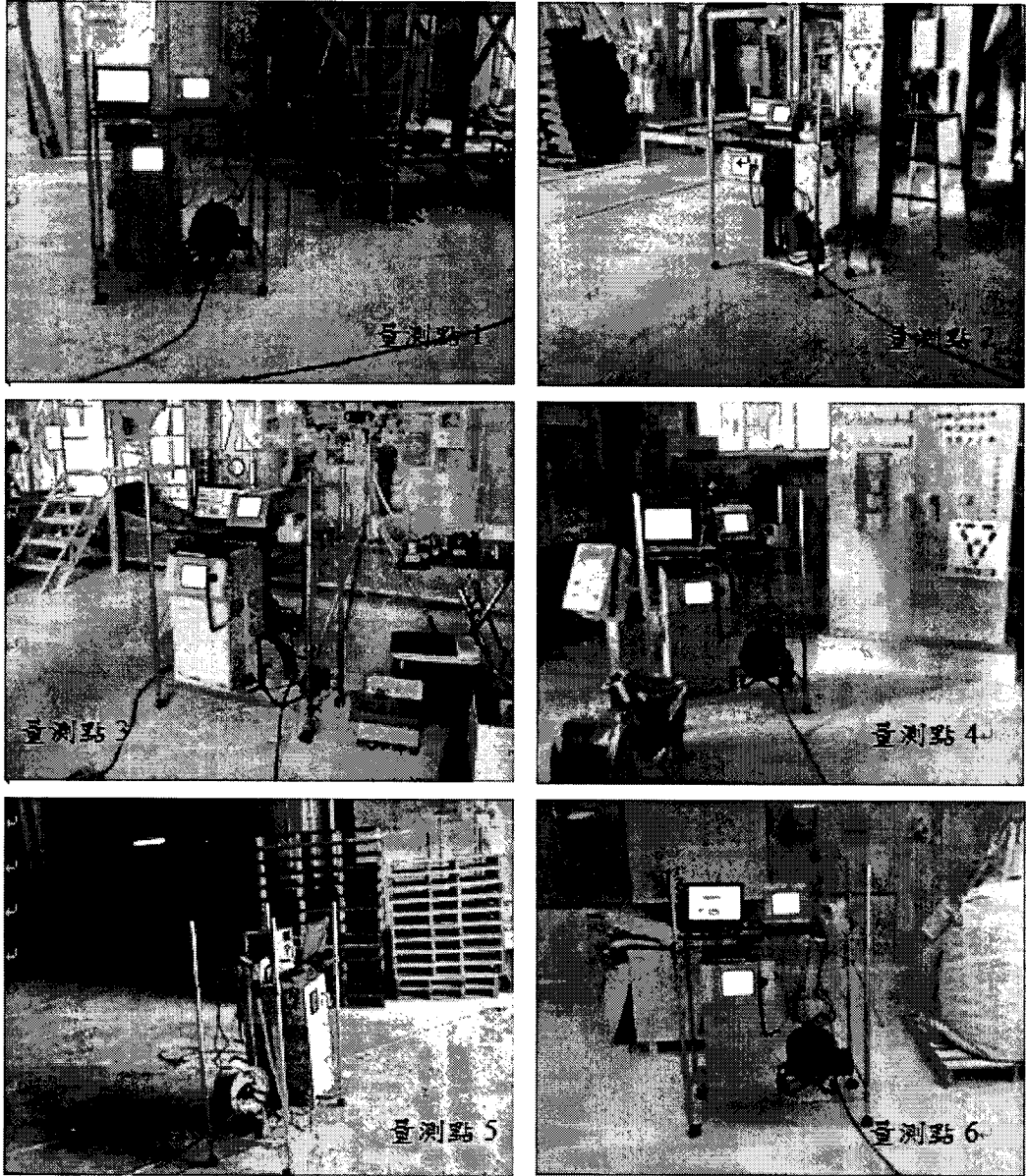


圖 75 各個量測點照片



97年9月19日在某一奈米碳管製造廠進行微粒濃度監測，量測方法為利用FMPS量測包裝奈米碳管時微粒的數目濃度和粒徑分布，儀器進氣口接一條鐵氟龍管至通風櫃裡抽氣，在操作前先在通風櫃內外量測微粒濃度的背景值。奈米碳管作業流程為先在通風櫃裡將觸媒倒在石英管上，再用鋁箔紙包覆石英管避免觸媒逸散，之後將石英管拿至石棉管中加熱產生奈米碳管，奈米碳管在石英管中生成後再將石英管拿至通風櫃中刮除奈米碳管且進行分裝，最後再利用化學藥劑純化奈米碳管。圖76為奈米碳管製造廠平面圖。

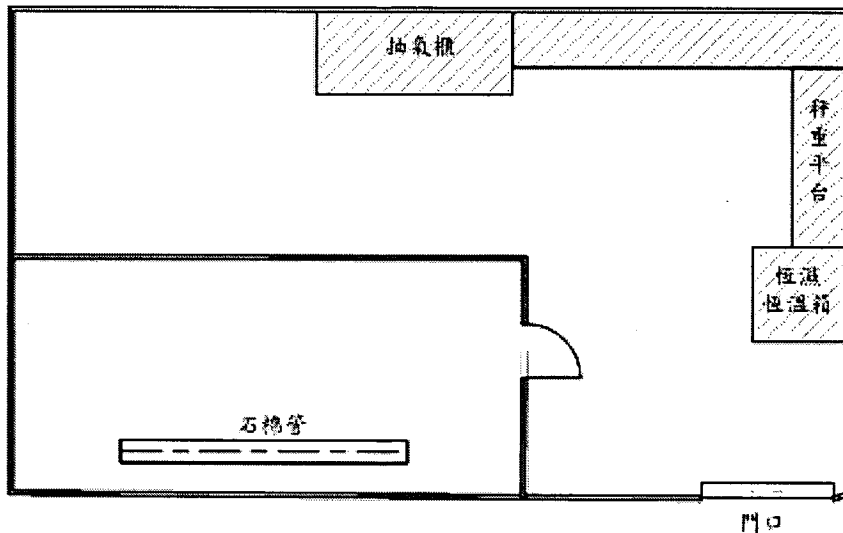


圖 76 奈米碳管製造廠平面圖

97年10月22號在某一衛浴設備製造廠進行微粒採樣及微粒濃度量測，本次採樣所使用的即時量測儀器為FMPS(快速電動度微粒分徑器)、MOUDI(微孔均勻附著衝擊器)和IOSH旋風器。FMPS主要用途為量測微粒的數目濃度和粒徑分布，其量測的粒徑為5.6~560 nm，MOUDI主要採集微粒的重量濃度，而IOSH旋風器為採集粒徑在4微米以下的可呼吸性微粒重量濃度。微粒中的金屬成分為利用ICP-OES(感應耦合電漿放射光譜儀)分析。本次微粒濃度量測選擇在衛浴設備燒成區量測位置示意圖如圖77所示，其目的為將塗敷過釉料的衛浴設備送往軌道燒成帶，之後經1200℃的高溫燒結成最終成品，而軌道燒成帶總長為90m。

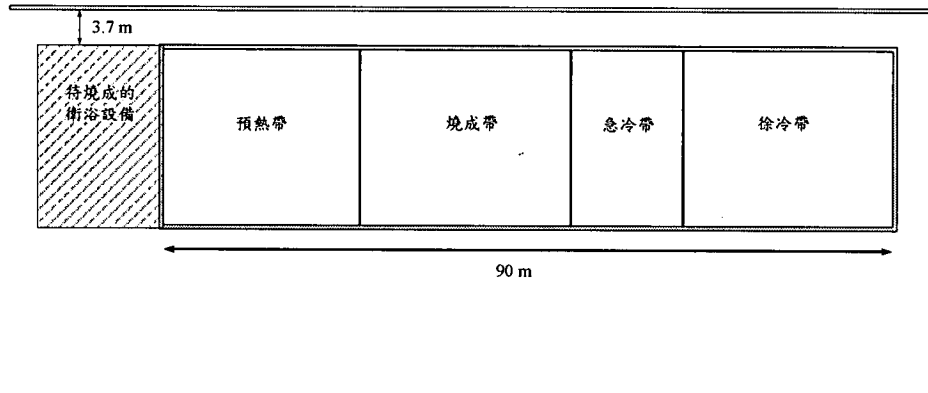


圖 77 衛浴設備燒成區示意圖

## 肆 QA/QC

### 1. 濾紙之 QA/QC 管制

檢查每張新的採樣濾紙是否為正確之型式與大小？是否有小破洞及微粒？及其他不良處，不合格之濾紙應丟棄不用。每一張濾紙都應有其獨特之編號以及濾紙資訊。一般濾紙的編號無法直接標示在濾紙上面，可將濾紙置於保存容器中(例如直徑約50mm的壓克力小盒子)，將編號寫在貼紙上並貼於盒子底部。本研究採樣時共使用MOUDI兩台及IOSH 旋風器六組，用到的濾紙有三種，包括：鐵氟龍(Zefluor P5PJ037, Pall Corp., New York, USA)、酯化纖維素濾紙(Methyl Cellulose Ester)及鋁箔濾紙，其中鋁箔濾紙用於MOUDI中防止微粒彈跳(塗敷矽油)、觀看奈米微粒的形貌(未塗敷矽油)及秤重。編號的方式與採樣時間、何種採樣器及其編號、濾紙材質等，說明如圖78所示。

使用IOSH旋風器採樣時，我們在濾紙編號最後一碼分別用T和M來辨識鐵氟龍和酯化纖維素的濾紙。此外，鐵氟龍實驗室(LAB)空白及現場(F)空白濾紙也都各有兩片，作為查核之用。

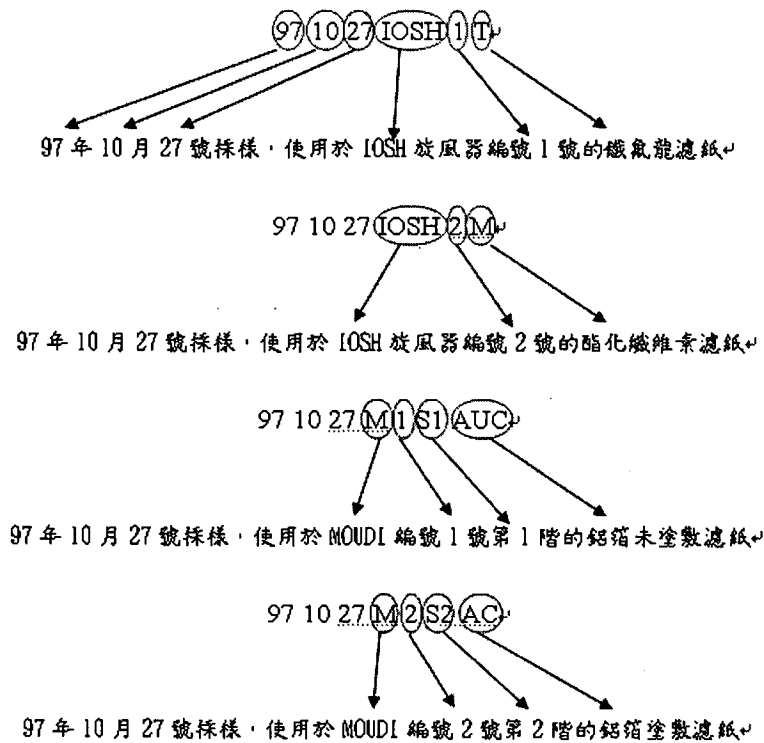


圖78 本研究濾紙編號的方式

## 2. 稱重程序

- (1)新買的濾紙必須立刻儲放在調理環境進行調理，直到採樣前30 天內再進行稱重。
- (2)分析天平必須被置於與調理濾紙相同的控制環境中，調理過之濾紙應立刻稱重，不可在調理後稱重前這段時間內再暴露於其他環境條件。
- (3)採樣前後濾紙稱重之調理條件必須是相同的(相對溼度維持在 $\pm 5\%$  以內)。
- (4)採樣前後濾紙的稱重必須使用相同的天平，使用靜電中和器中和濾紙的靜電。濾紙採樣前後之稱重儘量由同一個人執行。
- (5)天平使用者於每次稱量前執行零點檢查，每個月以經校正之標準砝碼執行刻度校正，每六個月以經校正之標準砝碼執行重複校正。參考砝碼質量校正：參考砝碼應定期送校(校正頻率三年一次)，以確認有否因砝碼使用過久或污染而造成誤差。
- (6)採樣前秤重之結果必須填寫在濾紙秤重記錄表。
- (7)採樣完成當天內由採樣人員收回採樣後樣品濾紙，以避免濾紙放置過久被污染。
- (8)由採樣器上取下的採樣完成濾紙需裝於壓克力濾紙匣內，於一日內送回實驗

室秤重，填寫「樣品濾紙監管記錄表」並移交分析人員，並於二星期內分析完成，以避免濾紙上物質起變化。

### 3.樣品分析 QA/QC

- (1) 所有品管數據應加以保存以利日後參考或查閱。
- (2) 本實驗儀器偵測極限(IDL)至少每 3 個月重新製作 IDL 一次並保存紀錄。IDL 係連續分析 7 次試劑空白溶液，以其 3 倍之標準偏差值表示。
- (3) 本實驗之方法偵測極限(Method Detection Limit, MDL)測定步驟係利用在檢量線上的感度開始改變時的濃度作為預估方法偵測極限。在試劑水中添加標準品，其濃度至少等於或相似於預估方法偵測極限。取七個樣品分別經過分析步驟，用以計算方法偵測極限值。其方法偵測極限 (MDL) 為標準偏差的 3 倍。
- (4) 分析過程中須監測內標準品信號強度之變化情形，當樣品中任何內標準元素之信號強度衰減至最初檢量線中內標準品信號強度 30%以下時，則可能發生基質效應，儀器之偵測極限會因基質干擾效應之發生而改變。當發生上述情形時，可依下列程序檢查導致內標準品信號衰減之原因：首先可利用分析檢量線空白溶液中之內標準信號，確認儀器之檢測效能(Analytical performance) 是否有明顯地漂移現象，若檢量線空白溶液中之內標準信號強度亦出現明顯衰減現象，則需終止所有分析工作，待查明原因，並解決導致儀器分析效能改變因素後，始得重新建立檢量線，並分析導致基質效應之樣品；如導致內標準品信號衰減原因不是源自儀器效能之飄移時，則可利用稀釋方式，降低樣品中基質濃度，以達到移除基質干擾之目的。此時，可根據內標準品信號衰減之嚴重程度選擇適當之稀釋倍數進行樣品稀釋，並重新添加適量內標準品進行分析，如果第一次稀釋無法消除基質干擾問題，即必須重複上述稀釋程序直到內標準品信號強度提升至檢量線標準溶液中內標準品信號強度 30%以上。
- (5) 每 12 小時或於開始分析樣品前，需以干擾查驗液進行分子離子干擾之查核工作。由於干擾查驗液中部分元素有可能會發生沉澱問題，故在檢測過程中

應注意是否有類似問題發生。

- (6) 為得到高品質分析數據，藉由同時測量分析物以外之干擾離子，作為決定是否須使用校正方程式之依據。當儀器分析過程若有質譜性干擾，於分析結果中必須針對被干擾之元素，並註明被校正之干擾信號佔所有分析信號之百分比及校正方程式中未置入校正之干擾物種。
- (7) 儀器檢量線查核
  - A. 以檢量線空白溶液和檢量線確認溶液進行檢量線查核。
  - B. 每分析 10 個樣品，須以檢量線確認溶液和檢量線空白溶液進行檢量線查核。另外，在分析樣品前後，也必須以上述查核溶液進行檢量線查核。
  - C. 檢量線確認溶液之分析結果均必須小於配製值之 10%，否則必須停止分析，待問題修正後，再重新利用檢量線確認溶液進行儀器之校正查核。另外，當發現檢量線查核結果不符時，受影響之樣品應利用重新製作之檢量線再次進行分析。
  - D. 每個元素之檢量線空白值必須小於 2 倍 MDL 值。若發現檢量線空白值大於 2 倍 MDL 值時，必須檢查誤差原因並改善後，受影響之樣品亦必須重新分析。
- (8) 配製空白分析主要為確認待測樣品是否於樣品分析過程中遭受污染。對於每一批次樣品之分析測定，至少需包括一個以上之方法空白樣品，且該樣品必須依循完整之樣品製備程序處理。方法空白樣品之製備為與樣品採樣相同過程進行空白採樣，並與萃取樣品微粒上金屬成分相同步驟進行萃取，再以完整分析程序進行分析。分析步驟包括前處理、消化處理、樣品稀釋、過濾處理和分析測定等。
- (9) 實驗室品管樣品(LCS)應以與待測樣品相同之前處理方法、測定及品質管制程序進行分析，每批樣品或至少每 20 個樣品應進行一個實驗室品管樣品分析。
- (10) 同一批次或 20 個樣品做一次重複分析，若同時有不同基質之樣品時，每種基質之樣品均需進行重覆分析。對於分析物濃度大於儀器偵測極限值 100 倍

之樣品而言，其重覆分析之相對百分偏差值範圍必須在 $\pm 20\%$ 以內。

(11) 於消化後之樣品或經稀釋樣品中添加適量之標準品，其回收率應在 75~125% 之間或是在實驗室自訂之管制標準內。如果添加標準品之回收率不在管制範圍內，樣品必須加以稀釋並重新分析，以確認是否已有效抑低基質效應。亦可直接利用標準添加法進行定量的工作。

(12) 稀釋測試(序列稀釋)：

如果樣品中分析物之濃度落在儀器線性範圍內，即可利用稀釋法來確認是否有非質譜性之干擾存在。一般而言，若稀釋 5 倍之分析值與未稀釋樣品分析值間之差異超過 10% 以上時，則可能發生非質譜性干擾效應。同一基質之批次樣品中，至少每 20 個樣品必須做一個稀釋測試，以確認是否有非質譜性干擾。

#### 第四節 奈米微粒過濾控制技術性能

本研究的奈米微粒過濾實驗系統如圖 79 所示。以 Nilfisk GM80 工業級高效率 HEPA 真空吸塵器作為實驗系統流量供應來源，在吸塵器的前端設置一個大流量的 HEPA filter 以提供吸塵器的大量空氣，多徑奈米微粒產生源為一蒸發-凝結系統，包括一高壓空氣供給器、管型高溫爐 (1200°C Split Hinge Tube Furnace, Model HTF55322C, Krackeler Scientific Inc., Albany, NY)、浮子流量計以及稀釋器。

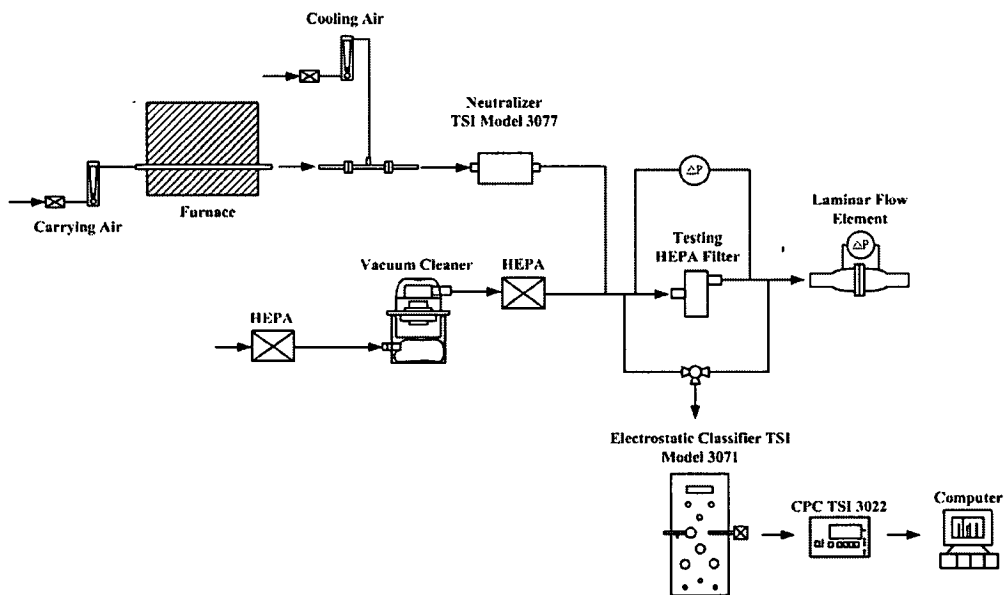


圖 79 奈米微粒過濾實驗系統配置

由於在先前的實驗中發現，吸塵器馬達本身會因轉動磨損而產生微粒，且濃度高，因此實驗系統改為在馬達出口與待測試吸塵器 HEPA filter 間接另一 HEPA filter 以過濾馬達所產生之微粒，量測待測試吸塵器 HEPA filter 上下游顆粒數目濃度計算去除效率。測試奈米微粒導入前先經過電性中和器 (Aerosol Neutralizer, TSI Model 3077) 以去除微粒靜電，與通過 HEPA filter 的乾淨空氣混和進入待測試 HEPA filter，實驗時利用 DMPS/C 系統 (Differential Mobility Particle Sizer, TSI Model 3932，包含 Electrostatic Classifier, TSI Model 3071 與 Condensation Particle Counter, TSI Model 3022) 量測吸塵器進口與出口微粒數目濃度分布，再據以計算待測試吸塵器 HEPA filter 對奈米微粒的除塵效率。採樣時，上游與下游各以 DMPS/C 系統掃描微粒數目濃度分部各六次，並作三重複。流量在待測試吸塵器 HEPA filter 後方裝設層流流量計 (Laminar flow element, Meriam Instrument, Model 50MC2-2, A Scott Fetzer company) 測得，藉由層流流量計上的數位壓差計 (Pressure transducer, Type 223B, MKS Baratron) 所得的壓差值可換算得到氣體的流量。

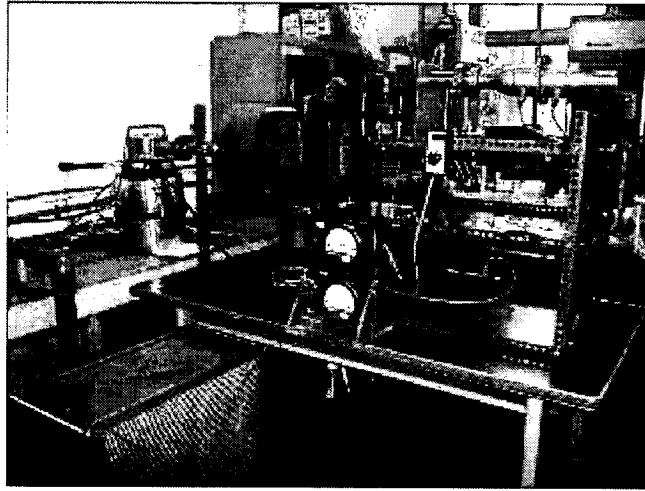


圖 80 奈米微粒過濾實驗系統照片

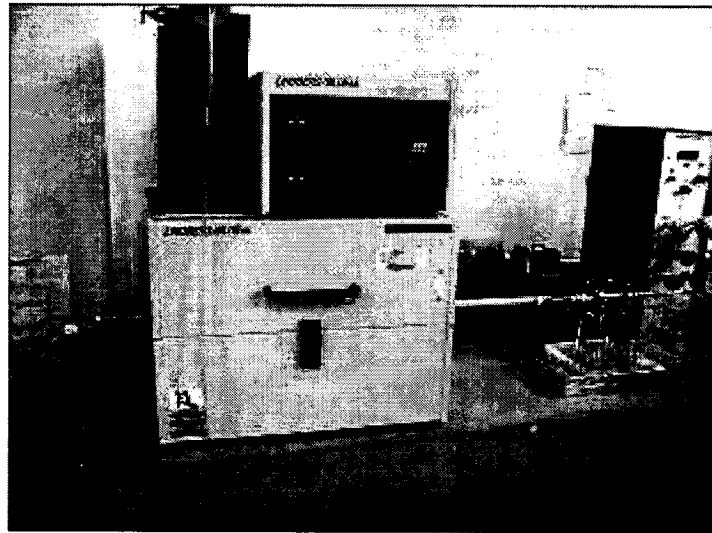
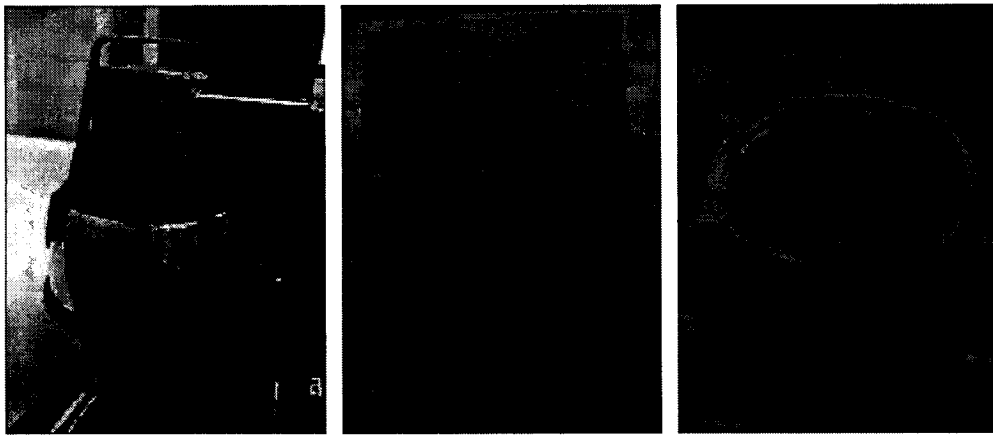


圖 81 奈米微粒產生源，蒸發-凝結系統

在先前的實驗中發現，吸塵器馬達會因轉動磨損而產生微粒。因此測試比較國內外工業用高效率 HEPA 真空吸塵器機身馬達所產生微粒的數目濃度分布。研究所測試的國外工業級高效率 HEPA 真空吸塵器廠牌為 Nilfisk GM80 HEPA 吸塵器(圖 82)，微粒經三道過濾，吸入會先經過集塵紙袋、濾布，馬達後方裝設有 HEPA filter(如圖 83)。Nilfisk GM80 吸塵器最大流量約為 2280 L/min，附有馬達調速器(GM80 Variable Speed Control, Nilfisk)，可自由設定馬達轉速。實驗測試使用 HEPA 濾材的型號為 Nilfisk, Type HEPA-H13，是為摺疊濾材，直徑 14 公分、高 7 公分，總計共有 230 折，過濾空氣經過之總面積約為 3450 cm<sup>2</sup>，原廠測試效率 DOP>99.95%，MPPS>99.95%，DIN24184>99.997% (Q<sub>Max.</sub>=40 L/sec)。





(a)

(b)

(c)

圖 82 Nilfisk GM80 HEPA 吸塵器 (a. 吸塵器本體 b&c. 吸塵器內部的集塵紙袋與濾布，氣流會先經過集塵紙袋在流經濾布，濾布上方式吸塵器馬達，最後的出口端有 HEPA filter)

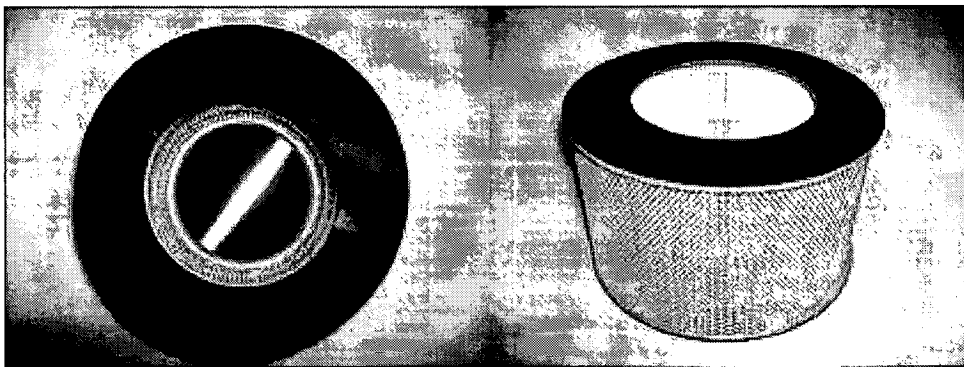


圖 83 HEPA, Nilfisk, Type HEPA-H13

而國內工業用吸塵器則是使用由亞拓電器股份有限公司設計製造的 TOSHIBA TVC-10.0 工業用真空吸塵器(如圖 84)，微粒僅有兩道過濾，吸入會先經過濾袋、標榜可過濾大於  $0.3\mu\text{m}$  以上微粒之空氣濾清器，最後才是馬達。由於國內在市面上並未能找到吸塵器用高效率之 HEPA 濾罐，因此測試國內產工業用吸塵器現有標榜可過濾  $0.3\mu\text{m}$  以上微粒之空氣濾清器對微粒去除效率。實驗測試之空氣濾清器為亞拓電器股份有限公司所生產的空氣濾清器，型號 V03063P，同樣是摺疊濾材，直徑 20 公分、高 18 公分，總計共有 180 折，過濾空氣經過之面積約為  $4320\text{ cm}^2$ ，標榜可過濾顆粒粒徑大於  $0.3\mu\text{m}$  的微粒。TOSHIBA TVC-10.0

僅能做兩段調速，分別約為 2200 L/min、1900 L/min。使用大型 HEPA filter 過濾吸塵器進口微粒，以 DMPS/C 系統量測吸塵器出口微粒數目濃度得到吸塵器馬達所排放之微粒數目濃度分布。

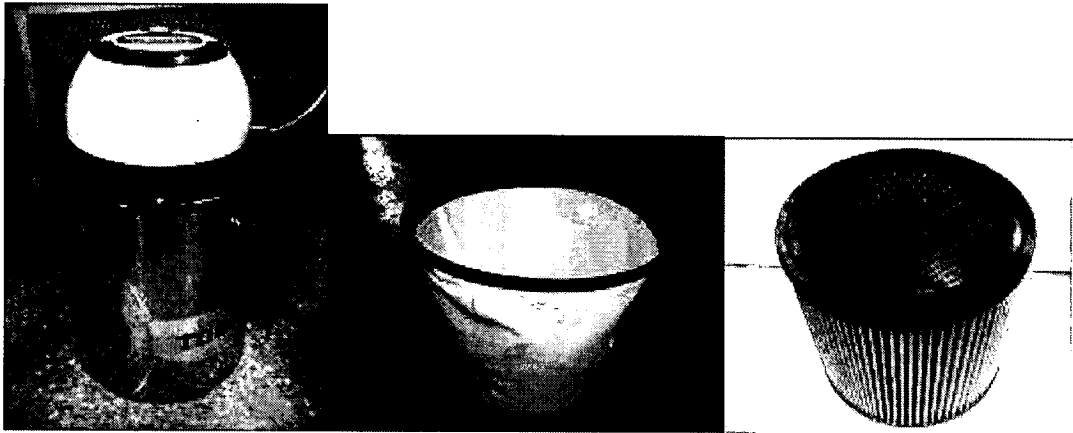


圖 84 國內真空吸塵器 TOSHIBA TVC-10.0 與內部裝置

吸塵器馬達微粒排放濃度經量測吸塵器進口與出口的微粒數目濃度，相減而得：

$$C_{moter} = C_{vacuumoutlet} - C_{vacuuminlet}$$

而實驗使用多徑食鹽奈米微粒做去除效率測試，將測試微粒由待測吸塵器 HEPA filter 前導入，導入微粒先經電性中和器去除靜電與過濾後吸塵器排放氣體混和進入 HEPA filter holder，以 DMPS/C 系統量測 HEPA filter 上下游微粒數目濃度分布，以計算其對奈米微粒的過濾效濾：

$$\eta_{filtrationefficiency} = \frac{(C_{upstream} - C_{downstream})}{C_{upstream}}$$

分別測試國內外吸塵器用空器濾罐各一，比較四種不同流量下空器濾罐對奈米微粒的過濾效濾，流量控制使用 Nilfisk GM80 馬達調速器( GM80 Variable Speed Control, Nilfisk)。

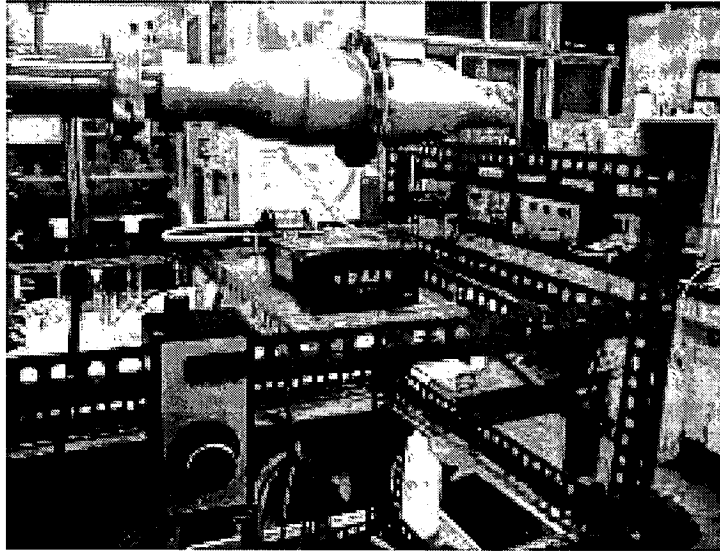


圖 85 實驗系統流量控制(以馬達調速器對應層流流量計讀值控制流量)

## 第四章 結果與討論

### 第一節 實驗室奈米揚塵逸散測試

本研究測試的粉末總共有三種材料(二氧化鈦、氧化鋅及二氧化矽)，每種材料各 2 種初始粒徑範圍(奈米級和次微米級)，進行實驗時每種粉體使用的重量分別整理在表 25 以供參考，各粉體的物理特性則可參考表 26。下面分別將每種粉體逸散的微粒濃度和微粒粒徑分布隨時間的變化情況，以 2 分鐘、5 分鐘及 15 分鐘三幅圖和一幅總微粒濃度變化圖來呈現，其中在奈米級二氧化鈦和微米級氧化鋅，此兩種粉體的數據有與呂等人的旋轉腔體試驗機法之可呼吸性粉塵粒徑範圍的數據做比較[136]，以方便了解和探討漩渦震盪法、SSPD 和旋轉腔體試驗機法三者間的不同與差異。由於三種實驗系統所使用的粉體重量皆不相同，所以將逸散粉體的數目濃度再分別除上實驗時使用的粉體重量(以克為單位)，用以了解單位粉體重量之微粒逸散狀況。

表 25 實驗時使用的粉體重量

粉體種類	SSPD	Vortex shaker	Rotating Drum
TiO <sub>2</sub> , nano	4.2mg±1mg	130mg±1mg	4.5g±1mg
TiO <sub>2</sub> , submicron	26mg±1mg	950mg±1mg	
ZnO, nano	11mg±1mg	350mg±1mg	
ZnO, submicron	20.7mg±1.8mg	600mg±1mg	21.14g±1mg
SiO <sub>2</sub> , nano	2.84±1mg	56mg±1mg	
SiO <sub>2</sub> , submicron	33mg±1mg	580mg±1mg	

表 26 粉體的物理特性資料

粉體種類	粉體生產廠商和粉體型號	初始粒徑大小	顯在密度	晶體密度
奈米級二氧化鈦 TiO <sub>2</sub> , nano	德國 Degussa, AEROXIDE® TiO <sub>2</sub> P25	21 nm	0.13 g/cm <sup>3</sup>	3.95 g/cm <sup>3</sup>
次微米級二氧化鈦 TiO <sub>2</sub> , submicron	台灣石原產業 (Isk Taiwan)	200-300 nm	0.95 g/cm <sup>3</sup>	3.95 g/cm <sup>3</sup>
奈米級氧化鋅 ZnO, nano	永朕材料科公司 (Yong-Zhen)	30-50 nm	0.35 g/cm <sup>3</sup>	5.61 g/cm <sup>3</sup>
次微米級氧化鋅 ZnO, submicron	台灣慈陽公司 (Sun Beam)	250-300 nm	0.60 g/cm <sup>3</sup>	5.61 g/cm <sup>3</sup>
奈米級二氧化矽 SiO <sub>2</sub> , nano	永朕材料科公司 (Yong-Zhen)	10-30 nm	0.056 g/cm <sup>3</sup>	2.2 g/cm <sup>3</sup>
次微米級二氧化矽 SiO <sub>2</sub> , submicron	永朕材料科公司 (Yong-Zhen)	800-1200 nm	0.58 g/cm <sup>3</sup>	2.2 g/cm <sup>3</sup>

### 壹 奈米級二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>, nano)

此種粉體經過三種實驗系統後的微粒濃度分布狀況，在下面將以 2 分鐘、5 分鐘以及 15 分鐘，三個時間點的微粒濃度分布圖來呈現。由於三種實驗系統使用的粉體重量皆不同，所以將數目濃度除上實驗時使用的粉體重量，以便比較和了解單位粉體重量之微粒逸散狀況。觀察圖 86-圖 88 可以發現在實驗進行的 15 分鐘內 SSPD 的單位粉體重量分散出來的微粒濃度為三者中最高，漩渦震盪器得到的逸散濃度次之，最低的為旋轉腔體試驗機法。若比較三種系統之總微粒濃度隨時間改變的狀況，可以發現漩渦震盪器在 15 分鐘內逸散微粒的濃度變化遠大於另外兩者，由圖 89 可以清楚發現這個趨勢。三種實驗系統得到的粉體逸散微粒的眾數粒徑，皆落在次微米的大小，而微粒粒徑分布的趨勢形狀，在 15 分鐘內 SSPD 和旋轉腔體試驗機法的眾數微粒粒徑值之變化量相對於漩渦震盪法而言並不大，漩渦震盪法的眾數微粒粒徑之最大值與最小值的差異可達 188nm，且其眾數微粒粒徑會隨著時間的增加而有明顯的遞減，以及濃度下降的趨勢。

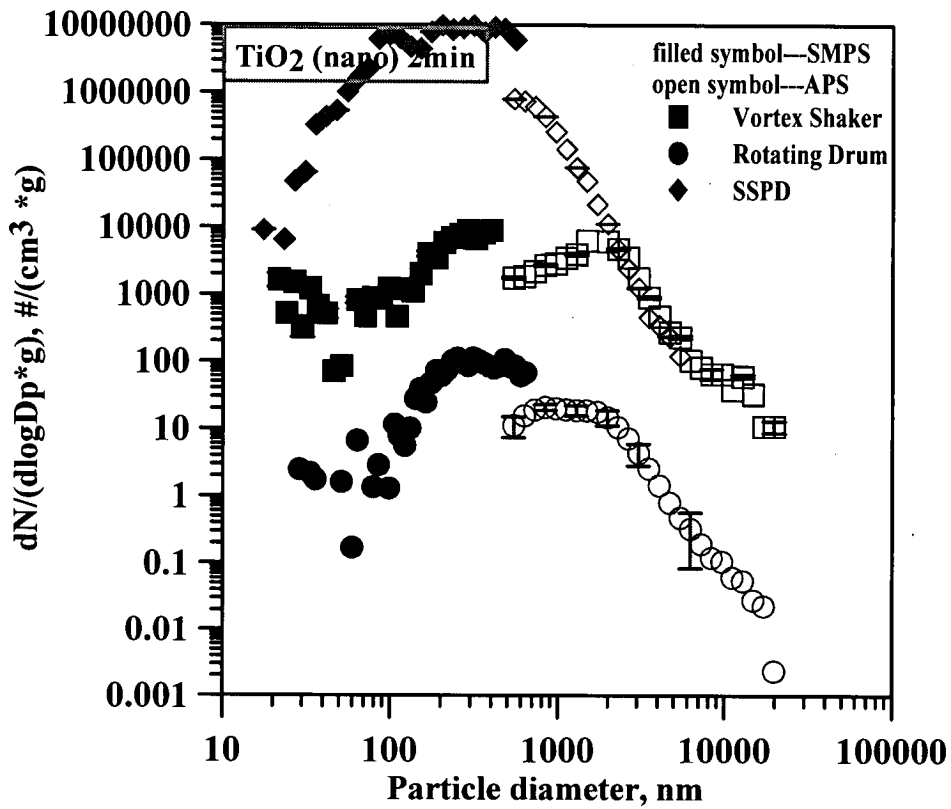


圖 86 奈米級二氧化鈦粉體在 2 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

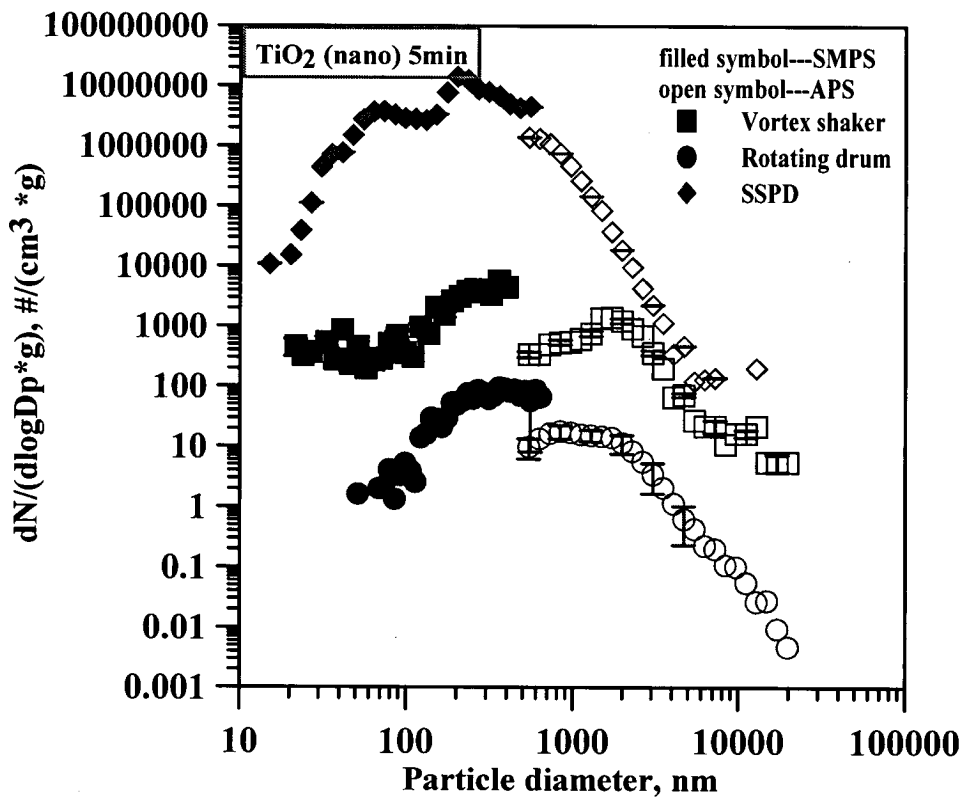


圖 87 奈米級二氧化鈦粉體在 5 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

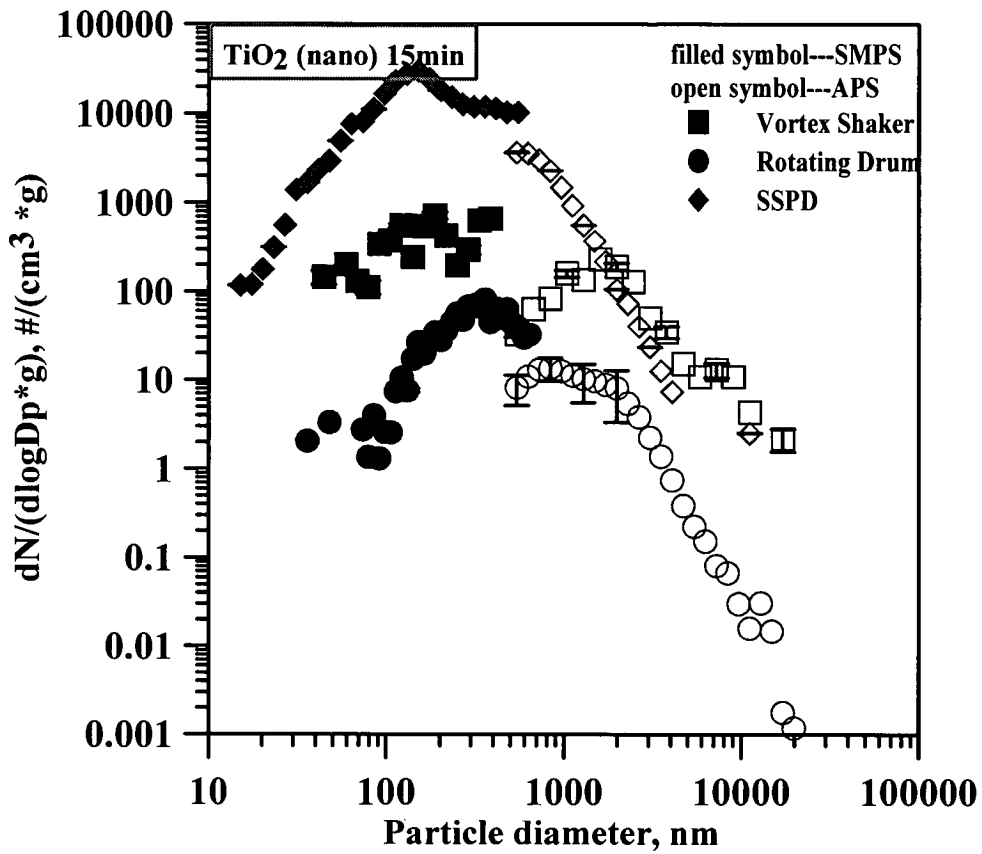


圖 88 奈米級二氧化鈦粉體在 15 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

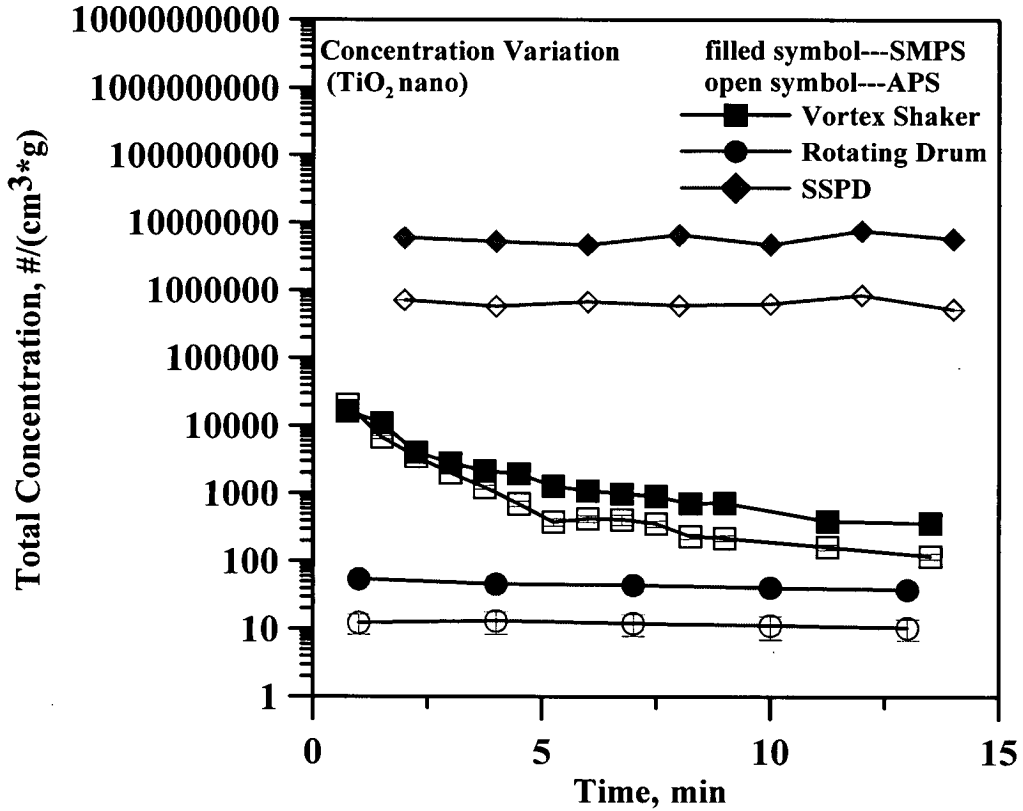


圖 89 奈米級二氧化鈦粉體隨時間的總數目濃度變化趨勢。

此實驗以 water-based CPC 作為 SMPS 系統的微粒計數器執行相同的實驗，用以比較 water-based CPC 與 3022 CPC 兩者對於微粒粒徑分佈的趨勢是否有影響，並且同時使用 FMPS 來偵測微粒分布，用以對照 SMPS 偵測的微粒粒徑分部。從表 27 和圖 90 的 NMD 值和圖形分布趨勢皆可發現，使用 water-based CPC 作為 SMPS 系統的微粒計數器對於微粒粒徑分佈的趨勢沒有明顯的影響或是改變，但是對照 SMPS 與 FMPS 的圖形就可以發現，FMPS 在 50nm 以下的微粒濃度比 SMPS 要高上好比倍，關於這個現象發生的原因，猜測可能是因為 FMPS 在 100nm 以下的偵測範圍其偵測濃度下限值皆高於 100 dN/dlogDp，因此當微粒濃度不穩定且濃度低於偵測下限值時，可能就會造成此情況的發生。

表 27 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級二氧化鈦 NMD 和 GSD。

微小粉末分散器 (SSPD)	SMPS		APS		FMPS	
	NMD (nm)	GSD	NMAD (nm)	GSD	NMD (nm)	GSD
2min	271	1.19	570	1.4	192	1.48
5min	473	1.26	556	1.4	193	1.48
15min	314	1.2	561	1.4	193	1.49
Total ave. (wcpc)	236	2.3	561	1.4	190	1.53
Total ave. (3022cpc)	247	2.14	550	1.47	169	1.4



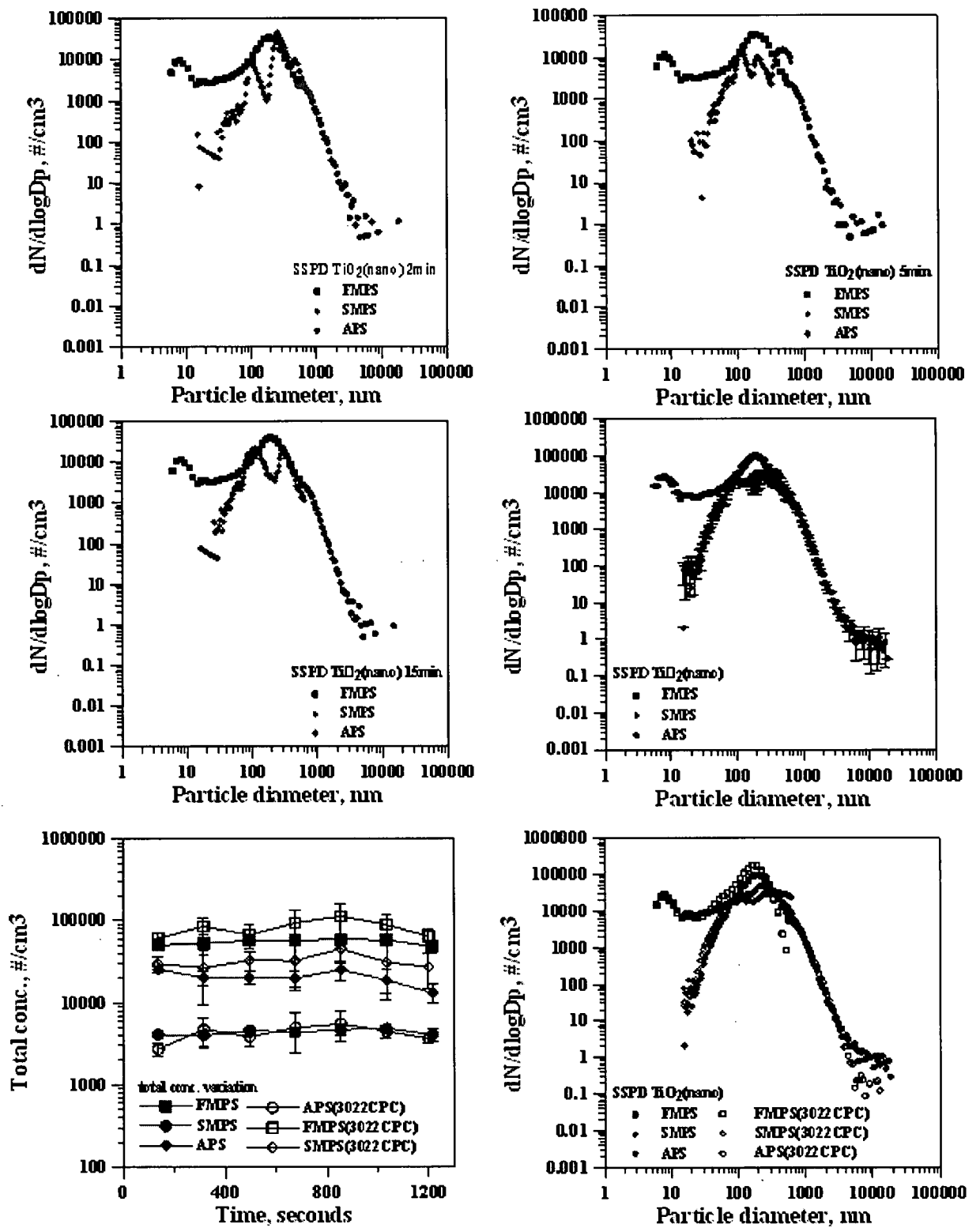


圖 90 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖。

以 SSPD 分散奈米級二氧化鈦粉體，其分散後的微粒質量濃度分布如圖 91 所示，其 MMAD 為  $1.105\mu\text{m}$ ，GSD 為 2.0。圖 92 則是以分體的顯在密度將 SMPS、FMPS 及 APS 的數據轉成重量濃度之後，與 MOUDI 得到的數據進行比較。

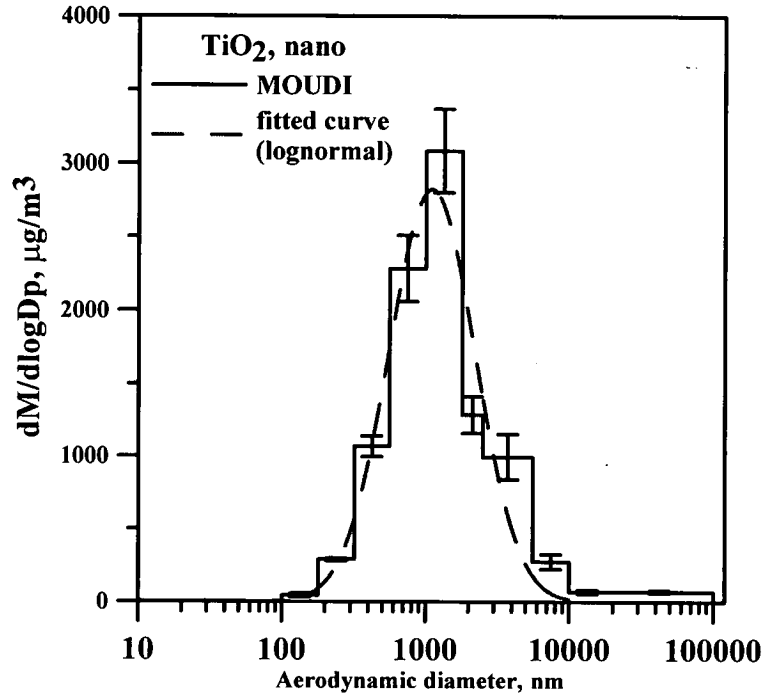


圖 91 以 SSPD 分散的奈米級二氧化鈦粉體之質量濃度分布圖。

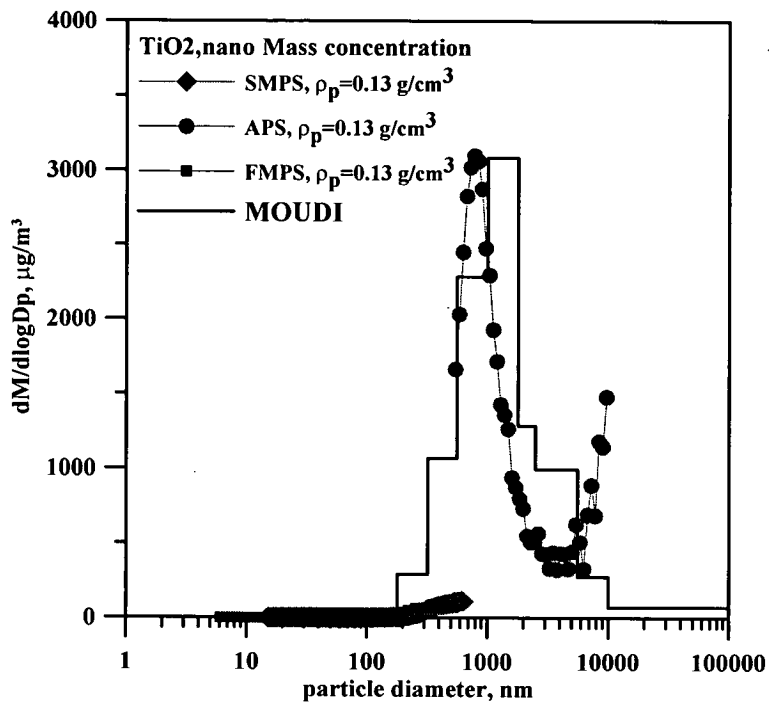


圖 92 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖。  
貳 次微米級二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ , submicron)

此種粉體使用 SSPD 做測試和漩渦震盪法做試驗，其中漩渦震盪法的實驗結果由圖 93 可以看出，次微米級二氧化鈦粉體在 SMPS 微粒粒徑偵測範圍中的圖形分布，將其以正對數分布模式去計算其趨勢線。由表 28 在進行實驗 2 分鐘、5 分鐘和 15 分鐘時，其趨勢線的 NMD 和 GSD 的變化分別為 165 nm、210.6 nm、107.5 nm 和 2.39、1.53、1.96，由此可以發現 SMPS 的 NMD 值先隨時間增加而上升，之後再遞減；GSD 的趨勢則相反。再觀察 APS 數據的分布，發現它有隨著時間的增加而減少的趨勢。其峰值的位置和濃度的變化分別為 61.9 #/cm<sup>3</sup> 降低至 4.74 #/cm<sup>3</sup>，減少 92%；1197nm 升高至 1486nm，增加 24%。可見 APS 的微粒數目濃度粒徑分布，隨著時間增加而往下及往右偏移。

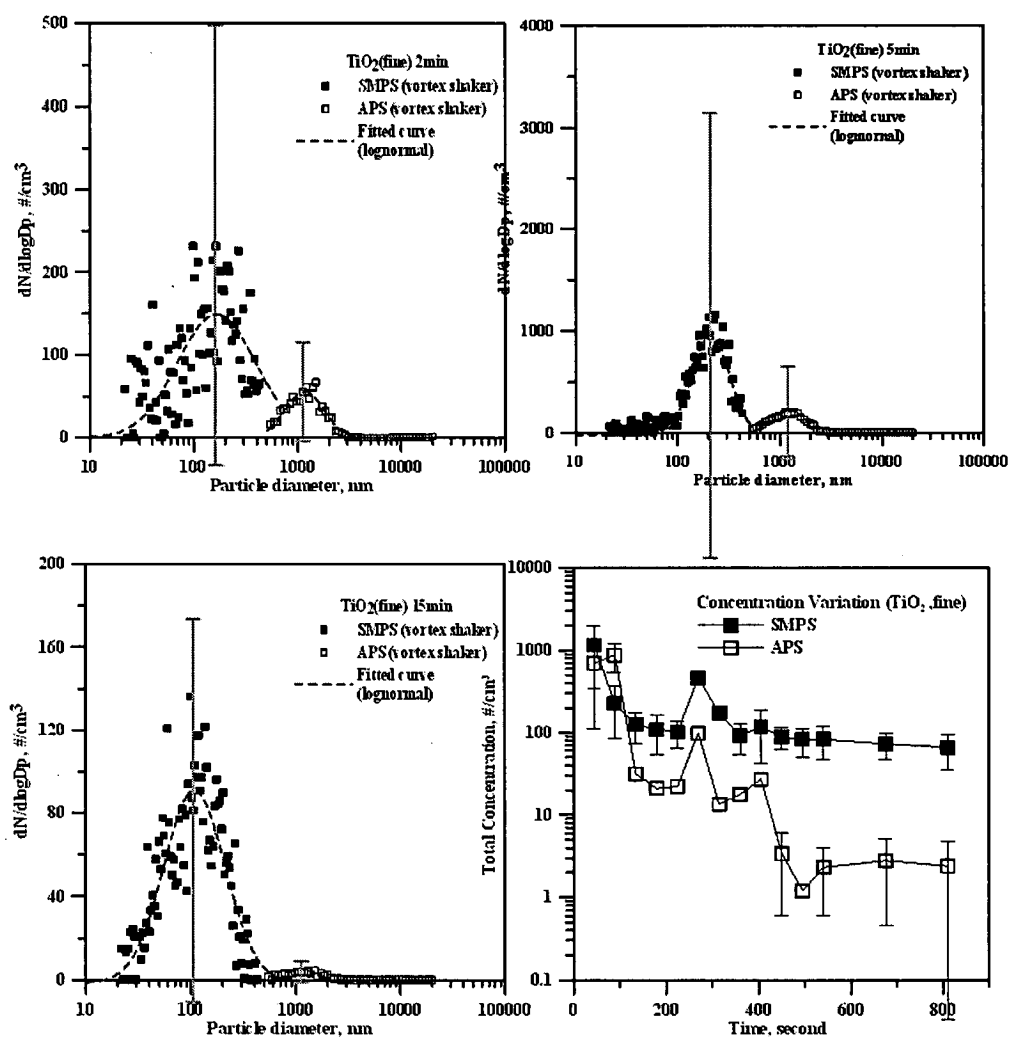


圖 93 以漩渦震盪器逸散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度圖。

表 28 以漩渦震盪法逸散次微米級二氧化鈦之 SMPS 與 APS 在不同時間點的次

微米級二氧化鈦 NMD 和 GSD 值。

漩渦震盪法 (vortex shaker)	SMPS			APS		
	峰值濃度及 位置 (#/cm <sup>3</sup> , nm)	NMD (nm)	GSD	峰值濃度及 位置 (#/cm <sup>3</sup> , nm)	NMAD (nm)	GSD
2min	225.8/269	165	2.39	67.6/1486	1150	1.54
5min	1157.9/232.9	211	1.53	201.2/1382	1181	1.50
15min	121.5/135.8	107	1.96	4.7/1486	1116	1.58

次微米級二氧化鈦粉體隨時間的總數目濃度變化的趨勢，大致上是呈現遞減的走勢，在實驗進行時間到達約 5 分鐘的時候，SMPS 和 APS 的濃度都有突升的現象，猜想這可能是因為部分附著在前端管線中的粉體，突然被氣流沖散所致，使得 SMPS 和 APS 的微粒總數目濃度突然衝高，以及間接改變微粒的粒徑分布圖形。SMPS 的微粒總濃度由 1163.8 #/cm<sup>3</sup> 降至 65.1 #/cm<sup>3</sup>，減少了約 94%，APS 的微粒總濃度由 692.4 #/cm<sup>3</sup> 降至 2.39 #/cm<sup>3</sup>，減少約 99.7%。兩種偵測儀器所得到的濃度改變量都非常大，可見次微米級二氧化鈦粉體使用漩渦震盪法時，在實驗的 15 分鐘內，可以將裝入的粉體幾乎完全逸散出來，但逸散出來的微粒濃度不甚穩定。以 SSPD 分散次微米級二氧化鈦粉體的粒徑分佈圖則如圖 94 所示，表 29 為 3 種儀器各個時間點的 NMD 和 GSD 資料。觀察 SMPS、APS 與 FMPS 的 NMD 和 GSD 值的變化情形，可以發現 SMPS 的 NMD 跳動情況較嚴重，這可能表示 SMPS 掃描到的粒徑分布較不穩定，無法在短時間內掃描得到穩定的粒徑分布結果。若將奈米二氧化鈦的與次微米級二氧化鈦的微粒分佈數據進行比較，可以發現次微米二氧化鈦的 APS 之 NMD 較高，這顯示次微米二氧化鈦粉體聚集形成的微粒較大，但次微米二氧化鈦粉體的 SMPS 之 NMD 值與其初始粒徑很相近，而奈米二氧化鈦的 SMPS 之 NMD 值卻大於初始粒徑約 10 倍左右，這表示奈米二氧化鈦的聚集程度比次微米二氧化鈦粉體要來的高。

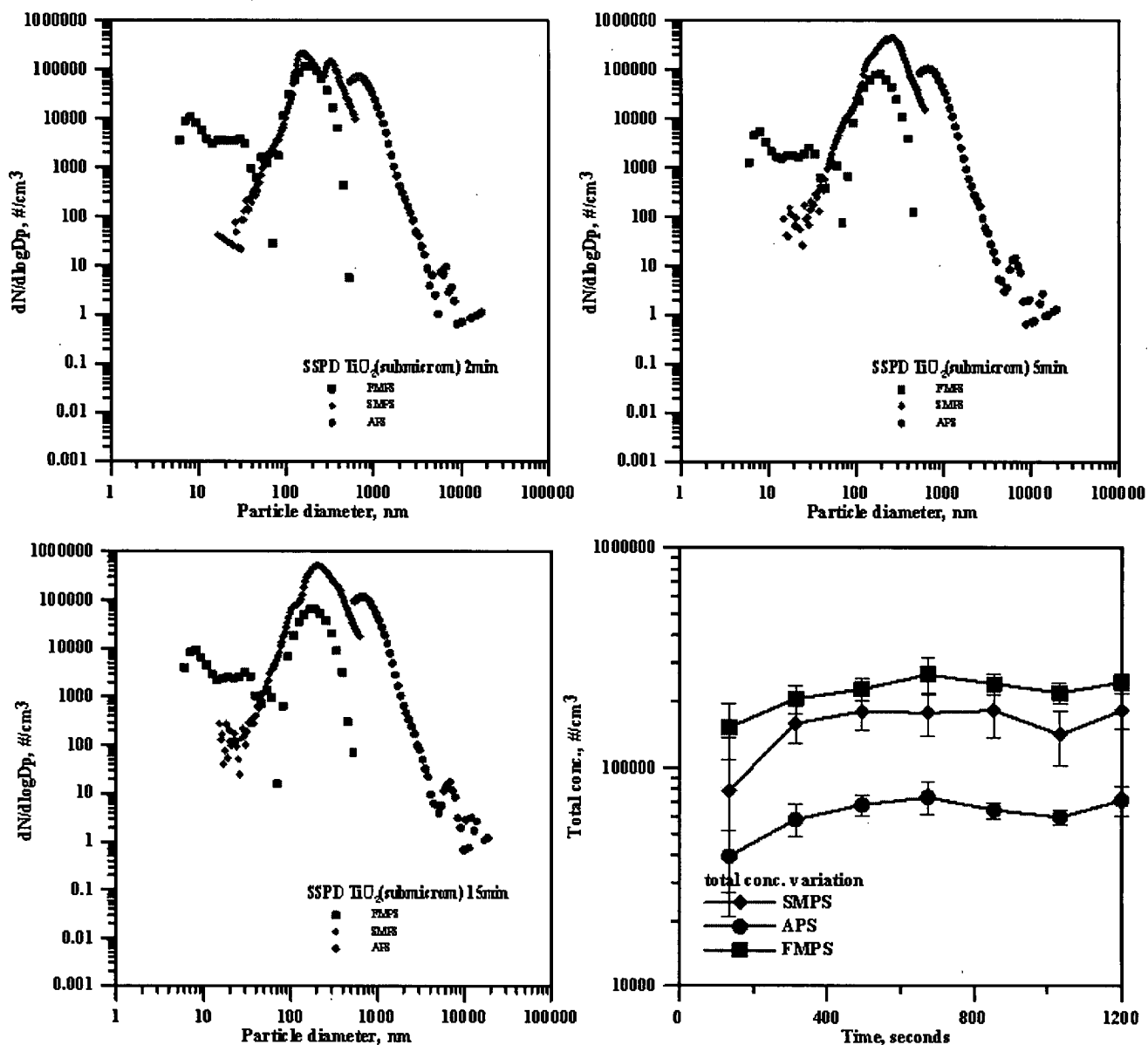


圖 94 以 SSPD 分散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度變化圖。

表 29 SMPS、FMPS 與 APS 在不同時間點次微米二氧化鈦粉體的 NMD 和 GSD 值。

微小粉末分散器 (SSPD)	SMPS		APS		FMPS	
	NMD (nm)	GSD	NMAD (nm)	GSD	NMD (nm)	GSD
2min	195	1.67	667	1.35	178	1.38
5min	237	1.39	660	1.35	177	1.38
15min	214	1.39	660	1.36	177	1.38

### 參 奈米級氧化鋅(ZnO, nano)

此種粉體使用 SSPD 進行分散的實驗，亦使用不同型號的 CPC (water-based CPC 及 3022 CPC)執行重複實驗，用以比較兩種 CPC 對於 SMPS 掃描微粒粒徑分佈的影響。由表 30 和圖 95 可以得知 FMPS 和 APS 的粒徑分佈狀況在 2-15 分鐘之間皆相當穩定，NMD 和 GSD 幾乎都維持在通一個數值，而 SMPS 的 NMD 及 GSD 除了一開始 2 分鐘的數值與後面的資料比較起來差異較大之外，剩下的資料皆在一個範圍內跳動，從這個現象可以發覺 SMPS 偵測濃度不穩定的微粒產生源時，其偵測微粒分佈之穩定性相對的比較低，不如 FMPS 及 APS 這兩種可以每秒得到一個粒徑分布圖的儀器。比較兩種不同型號的 CPC 得到的微粒粒徑掃描結果方面，僅比較實驗總平均的粒徑分佈狀況，同樣的從表 30 可以看出 2 種 CPC 得到的結果差異不大，NMD 的差別大約為 3%、GSD 的差別為 25%。使用 MOUDI 進行此種粉末的重量濃度分佈分析，結果則如圖 96 所示，其 MMAD 為 1.344 $\mu$ m、GSD 為 1.84。若將 SMPS、FMPS 和 APS 的數目濃度分佈乘上奈米氧化鋅粉體的顯在密度，則可得到各儀器量測到的值量濃度分布圖，如圖 97 所示。

表 30 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級氧化鋅 NMD 和 GSD。

微小粉末分散器 (SSPD)	SMPS		APS		FMPS	
	NMD (nm)	GSD	NMAD (nm)	GSD	NMD (nm)	GSD
2min	160	3.31	750	1.37	170	1.39
5min	256	1.26	754	1.38	170	1.39
15min	226	1.54	752	1.37	169	1.39
Total ave. (wcpc)	261	1.62	754	1.38	170	1.39
Total ave. (3022cpc)	270	2.15	755	1.39	170	1.38

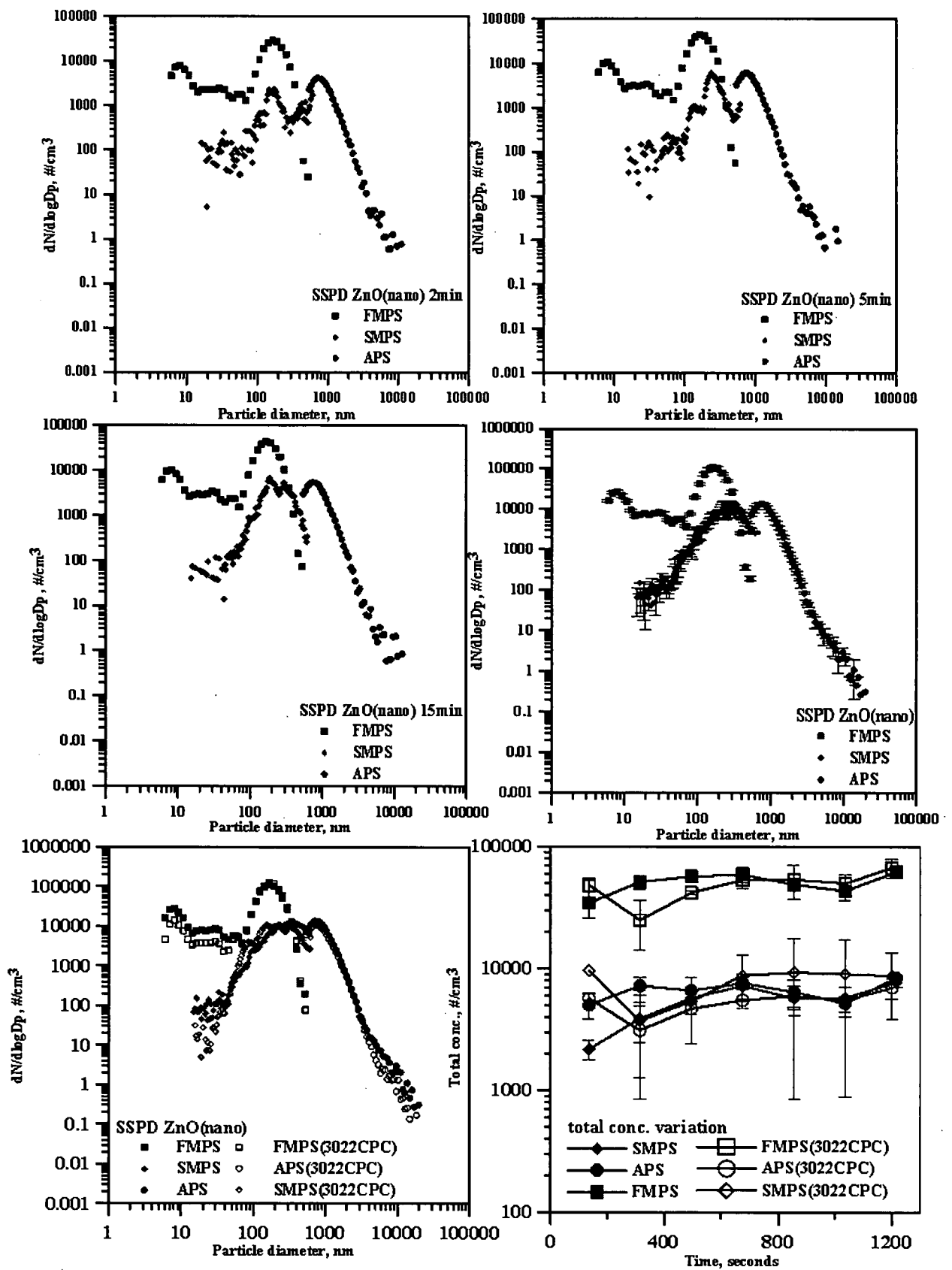


圖 95 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖。

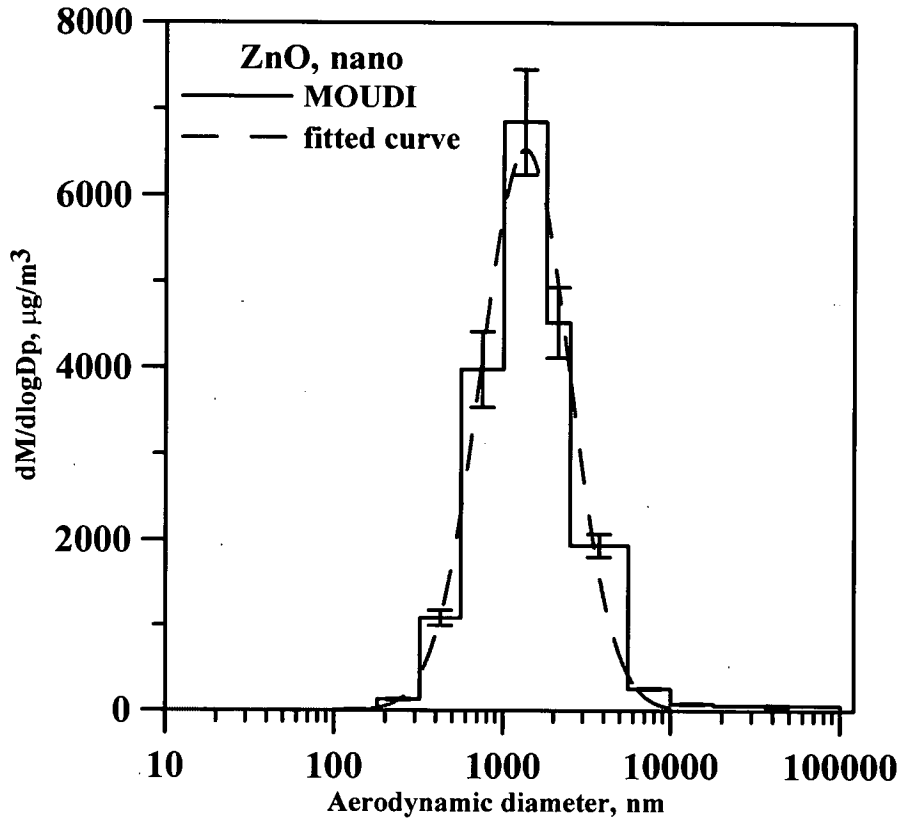


圖 96 以 SSPD 分散的奈米級氧化鋅粉體之質量濃度分布圖。

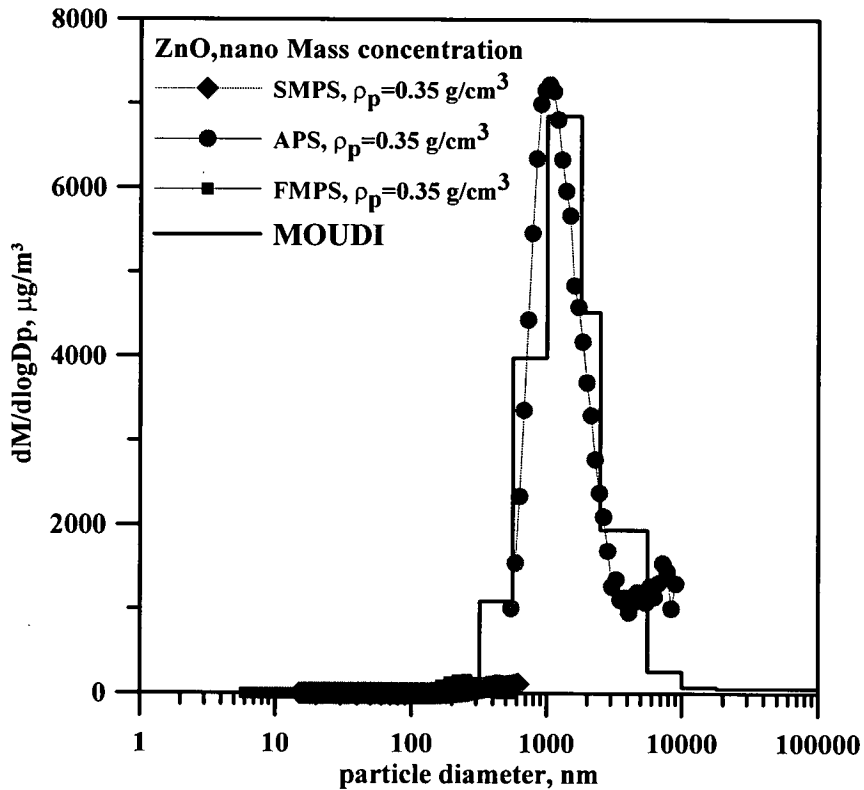


圖 97 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖。



#### 肆 次微米級氧化鋅(ZnO, submicron)

此種粉體也有使用三種實驗系統進行微粒濃度分布狀況的實驗，下面將以 2 分鐘、5 分鐘以及 15 分鐘，三個時間點的微粒濃度分布圖來呈現實驗結果。由於三種實驗系統使用的粉體重量皆不同，所以將數目濃度除上實驗時使用的粉體重量，以便比較和了解單位粉體重量之微粒逸散狀況。觀察圖 98-圖 101 可以發現在實驗進行的 15 分鐘內 SSPD 的單位粉體重量分散出來的微粒濃度為三者中最高，漩渦震盪器得到的逸散濃度次之，最低的為旋轉腔體試驗機法，此結果與奈米級二氧化鈦粉體有相同的趨勢。若比較三種系統之總微粒濃度隨時間改變的狀況，可以發現只有漩渦震盪器的 APS 偵測範圍之微粒濃度在 15 分鐘內有隨著時間增加而遞減的趨勢，SSPD 和旋轉腔體試驗機法的微粒濃度在 15 分鐘內皆沒有明顯的遞增或遞減的趨勢，由圖 100 可以得到這些結論。三種實驗系統得到的粉體逸散微粒的眾數粒徑，皆落在次微米的大小，而微粒粒徑分布的趨勢形狀，在 15 分鐘內 SSPD、旋轉腔體試驗機法和漩渦震盪法的眾數微粒粒徑值之變化量皆不大，三種實驗系統各自的眾數微粒粒徑之最大值與最小值差異，最多為 98nm，三種實驗系統只有漩渦震盪法的眾數微粒粒徑會隨著時間的增加而有遞減的趨勢，且其濃度也有隨時間增加而降低的趨勢。

用 SSPD 在分散次微米級氧化鋅粉體的實驗所獲得的 SMPS 及 APS 數據，得到的結果與 SSPD 分散奈米級二氧化鈦粉體相同，皆同意 SSPD 比前兩種儀器擁有較好的粉體分散能力。再者，比較奈米氧化鋅粉體與次微米氧化鋅粉體利用 SSPD 分散後所得到的粒徑分佈資料可以發現，次微米氧化鋅粉體的 APS 之 NMD 高於奈米氧化鋅粉體；次微米氧化鋅粉體的 SMPS 之 NMD 與本身的初始粒徑相近，而奈米氧化鋅粉體的 SMPS 之 NMD 則大於初始粒徑約 6.5 倍，表示奈米氧化鋅粉體的聚集狀況較次微米氧化鋅粉體嚴重。此結果與二氧化鈦粉體有相似的結論。

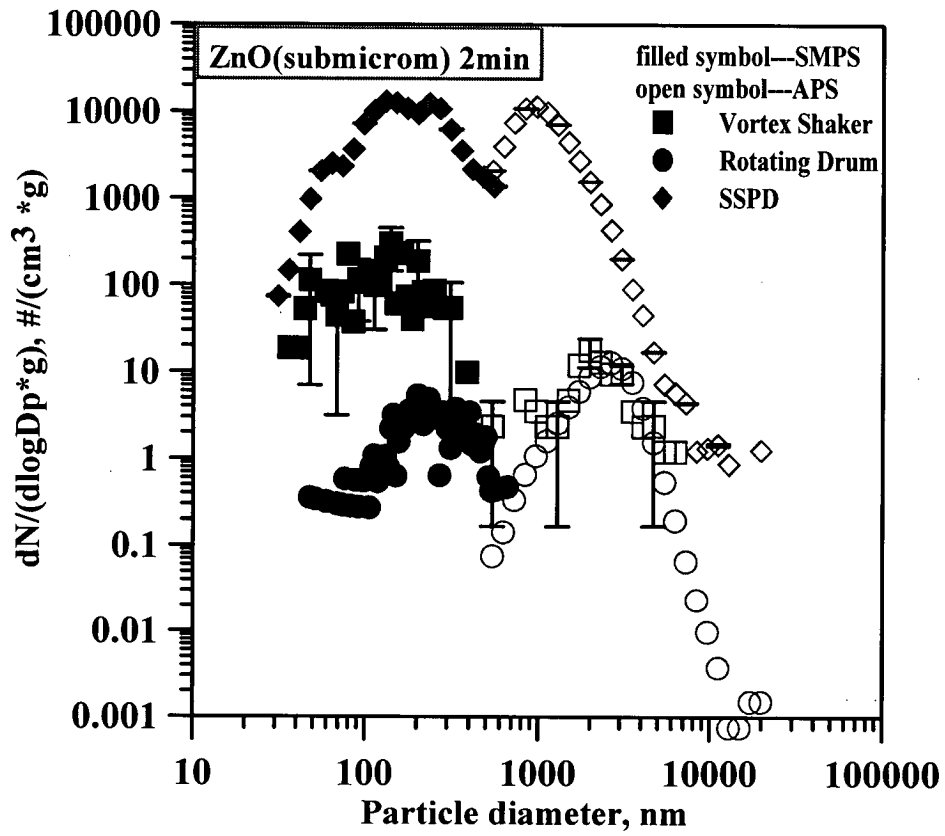


圖 98 次微米級氧化鋅粉體在 2 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

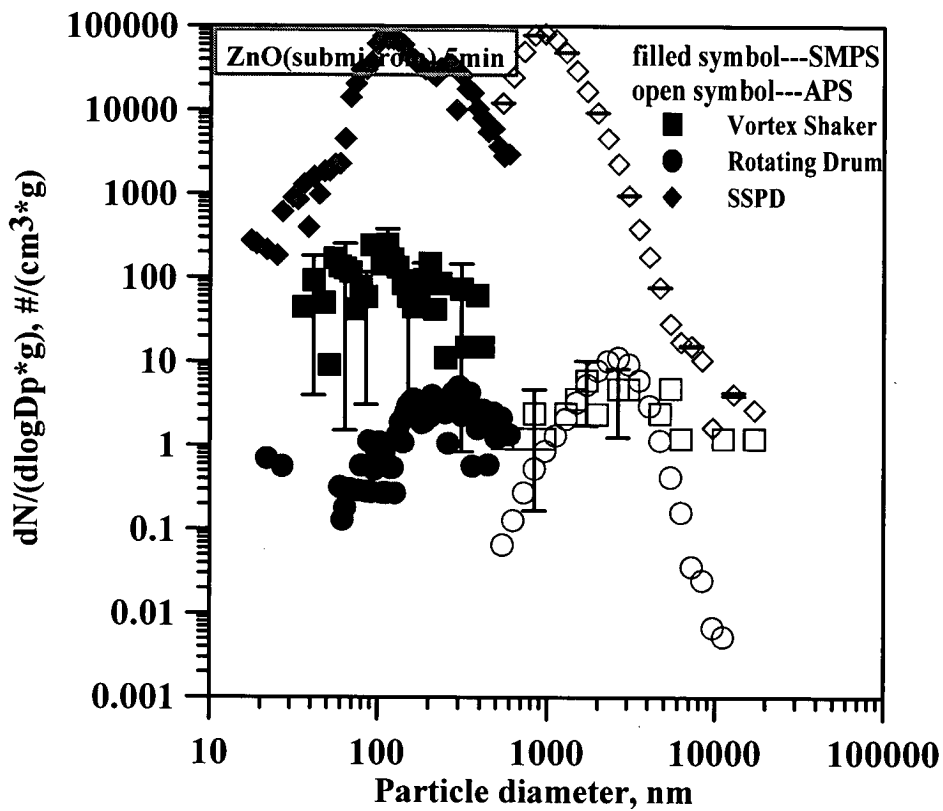


圖 99 次微米級氧化鋅粉體在 5 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

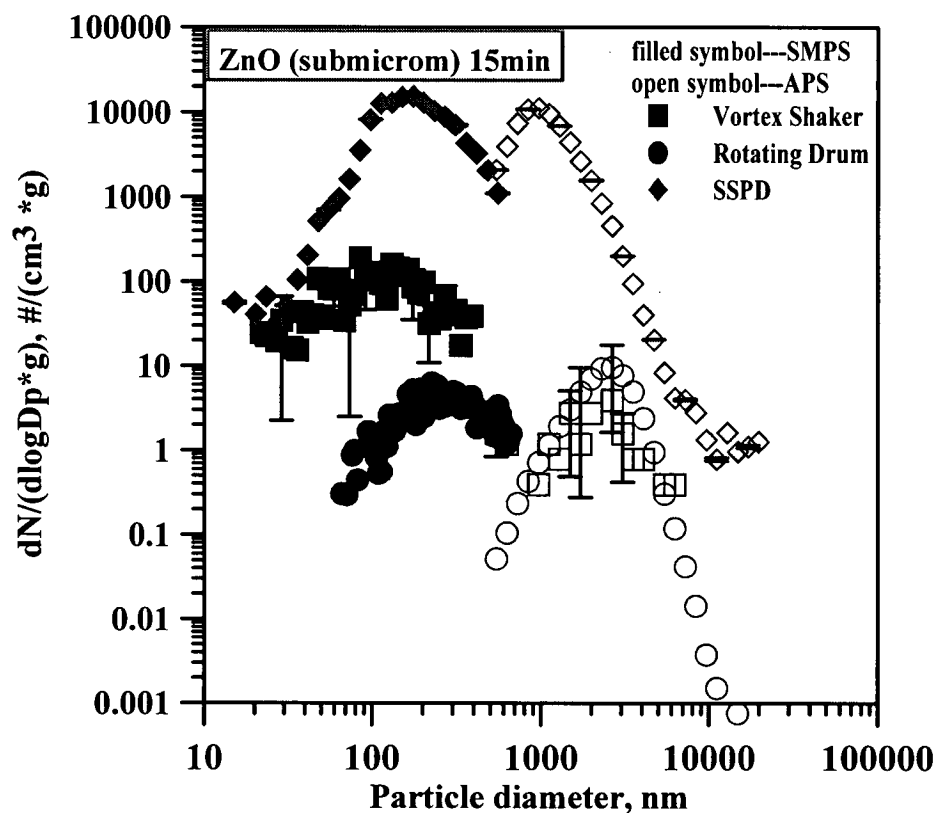


圖 100 次微米級氧化鋅粉體在 15 分鐘時的逸散數目濃度分布圖。

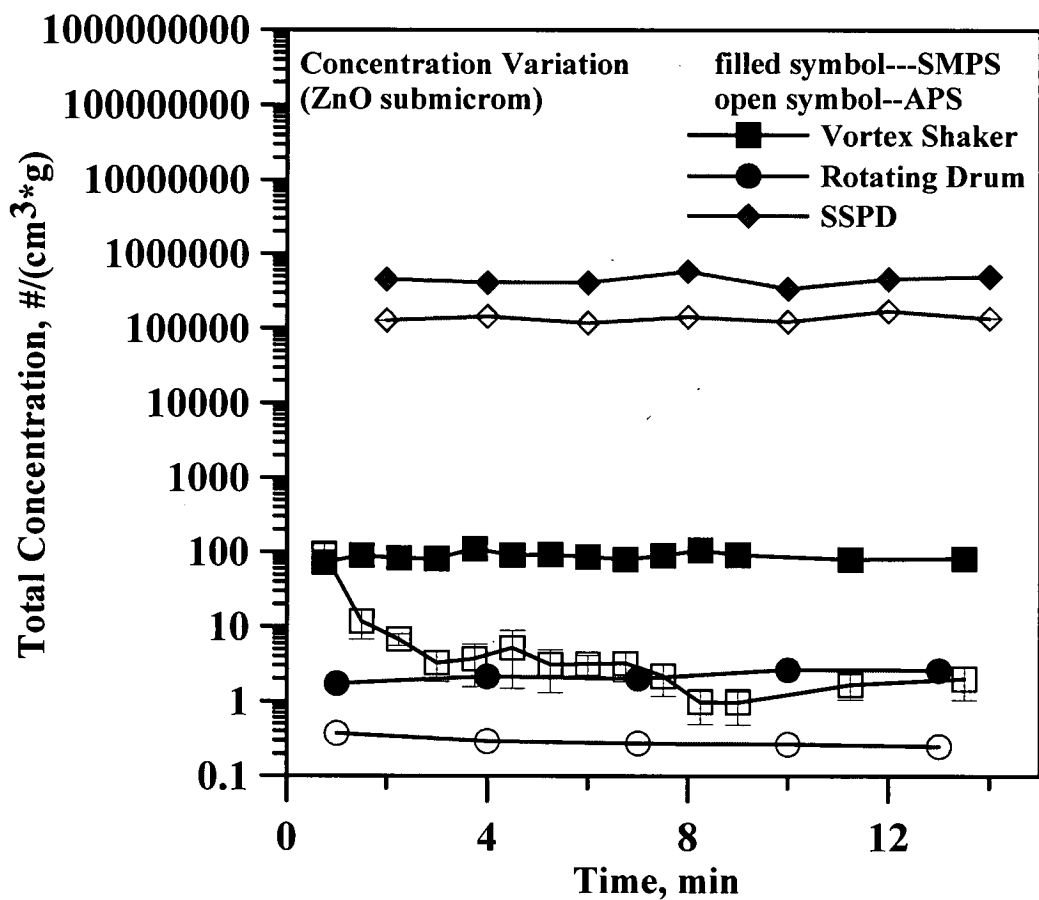


圖 101 次微米級氧化鋅粉體隨時間的總數目濃度變化趨勢。

## 伍 奈米級二氧化矽(SiO<sub>2</sub>, nano)

此種粉體使用 SSPD 進行分散的實驗，由表 31 和圖 102 可以得知 FMPS 和 APS 偵測到的粒徑分佈狀況比起 SMPS 要穩定的多，比較兩種不同型號的 CPC 得到的微粒粒徑掃描結果方面，僅比較實驗總平均的粒徑分佈狀況，同樣的從表 31 可以看出 2 種 CPC 得到的結果差異不大，NMD 的差別大約為 4.5%、GSD 的差別為 8.5%。使用 MOUDI 進行此種粉末的重量濃度分佈分析，結果則如圖 103 所示，其 MMAD 為 2.117 $\mu$ m、GSD 為 2.73。若將 SMPS、FMPS 和 APS 的數目濃度分佈乘上奈米二氧化矽粉體的顯在密度，則可得到各儀器量測到的值量濃度分布圖，如圖 104 所示。

表 31 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的奈米級二氧化矽 NMD 和 GSD。

微小粉末分散器 (SSPD)	SMPS		APS		FMPS	
	NMD (nm)	GSD	NMAD (nm)	GSD	NMD (nm)	GSD
2min	95	1.26	739	1.39	145	1.90
5min	250	2.8	724	1.35	153	1.92
15min	155	1.36	674	1.42	156	1.99
Total ave. (wcpc)	167	2.23	712	1.42	155	1.99
Total ave. (3022cpc)	175	2.04	758	1.45	162	1.85

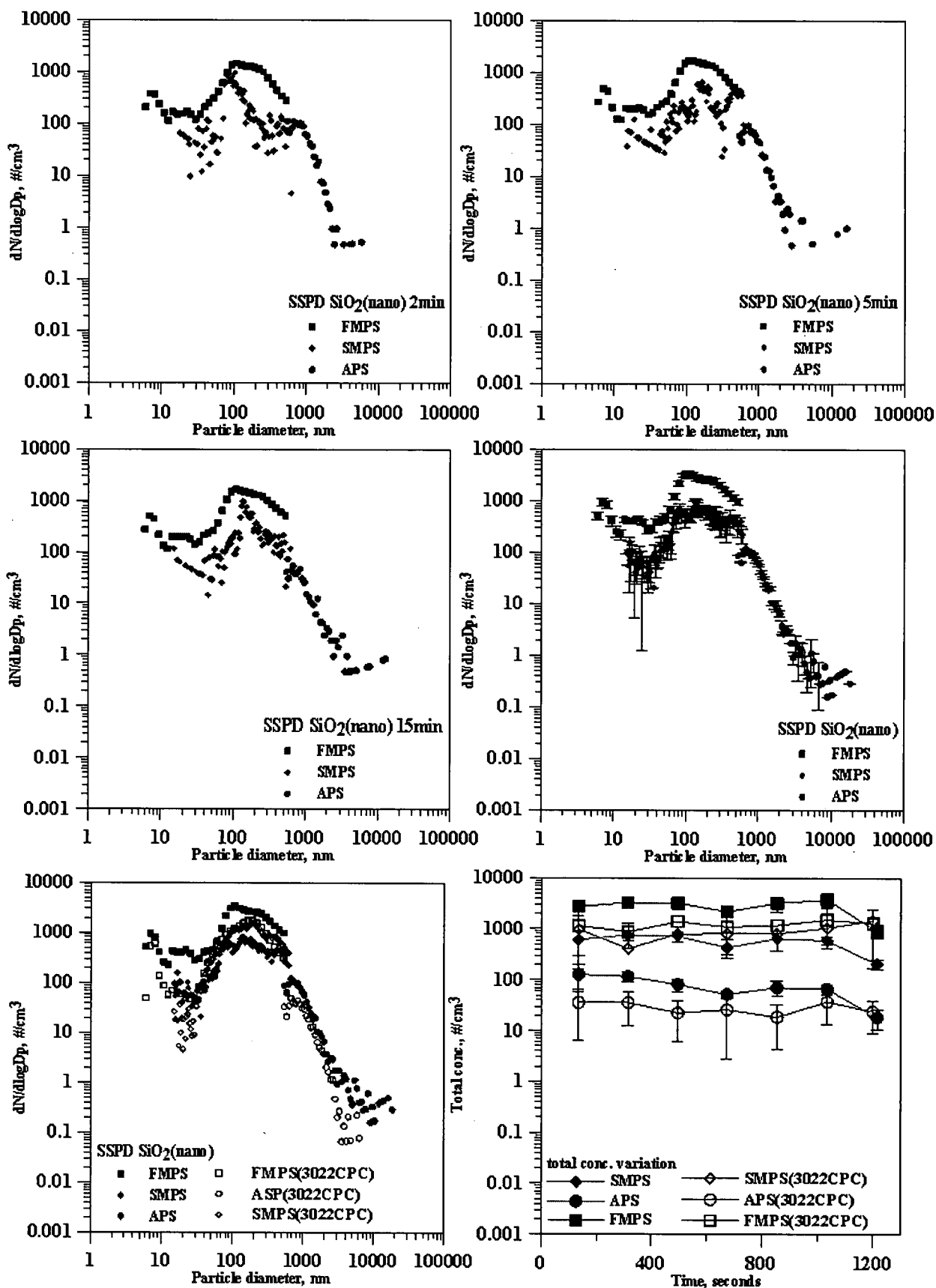


圖 102 使用 water-based CPC 作為 SMPS 的微粒計數器時，3 種儀器在 2 分鐘、5 分鐘、15 分鐘和實驗總平均的微粒粒徑分佈圖及實驗總濃度變化圖。

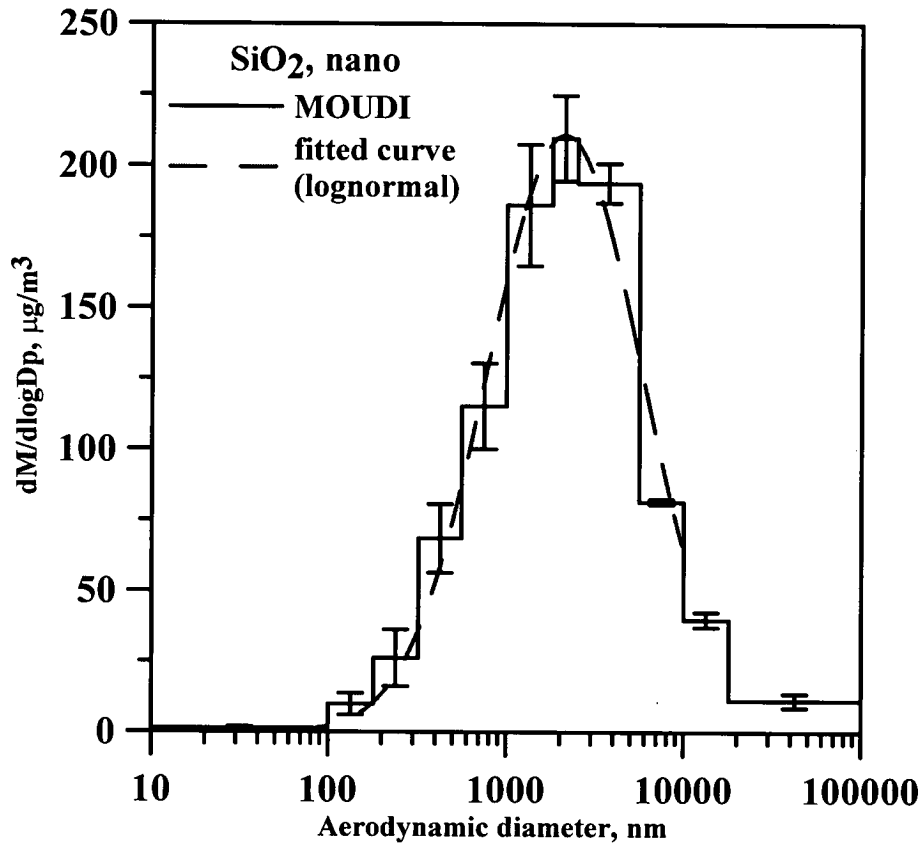


圖 103 以 SSPD 分散的奈米級二氧化矽粉體之質量濃度分布圖。

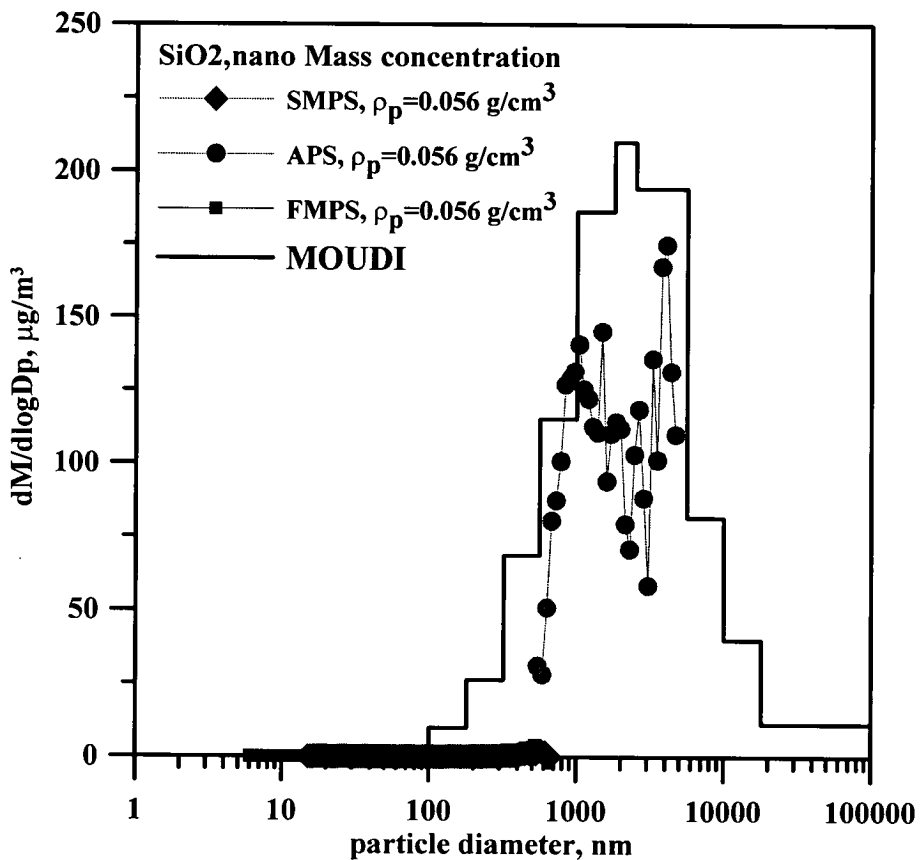


圖 104 由 SMPS、FMPS 及 APS 轉換成質量濃度與 MOUDI 的質量濃度比對圖。

## 陸 次微米級二氧化矽(SiO<sub>2</sub>, submicron)

此種粉體使用 SSPD 進行分散的實驗，由表 32 可以得知 FMPS 和 APS 偵測到的粒徑分佈狀況相對於 SMPS 偵測到的微粒分布狀況較為穩定。除了儀器偵測狀況的穩定情形，由表 32 亦可以發現次微米二氧化矽粉體的 APS 之 NMD 數據與其初始粒徑值相當接近，從圖 105 的微粒粒徑分佈圖可以看出次微米二氧化矽粉體的微粒濃度遠高於奈米二氧化矽粉體，且次微米二氧化矽粉體的 SMPS 及 FMPS 之微粒濃度亦高於 APS 偵測到的微粒濃度，由此可知次微米二氧化矽粉體不太會聚集。若與奈米級二氧化矽粉體的微粒粒徑分佈狀況比較，可以發現奈米二氧化矽粉體的 SMPS 之 NMD 值，比初始粒徑要大上 8 倍左右，而次微米級二氧化矽粉體卻擁有與 APS 之 NMD 值差不多的初始粒徑，故可見奈米二氧化矽粉體的聚集性大於次微米二氧化矽粉體。

表 32 SMPS、FMPS 與 APS 在不同時間點次微米二氧化矽粉體的 NMD 和 GSD 次微米級二氧化矽值。

微小粉末分散器 (SSPD)	SMPS		APS		FMPS	
	NMD (nm)	GSD	NMAD (nm)	GSD	NMD (nm)	GSD
2min	247	1.50	803	1.50	149	1.44
5min	201	1.39	823	1.50	147	1.46
15min	190	1.75	856	1.52	153	1.46

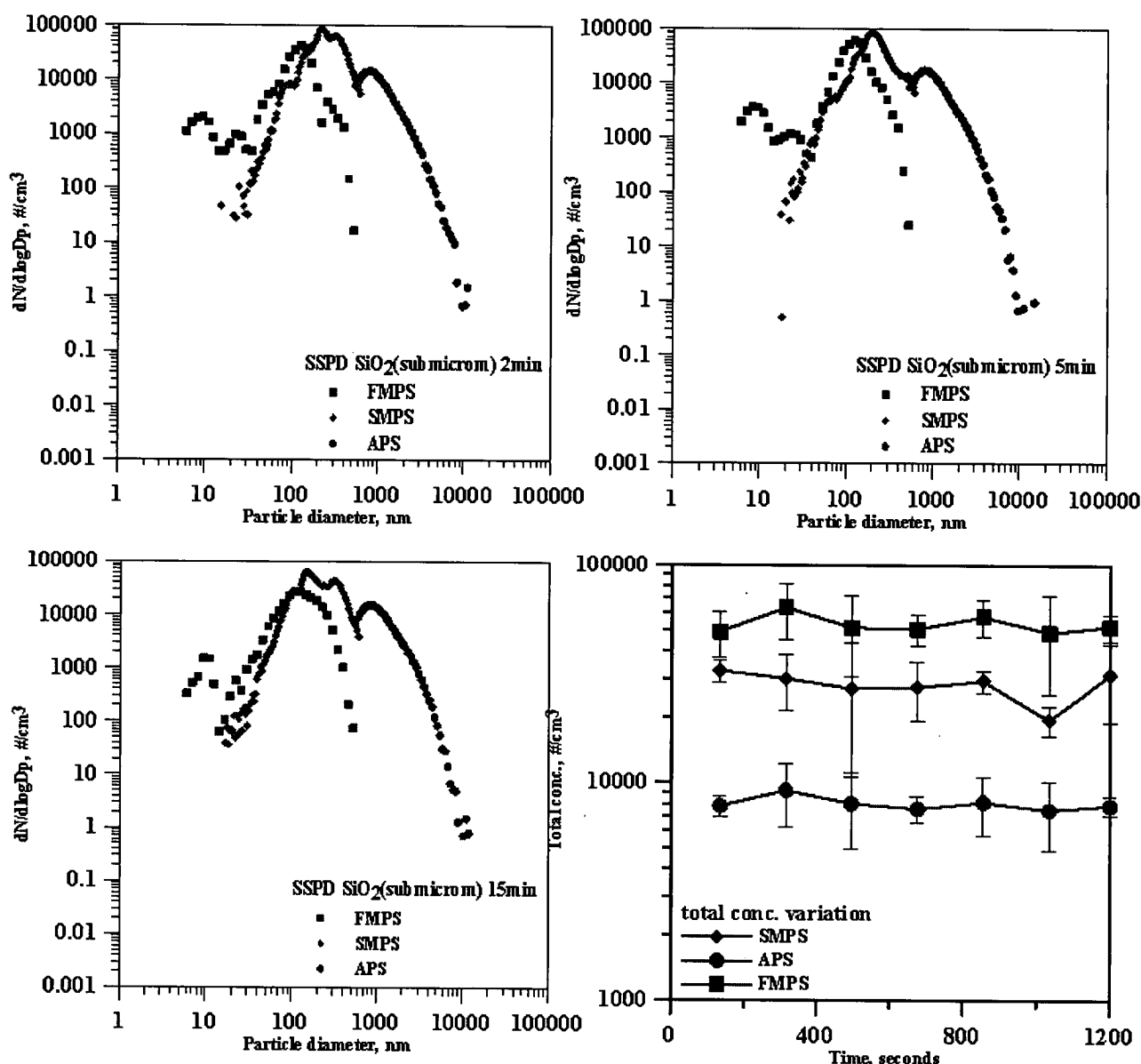


圖 105 SSPD 分散次微米級二氧化鈦粉體隨時間變化的粒徑和濃度變化圖。

## 柒 SEM 和 TEM 照片

照 SEM 時，我們以牙籤沾取粉體樣品，再將沾起的粉體黏貼到碳膠上，以此方法做好的樣品在送入 SEM 真空腔之前還有鍍上一層白金，用來增加樣品的導電度，方便觀察之用。

奈米級的粉體微粒除了有照 SEM 照片之外，還有照 TEM，以便更仔細觀察為小粉體的聚集型態。TEM 樣品的製備步驟如下所述，用小藥勺取少量的奈米粉末，並放入離心管中，取出的量不要太多。接著以微量滴管取出丙酮(或是 DI



水)，將之滴入離心管內，此時管內的液體會呈清清淡淡的渾濁樣。另外裝一管沒有放粉末的丙酮，用來比較混濁程度。再來把裝有粉末和丙酮的離心管放到放置離心管的架子，再放入超音波震盪器中，震盪 30 分鐘。震完之後，以微量滴管取離心管的上層液，並將之滴一到兩滴到銅網上，銅網是擺放在拭鏡紙的上面。待銅網上的液體乾了之後，用尖頭夾將銅網夾入試片盒中，如此即可。

### 奈米級二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ , nano)TEM 照片

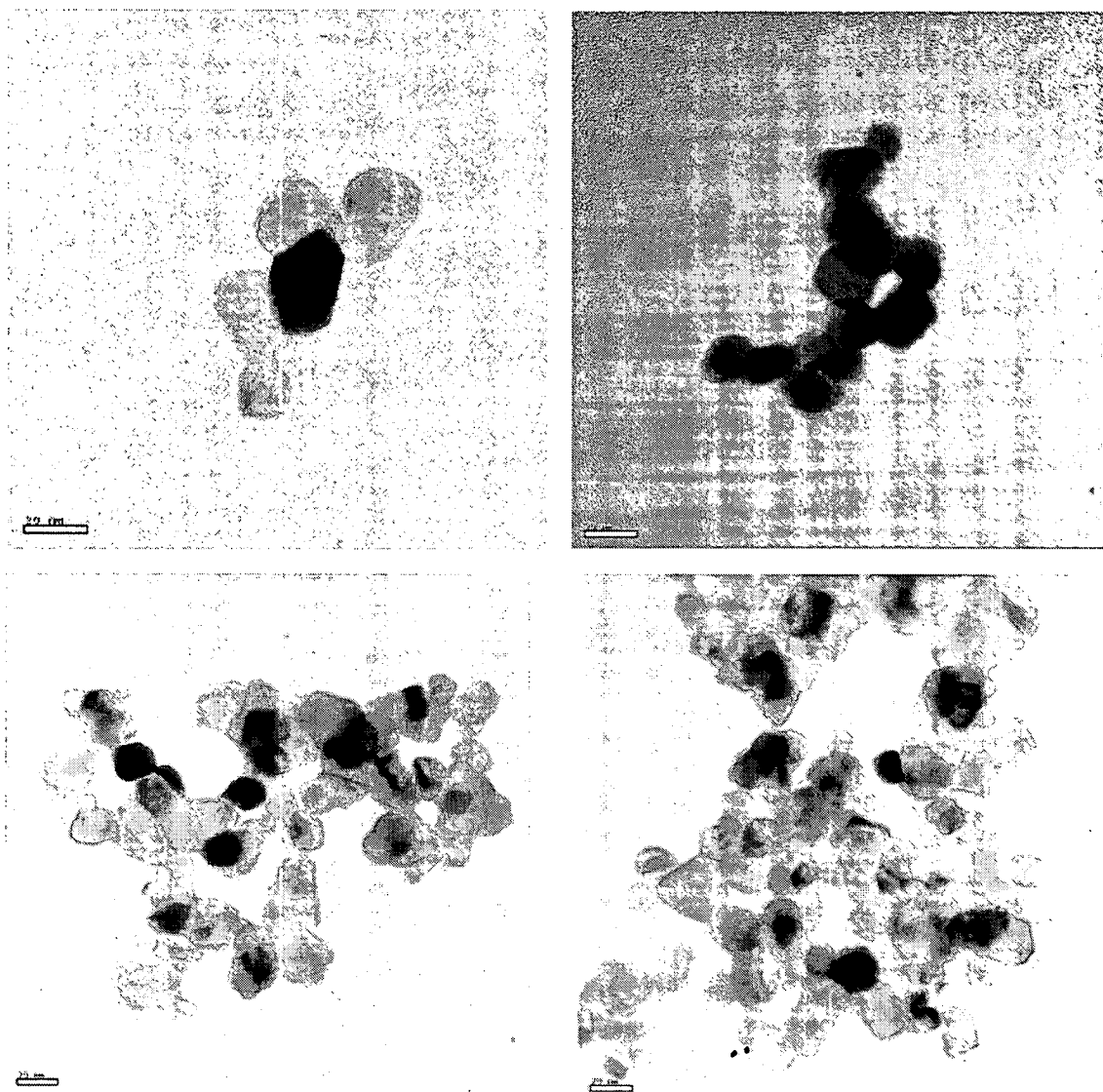


圖 106 奈米級二氧化鈦粉體 TEM 照片

奈米級二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ , nano)SEM 照片

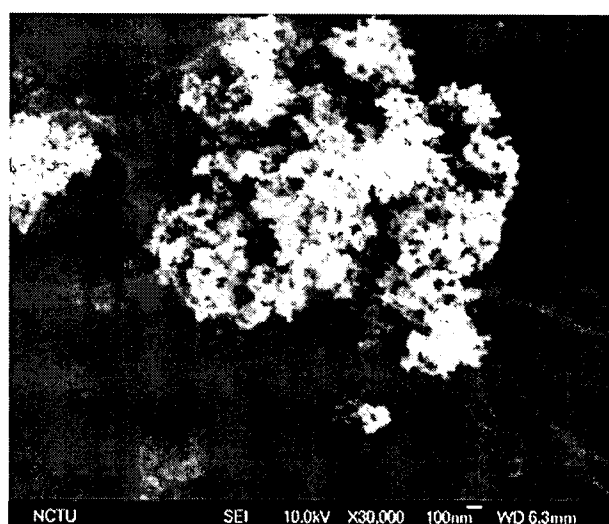
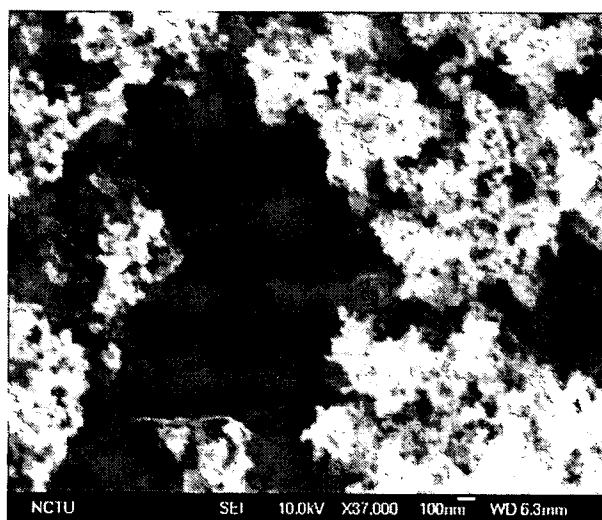
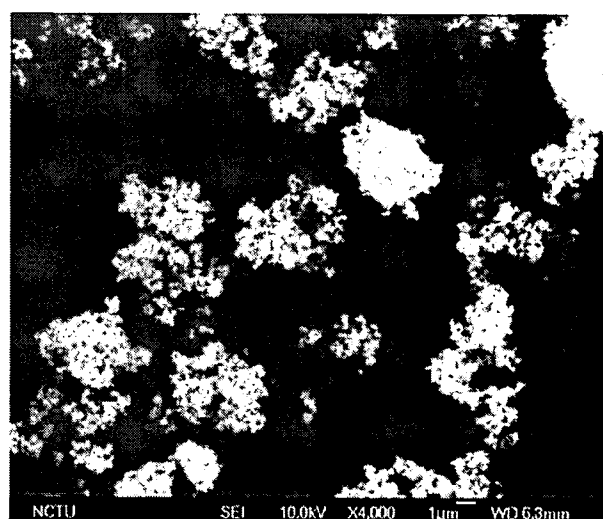
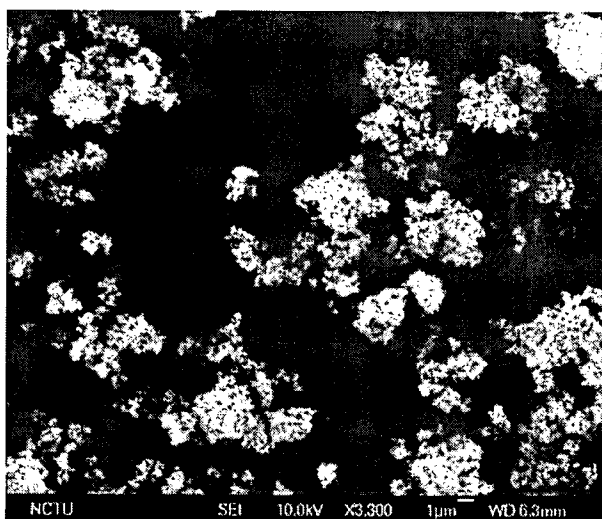


圖 107 奈米級二氧化鈦粉體 SEM 照片

次微米級二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ , submicron) SEM 照片

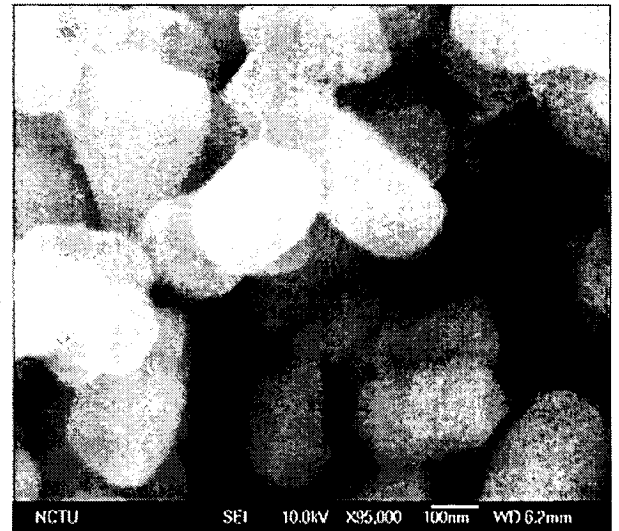
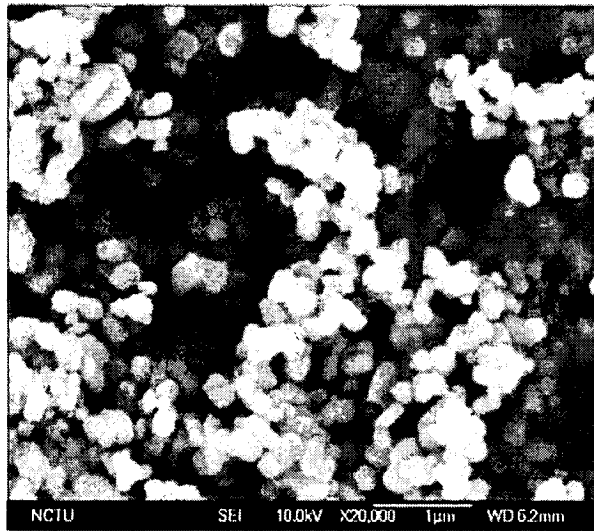
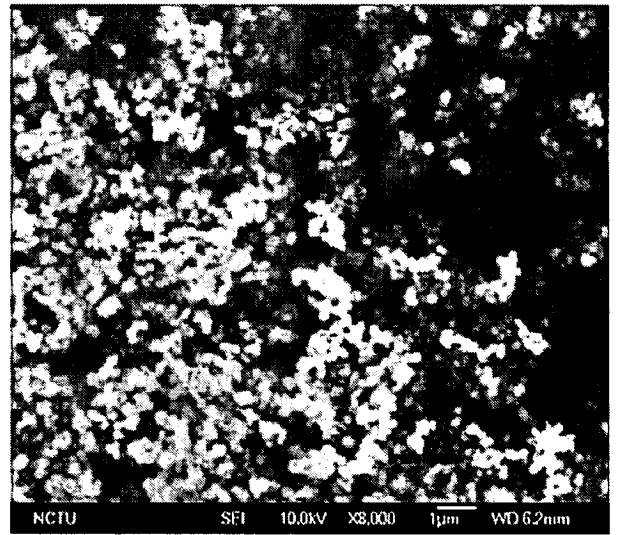
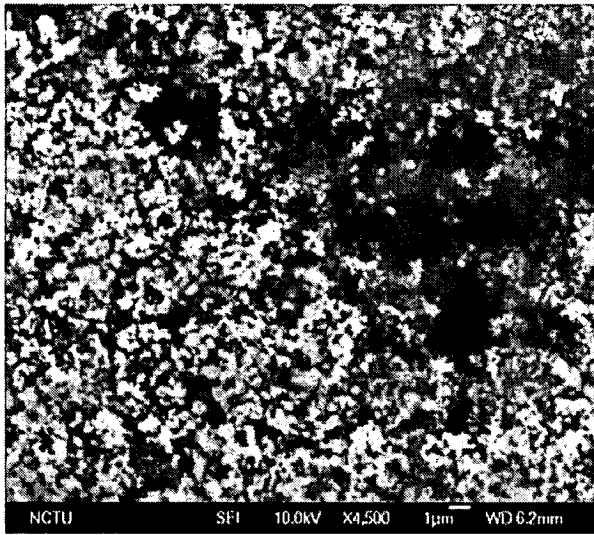


圖 108 次微米級二氧化鈦粉體 SEM 照片

次微米級氧化鋅(ZnO, submicron) SEM 照片

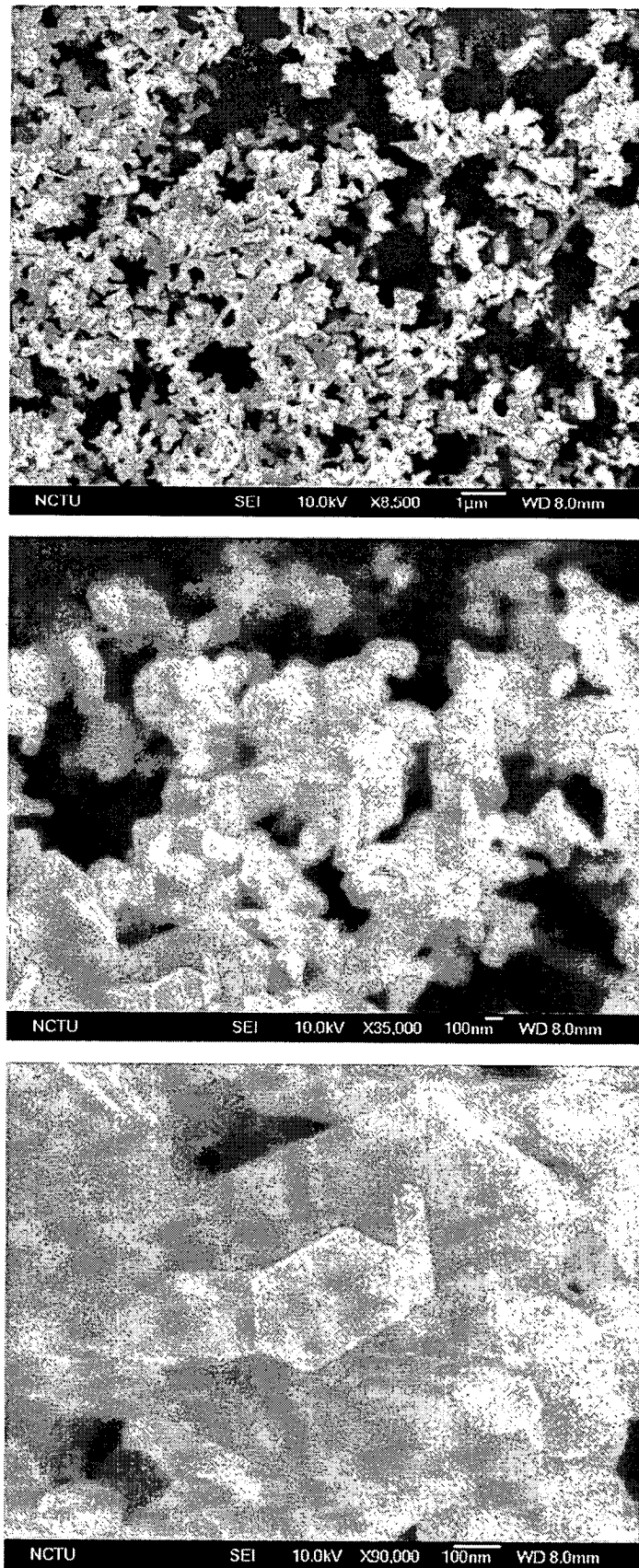


圖 109 次微米級氧化鋅粉體 SEM 照片

奈米級二氧化矽( $\text{SiO}_2$ , nano) SEM 照片

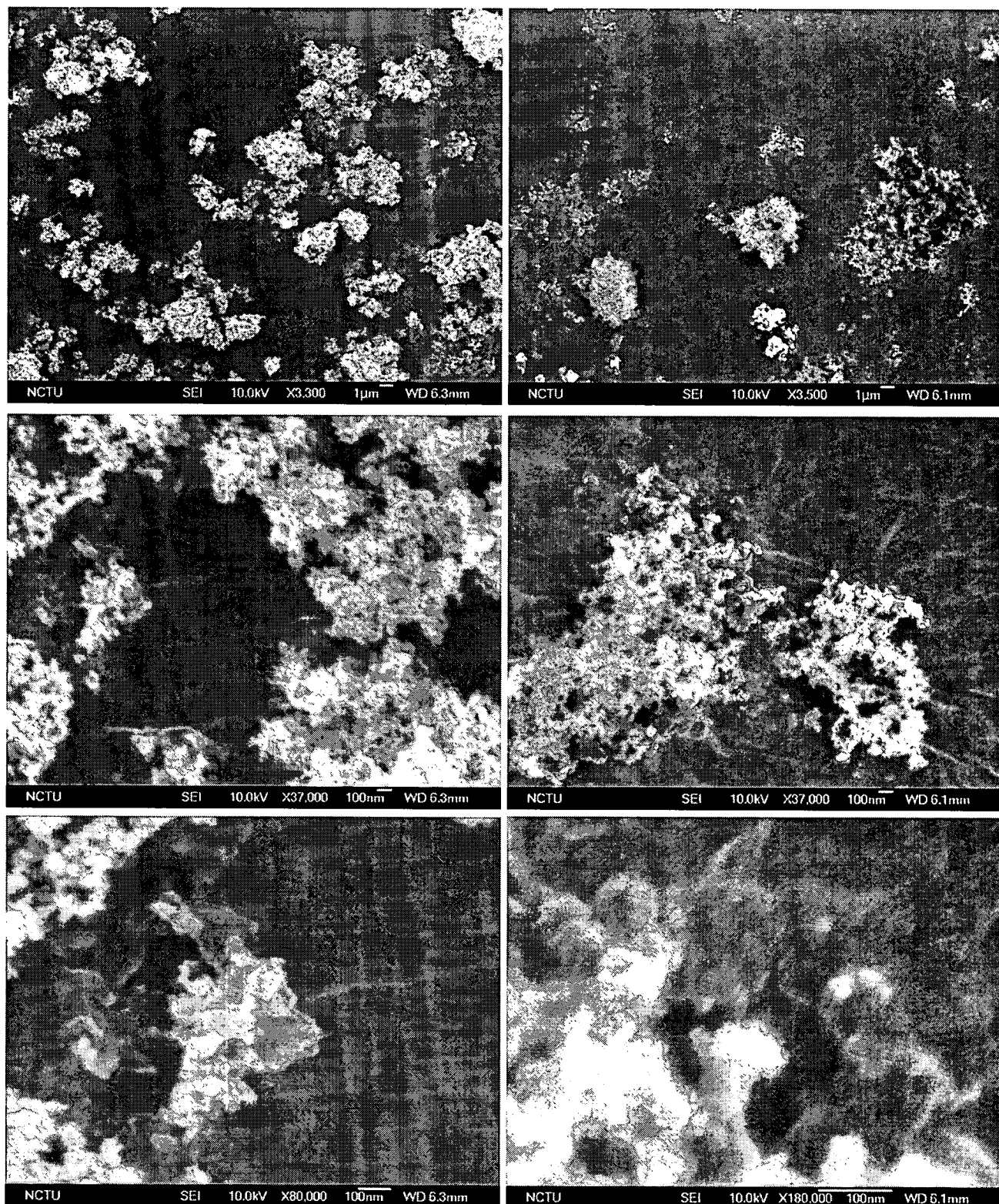


圖 110 奈米級二氧化矽粉體 SEM 照片



奈米級二氧化矽( $\text{SiO}_2$ , nano) TEM 照片

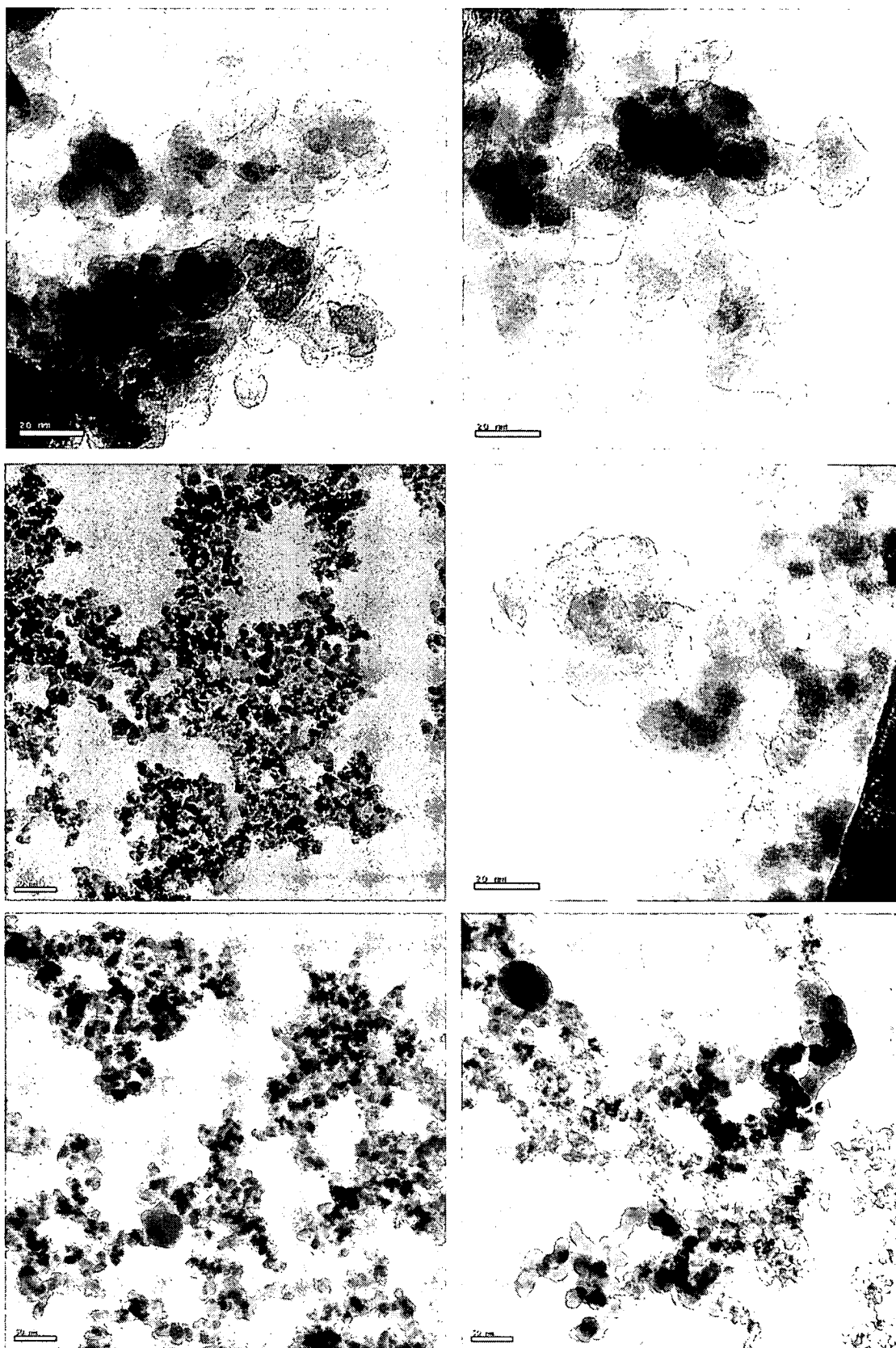


圖 111 奈米級二氧化矽粉體 TEM 照片

次微米級二氧化矽( $\text{SiO}_2$ , submicron) SEM 照片

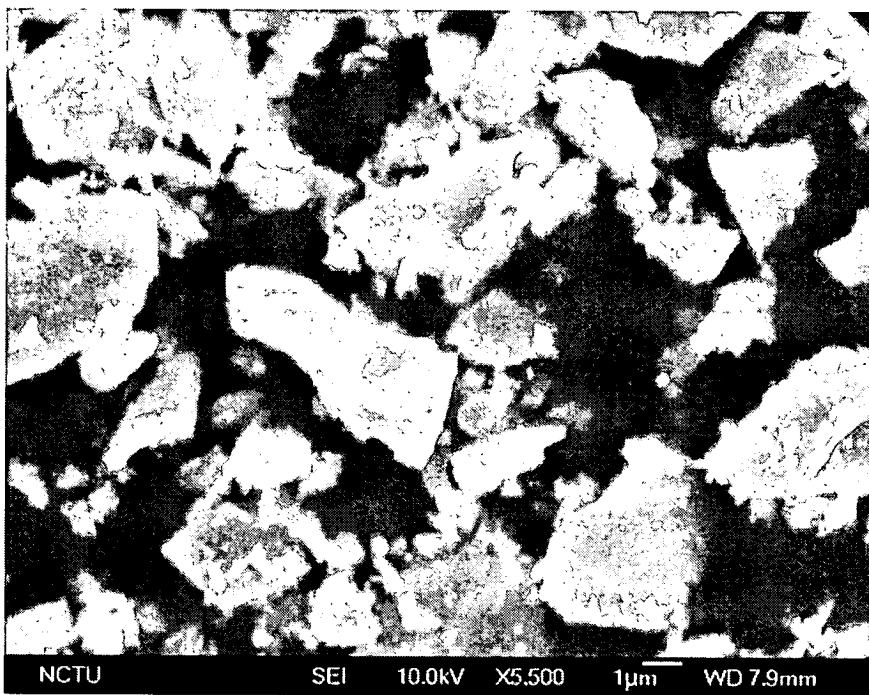
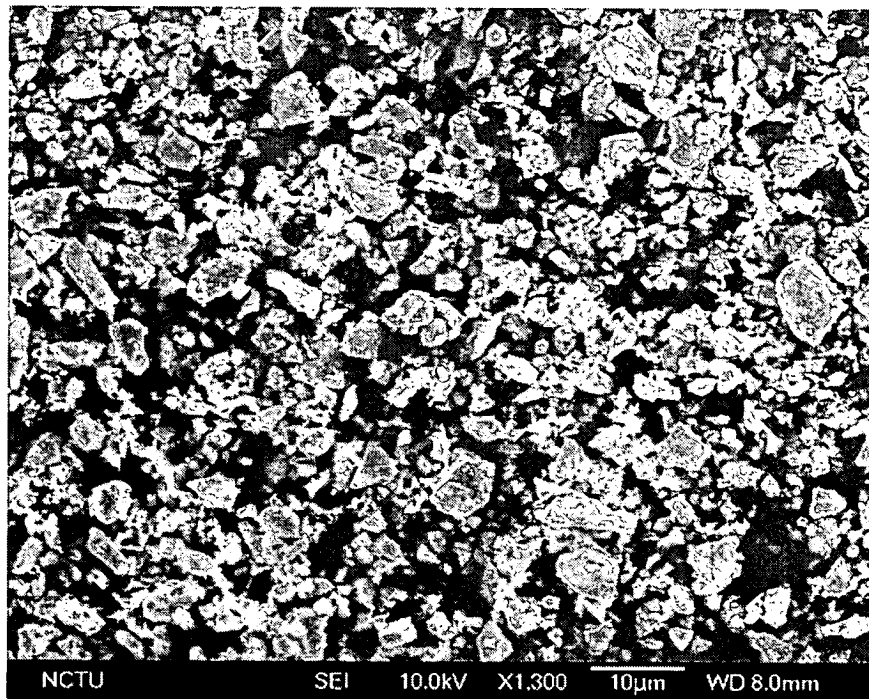


圖 112 次微米級二氧化矽粉體 SEM 照片

## 第二節 粉體作業環境奈米微粒暴露測量

### 壹 奈米微粒粒徑分布及空間濃度分布

本研究首先探討作業場所奈米微粒粒徑分布及空間濃度分布，量測點 1~6 為自動監測儀器的移動點量測位置，移動點量測所使用的儀器有 FMPS、Aerosol Trak、CPC 3007，量測方式為將上述儀器放置在移動推車進行採樣。表 33 則是作業場所的粉體包裝時間。實驗結果由圖 145 和圖 146 可知 FMPS 與 CPC 3007 的量測結果均顯示在包裝期間量測點 3 的微粒數目濃度最高，因為此點最靠近粉體包裝機，其次為第 1 及第 2 點，4、5、6 點濃度較低。

97 年 4 月 28 日(第一次)、6 月 5 日(第二次)和 8 月 7 日(第三次)在二氧化鈦粉體包裝區進行微粒濃度量測，表 50 為此粉體廠的包裝時間，第一次量測時的粉體包裝都是採小包包裝的方式(每包重量為 25 公斤)，第二次量測時的包裝方式除了在下午 3 點 38 分至 3 點 43 分使用小包包裝外，其餘包裝時間都是採大包包裝(每包重量為 800 公斤)的方式，第三次量測時粉體包裝都是採小包包裝的方式。小包包裝的流程為粉體由小包包裝機包裝成袋後經由輸送帶輸送至門口附近的裝卸區，最後經由柴油堆高機搬運至鄰廠堆放。大包包裝為粉體經大包包裝機包裝成袋後，柴油堆高機直接駛進大包包裝機附近裝載以已包裝的粉體送至鄰廠放置。

由於在實驗室粉體逸散實驗的結果顯示大部分經散逸的粉體其粒徑都大於 100 nm，故先量測柴油堆高機在粉體包裝區運作是否會對此區的微粒濃度造成影響。圖 113 為堆高機廢氣與廠內背景微粒濃度的粒徑分布，由圖中可知柴油堆高機產生廢氣中的微粒數目濃度約為工廠微粒背景濃度的 10 倍，所以堆高機在進入粉體包裝區運作時會因排放廢氣中含有碳煙而造成即時量測儀器的量測值突然上升(圖 114)。表 34 工廠背景和柴油堆高機廢氣中微粒的數目中間粒徑為 35.37 nm 及 21.8 nm，幾何標準差為 2.07 及 2.66。



表 33 粉體廠包裝時間，二氧化鈦粉體廠

97/04/28		
工作項目	時間	包裝時間
開工	08:00~08:30	30 分鐘
包裝	10:10~10:40	30 分鐘
包裝	12:40~14:15	95 分鐘
包裝	14:55~15:25	30 分鐘
收工	15:50~16:00	10 分鐘
97/06/05		
開工	8:50~9:20	30 分鐘
包裝	10:10~10:30	20 分鐘
包裝	12:45~13:15	30 分鐘
包裝	14:55~15:35	40 分鐘
包裝	15:55~16:00	5 分鐘
97/08/07		
開工	08:55~09:50	55 分鐘
包裝	10:12~10:37	25 分鐘
包裝	13:30~14:25	55 分鐘
包裝	15:30~16:10	40 分鐘
包裝	17:20~17:50	30 分鐘

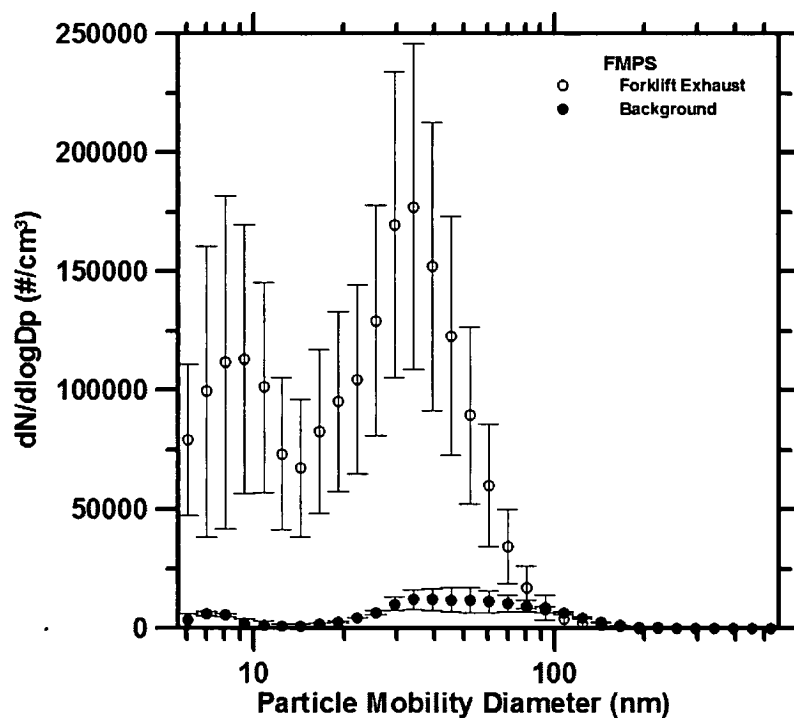


圖113 堆高機廢氣與廠內背景微粒濃度的粒徑分布, 97/09/05, 二氧化鈦粉體廠

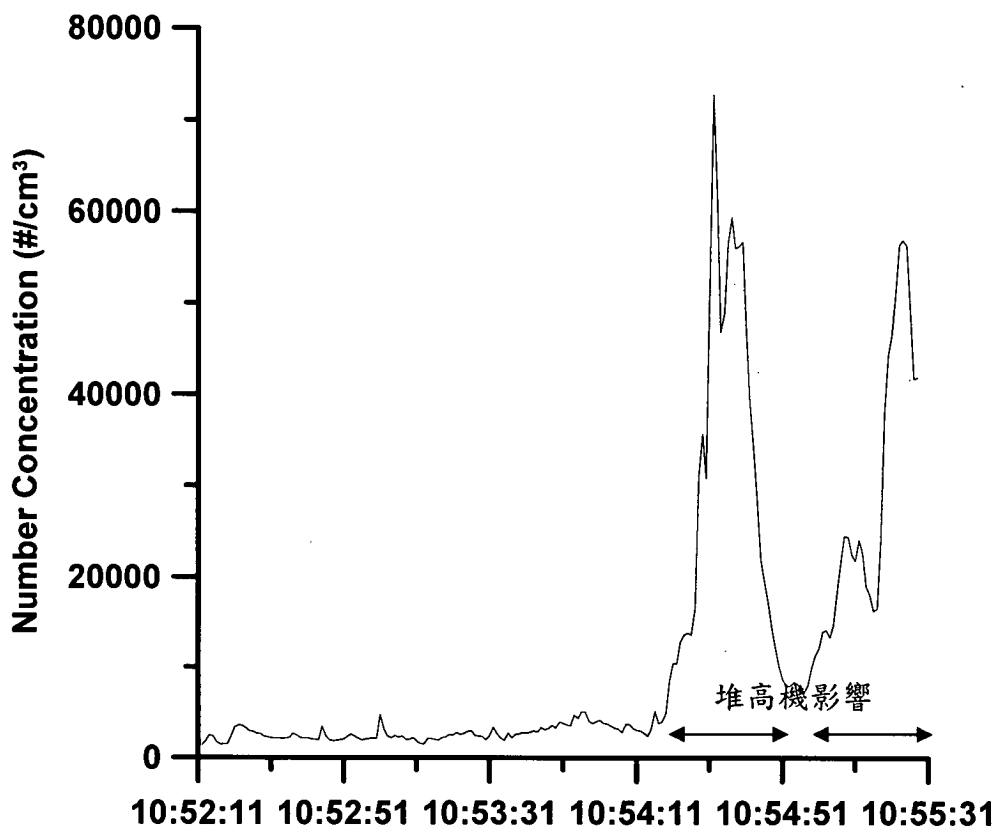


圖114 FMPS量測柴油堆高機對廠內微粒數目濃度的影響, 97/09/05,  
 二氧化鈦粉體廠

表34 工廠背景和柴油堆高機廢氣中微粒的數目中間粒徑及幾何標準差, 97/09/05,  
 二氧化鈦粉體廠

	FMPS	
	NMD (nm)	GSD
工廠背景	35.37	2.07
柴油堆高機廢氣	21.8	2.66

第一次在粉體包裝區的量測結果如下，由圖 115 和圖 116 為利用 FMPS 與 CPC 3007 的量測結果所繪出的空間微粒數目濃度分布圖。在上午 11 點時，此時粉體包裝區剛停止包裝不久所以每個量測點的數目濃度都很接近；在下午 2 點時，此時正在進行粉體包裝所以會有粉體逸散的情形產生，在量測點 3 可以發現數目濃度明顯提高，但在量測點 1、2、6 的數目濃度卻下降，這是因為在粉體包裝區的左側放置 2 台風扇，當在進行粉體包裝時風扇就會開啓，導致微粒被吹散，使量測點 1、2、6 之濃度降低；下午 6 點時，此時粉體包裝區已停工 2 小時，在量測點 1、2、3、4 的數目濃度都呈現下降的趨勢，但在量測 5、6 卻是呈現上升的趨勢，這是因為這 2 個量測點比較靠近工廠大門，所以較易受到外界環境的影響，導致微粒的數目濃度上升。

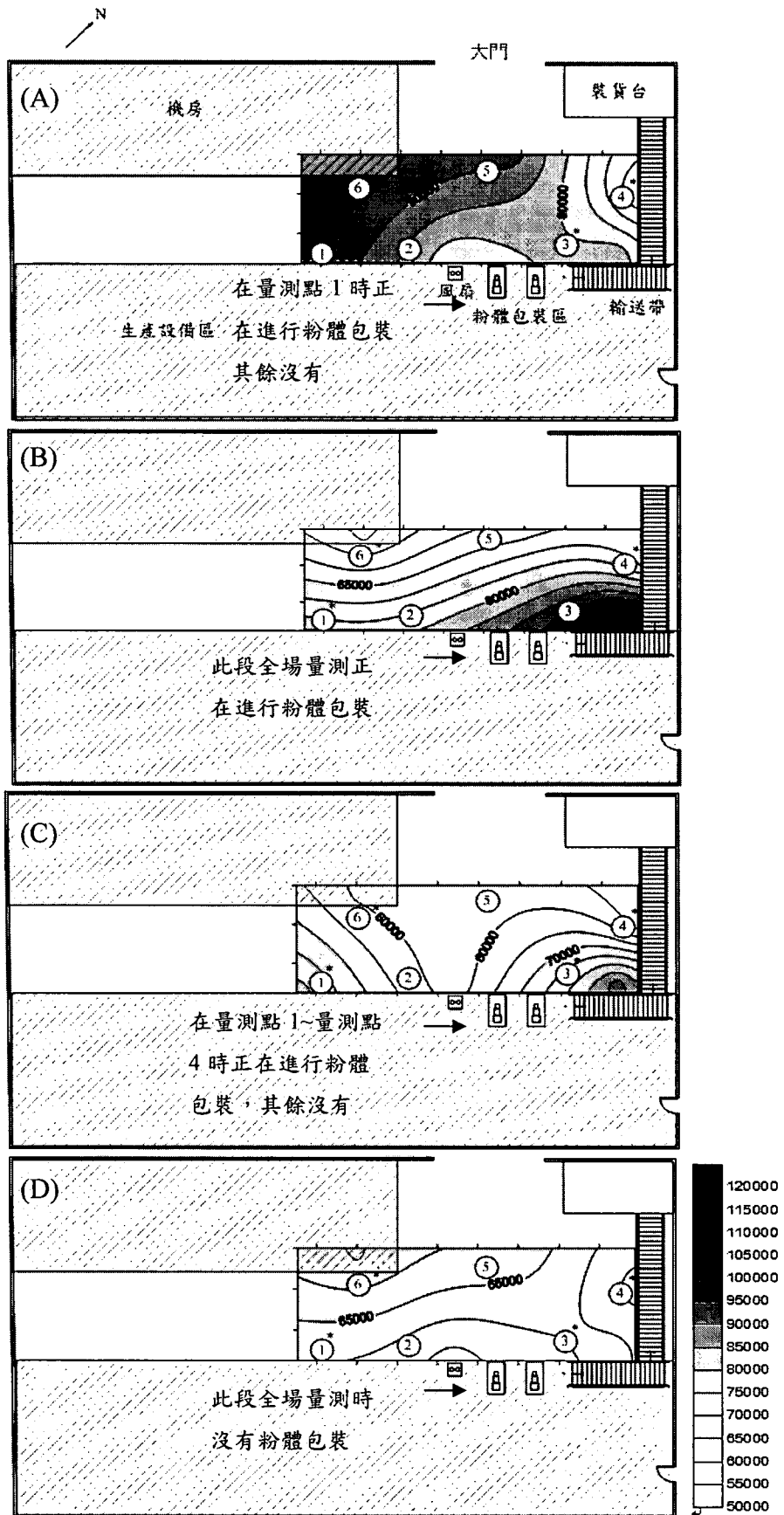


圖115 FMPS所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠  
 (A)AM10:30~11:12 (B)PM1:19~1:57 (C)PM3:07~3:42 (D)PM5:04~5:39

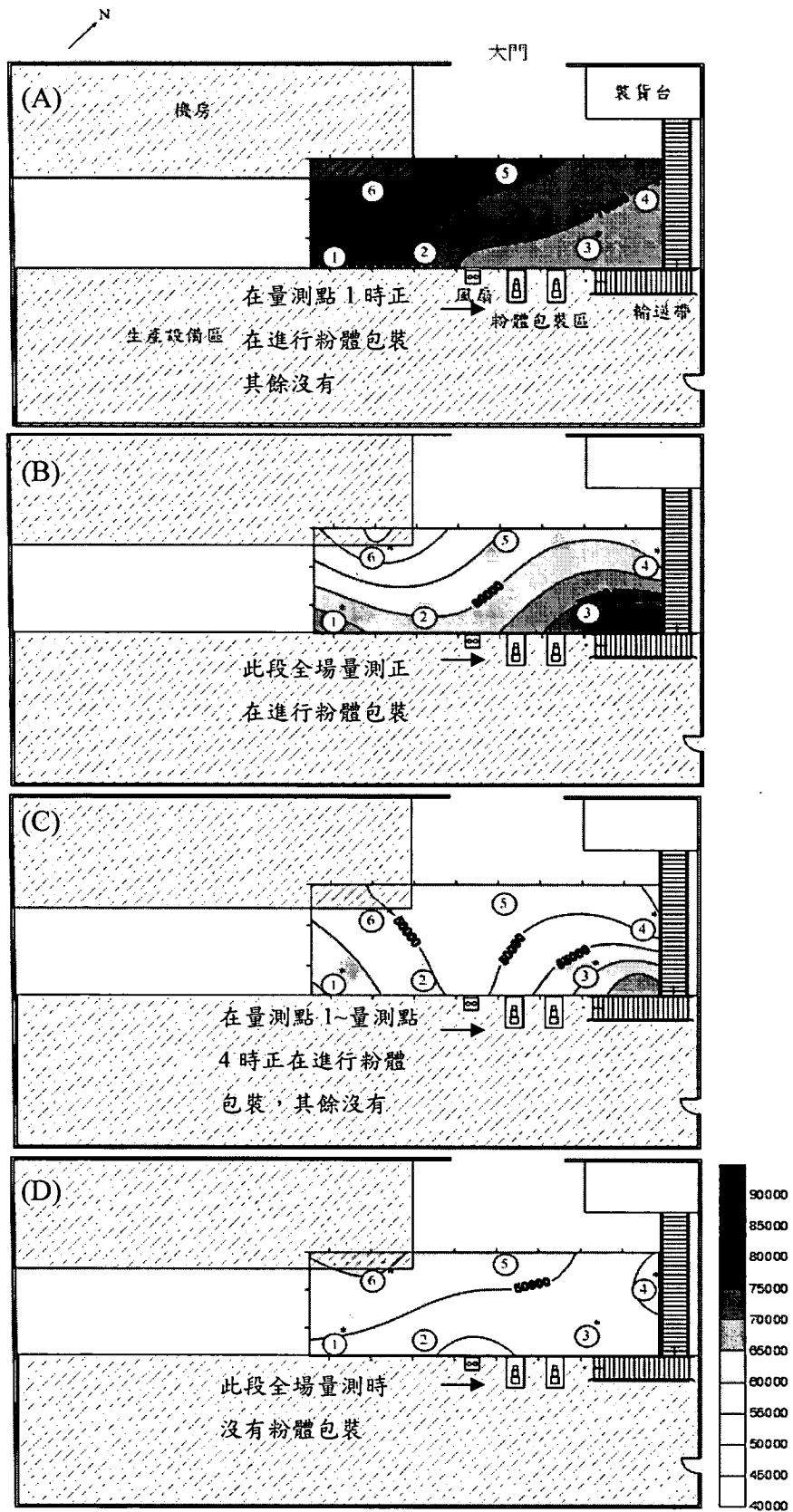


圖116 CPC 3007所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠  
 (A)AM10:30~11:12 (B)PM1:19~1:57 (C)PM3:07~3:42 (D)PM5:04~5:39

第二次在粉體包裝區的量測結果如下，圖 117 和圖 118 為利用 FMPS 與 CPC 3007 的量測結果所繪出的空間微粒數目濃度分布圖。第一次全廠量測時間為從 10:28~11:28，量測結果為在量測點 1 的微粒數目濃度明顯高於其他量測點，因為在對量測點 1 進行量測時正值粉體包裝，所以數目濃度也比較高，在對其他量測點進行量測時，由於粉體作業已停止所以數目濃度都較量測點 1 低。第二次全廠量測時間為 13:24~14:15，因為量測時因粉體包裝已停止，所以除了在量測點 2 濃度略高以外，其餘量測點的數目濃度大致上都很接近，會造成量測點 2 濃度略高可能是因為此量測點最靠近大包粉體包裝機，雖然包裝作業已停止但較靠近產生源所以濃度可能較其他量測點高。第三次全廠量測時間為 15:18~16:30，在 15:35~16:00 時停止風扇的運轉，發現在量測點 3 的數目濃度上升，16:10 時粉體包裝作業停止，量測點 1 和 6 都因離大包包裝機較遠且位於工廠內部，所以數目濃度呈現下降的趨勢，量測點 5 因最靠近大門易受外界環境影響，所以數目濃度沒下降。

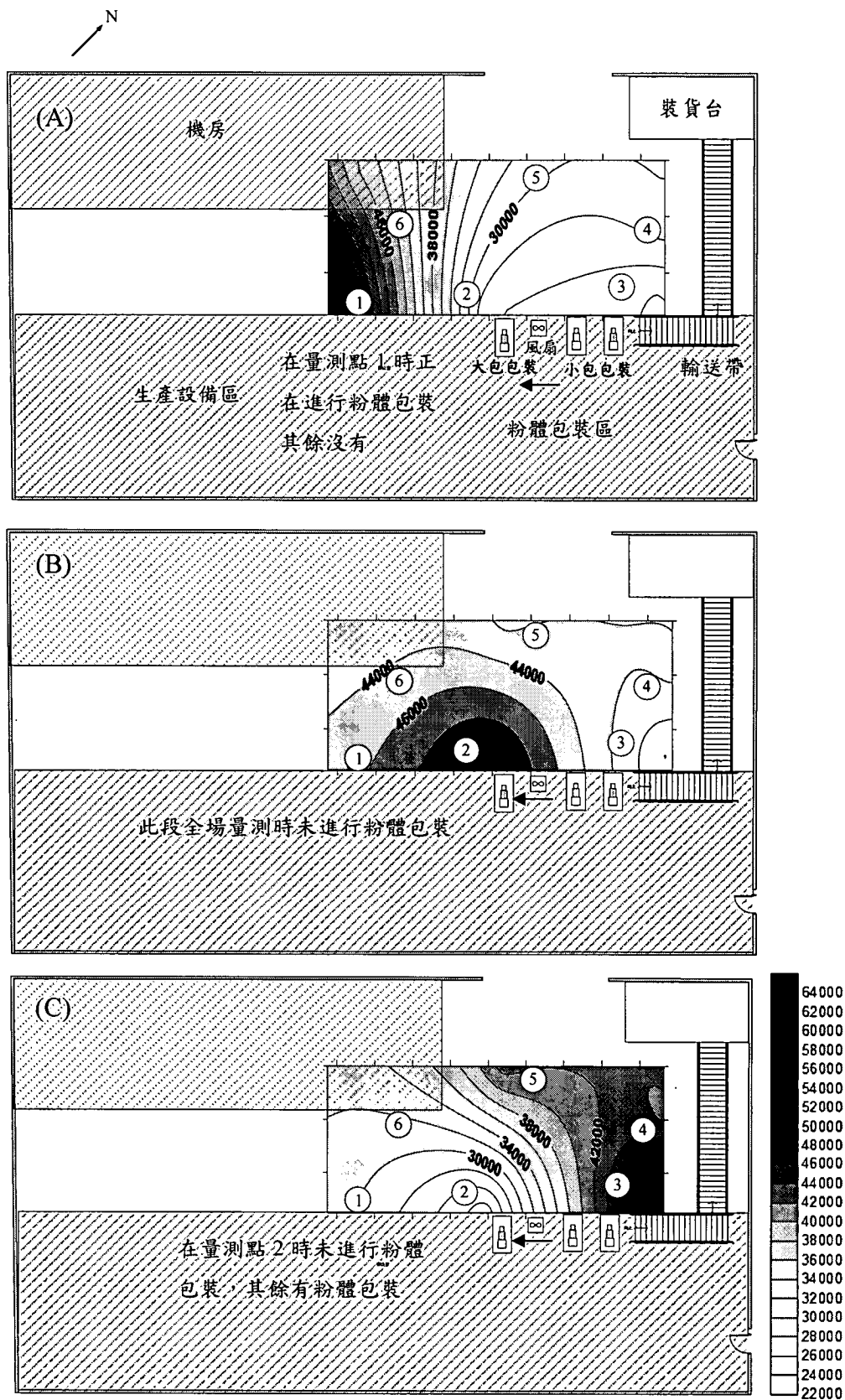


圖117 CPC 3007所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠  
 (A) AM 10:28~11:28 (B) PM 1:24~2:15 (C) PM 3:18~4:30

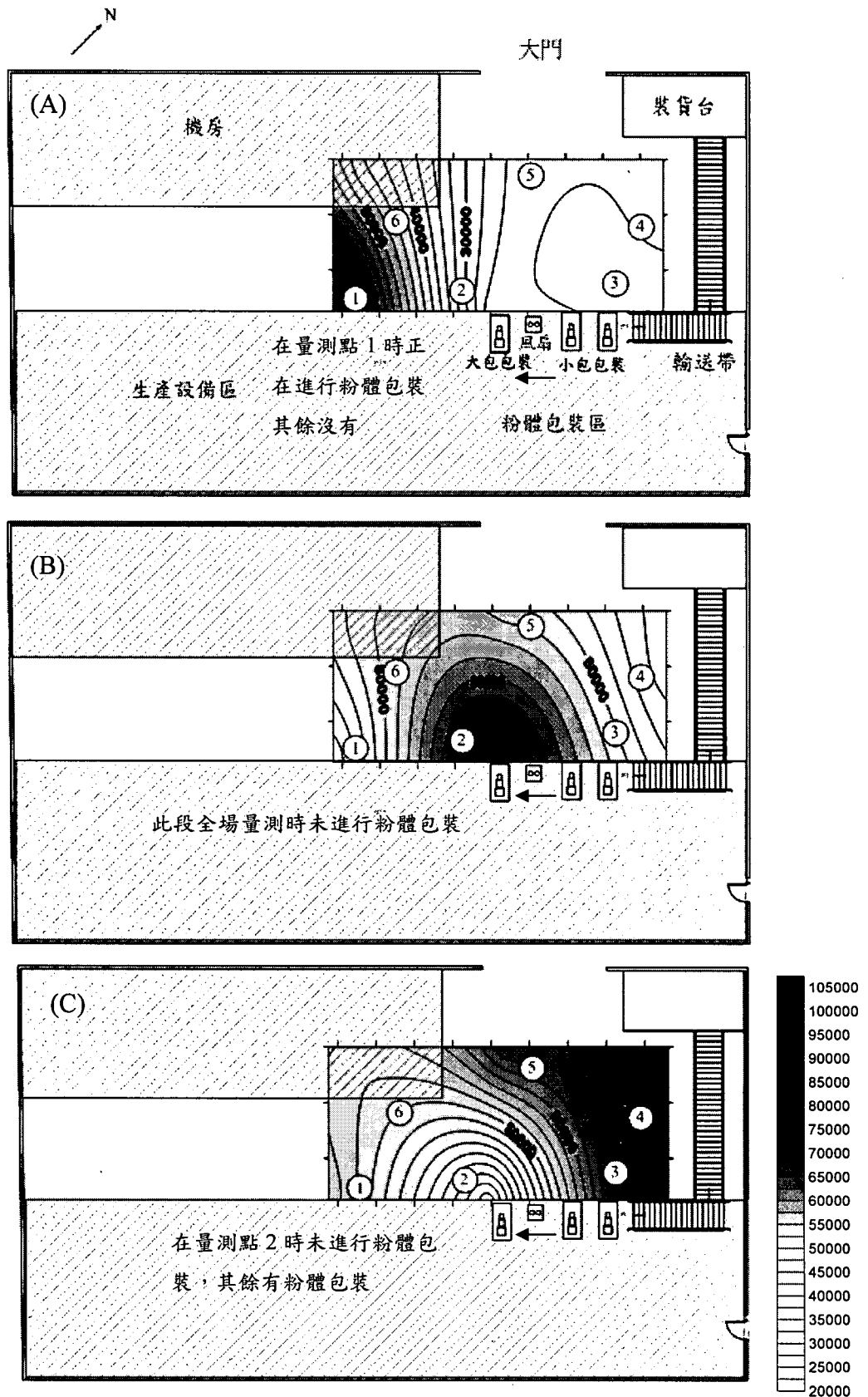


圖118 SMPS所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠  
 (A) AM 10:28~11:28 (B) PM 1:24~2:15 (C) PM 3:18~4:30



第三次在粉體包裝區的量測結果如下，圖119和圖120為利用FMPS與CPC 3007的量測結果所繪出的空間微粒數目濃度分布圖。第一次全廠量測時間為10:25~11:17，量測結果為除了在量測點1和6的微粒數目濃度稍微偏低外，其餘量測點都很接近，主要原因為量測點1和6距離粉體包裝機較遠，所以量測到的數目濃度也較低。在第二次全廠量測結束後馬上開始第三次全場量測，這兩次全廠量測的時間為13:15~14:56，量測結果為除了在第三點的數目濃度較其他量測點高外，其餘量測點的數目濃度大致上都很接近，主要原因為下午的粉體包裝作業是進行第二次循環量測的第三點才開始，所以第三點的數目濃度偏高可能是下料剛開始時所逸散出來的微粒，之後因為風扇的開啓造成微粒數目濃度的下降，但與第一次循環量測時的數目濃度比較，第二次和第三次全廠量測時所量測到的數目濃度都明顯比較低，這是因為在第一次循環量測時因為跳電所以風扇並未開啓，造成第一次全廠量測時的數目濃度都遠較其他時間所量測的數目濃度高。第四次全廠量測時間為16:30~17:15，結果為每個量測點的微粒數目濃度都很接近，由於此次全廠量測是在停止粉體包裝後20分鐘後進行，因沒有粉體逸散源故粉體包裝區中各量測點的數目濃度都很相似。另外第三次量測時風扇放置在粉體包裝機的正前方，所以包裝時所逸散的粉塵都會被吹到粉體包裝機後方，導致在靠近粉體包裝機的量測點所測得的微粒數目也很低，故此次的微粒濃度量測結果都較前二次量測低。

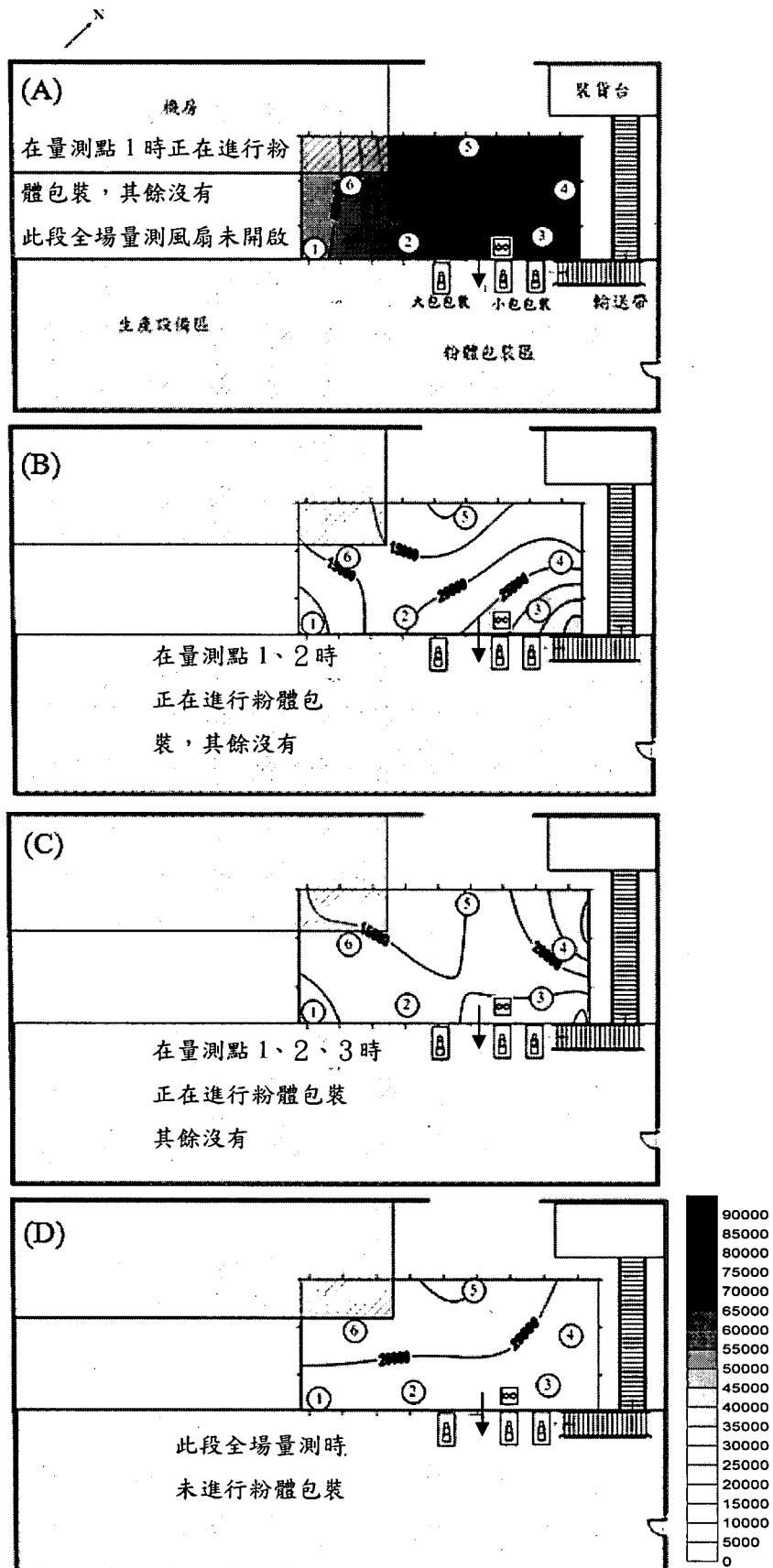


圖119 FMPS所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠  
(A) AM 10:25~11:12 (B) PM 1:15~2:00 (C) PM 2:02~2:51 (D) PM 4:30~5:10

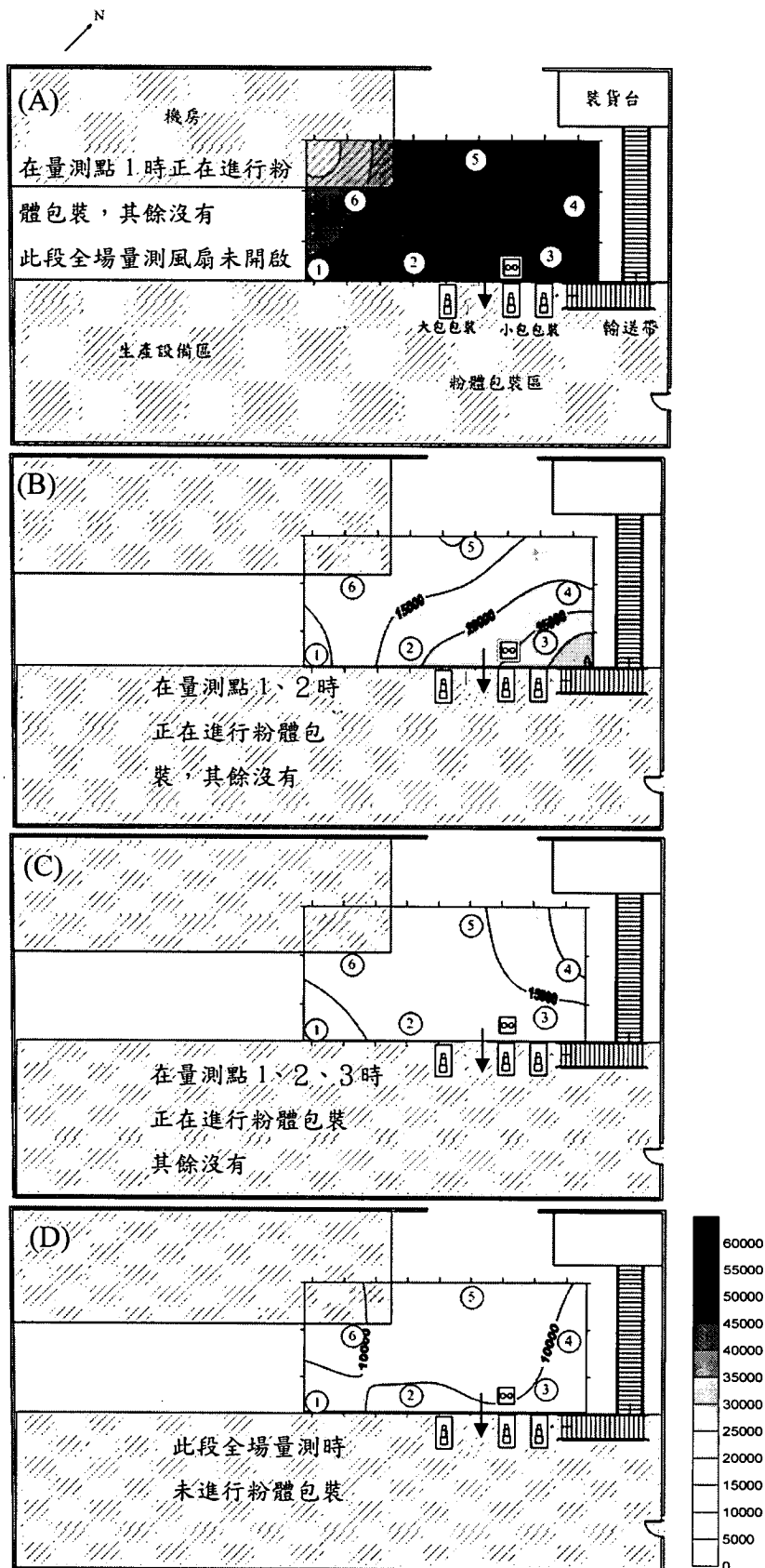


圖120 CPC 3007所量測的微粒數目濃度空間分布圖, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠  
(A) AM 10:25~11:12 (B) PM 1:15~2:00 (C) PM 2:02~2:51 (D) PM 4:30~5:10

TiO<sub>2</sub> 粉體逸散實驗粒徑分布結果如下，如圖 121 所示 FMPS 的量測結果顯示經 SSPD 所分散的粉體粒徑大部分都大於 100 nm 且眾數約為 200 nm，而 SMPS 的量測結果如圖 122 所示，顯示經 SSPD 所分散的粉體粒徑大部分都大於 100 nm 且眾數約為 200 nm，FMPS 所量測到的微粒數目濃度高出 SMPS 許多，這是因為腔體的有兩個出氣口，FMPS 所量測的入口位在腔體壁中間的位置距離進氣口較近，故量測到的微粒數目濃度較高，而 SMPS 所量測的入口位在腔體底部距離進氣口較遠，故量測到的微粒數目濃度較低。大包包裝的二氧化鈦粉體的數目濃度略比小包包裝的二氧化鈦粉體高。表 35 為逸散二氧化鈦微粒的數目中間粒徑及幾何標準差，FMPS 的量測結果如下，大包包裝粉體數目中間粒徑為 171.92 nm，小包包裝粉體數目中間粒徑為 177.14 nm。另外利用掃描式電子顯微鏡(SEM) 觀察石原粉體廠所生產的二氧化鈦微粒外貌。圖 123 為二氧化鈦粉體的掃描式電子顯微鏡照相圖。由圖 123(a)可見，二氧化鈦微粒具有聚集性，使得部分微粒難以獨立分散。由圖 123(b)可見，二氧化鈦微粒粒徑大約介於 100~500 nm 之間。由圖 123(c)可見，單一二氧化鈦微粒粒徑為 408.9 nm。由掃描式電子顯微鏡照相圖可以進一步推斷由工廠產生的二氧化鈦微粒不屬於奈米微粒。

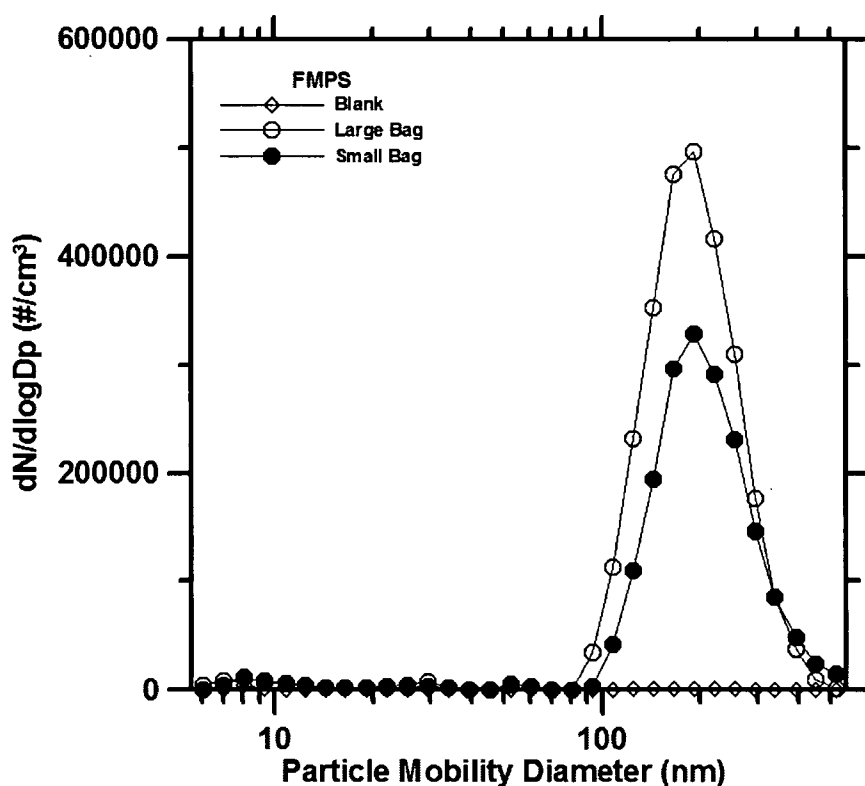


圖 121 FMPS 量測被逸散二氧化鈦微粒的粒徑分布

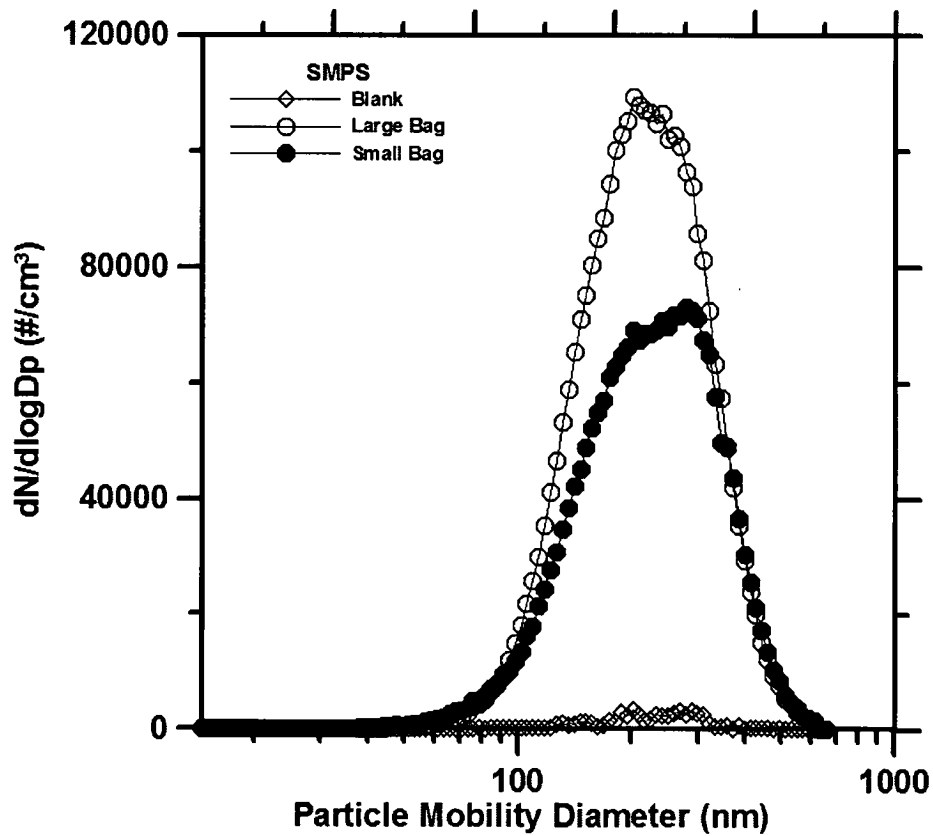


圖 122 SMPS 量測被逸散二氧化鈦微粒的粒徑分布

表 35 逸散二氧化鈦微粒的數目中間粒徑及幾何標準差

	FMPS		SMPS	
	NMD (nm)	GMD	NMD (nm)	GMD
腔體背景	122.15	2.08	223.82	1.55
大包包裝粉體	171.92	1.39	210.80	1.49
小包包裝粉體	177.14	1.44	221.54	1.57

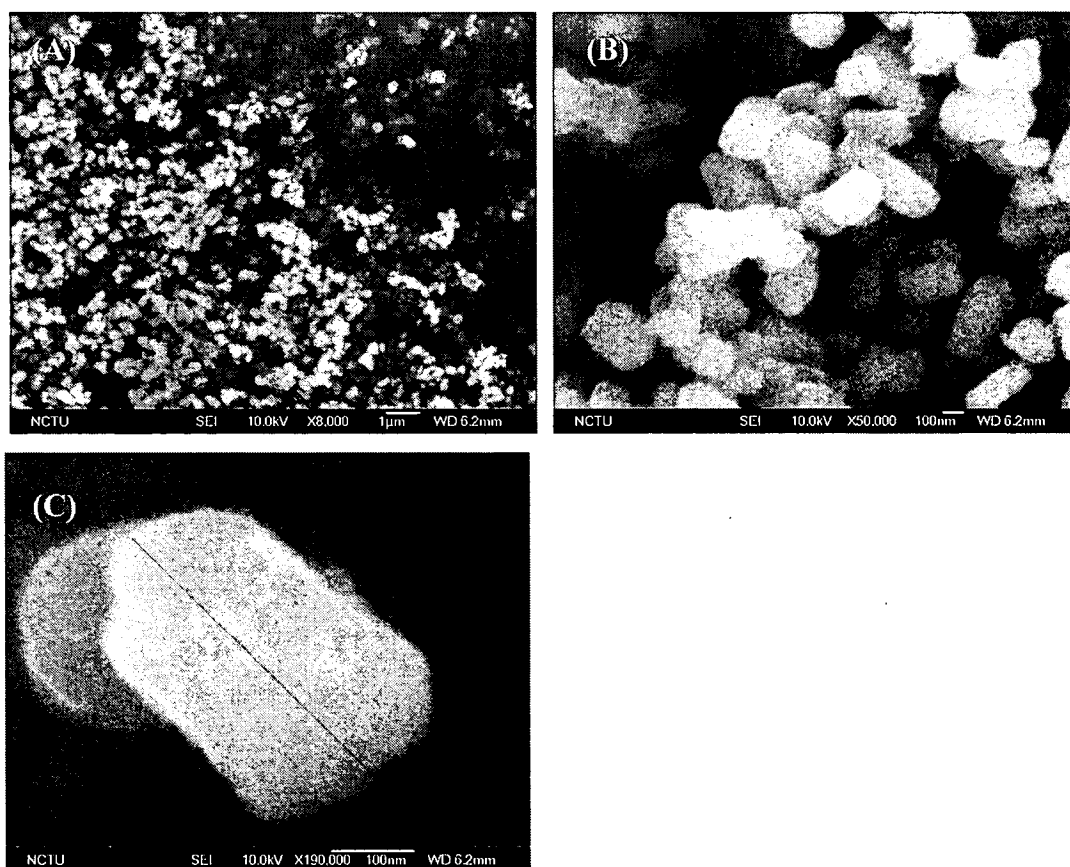


圖 123 掃描式電子顯微鏡照片圖, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

(A)倍率: 8000 (B)倍率: 50000 (C)倍率: 190000

本研究在 97 年 4 月 28 日及 8 月 7 日在廠外分別利用 SMPS 和 FMPS 量測的微粒粒徑分布, 再將其量測結果與廠內 FMPS 所量測的微粒粒徑分布比較, 由圖 124 可發現第一次利用 SMPS 在廠外的量測結果顯示在 40 nm 處有一峰值出現且微粒數目濃度與廠內的微粒數目濃度相近(圖 127), 此次在廠外利用 MOUDI 所採集奈米微粒的重量濃度為  $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 此濃度也與在廠內的奈米微粒重量濃度相近( $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。在 8 月 7 日 16:15~16:25 也在廠外利用 FMPS 進行短暫的微粒粒徑分布量測, 其量測距離工廠大門約 6 公尺。量測結果如圖 125 所示, 微粒粒徑分布也是與 SMPS 的量測結果一樣, 其粒徑分布的峰值大約都在 30~40 nm 之間。

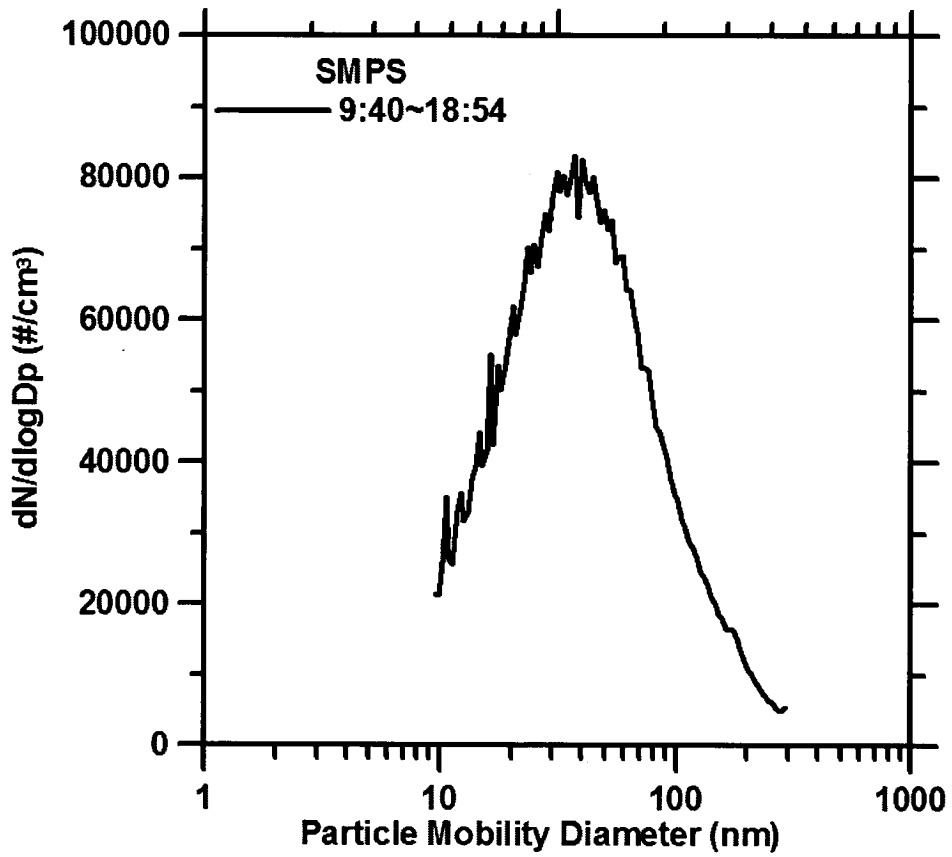


圖124 廠外的微粒粒徑分布, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

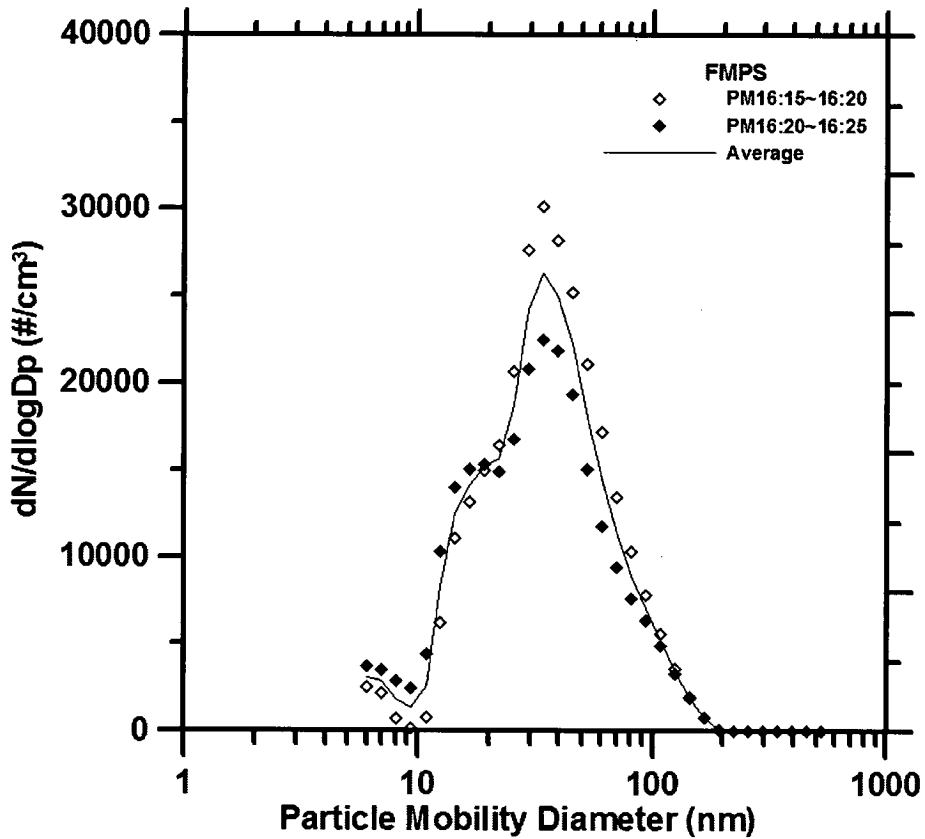


圖125 廠外的微粒粒徑分布, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

圖 126、圖 127 和圖 130、圖 131 為 FMPS 在粉體包裝區在第一次和第三次採樣時所量測微粒粒徑分布，圖 128 和圖 129 為 SMPS 在第二次採樣時所量測的微粒粒徑分佈。這三次量測結果皆顯示在粉體包裝區中的微粒粒徑在 10 nm 和 40 nm 處有峰值產生，其中以 40 nm 的微粒居多，此現象與在廠外利用 FMPS 和 SMPS 量測的微粒粒徑分布相同。另外比較圖 125 和圖 131 第三次全廠量測中量測點 5 的數據可以發現，在廠內所量測到的微粒數目濃度較廠外高，主要原因為柴油堆高機在廠內運作時所排放的廢氣中含有碳煙，導致即時儀器在廠內量測的數目濃度比在廠外高，由圖 114 也顯示堆高機在進入粉體包裝區運作時會造成即時量測儀器的量測值突然上升。由兩次在廠外利用即時儀器量測粒徑分布發現與廠內微粒的粒徑分布相當接近，故可推論廠內所量測到的微粒為廠外大氣微粒因對流而流入到廠內，而同一量測點不同時段的全廠量測結果發現微粒數目濃度有時差異會很大，主要原因為堆高機在廠內運作所導致。



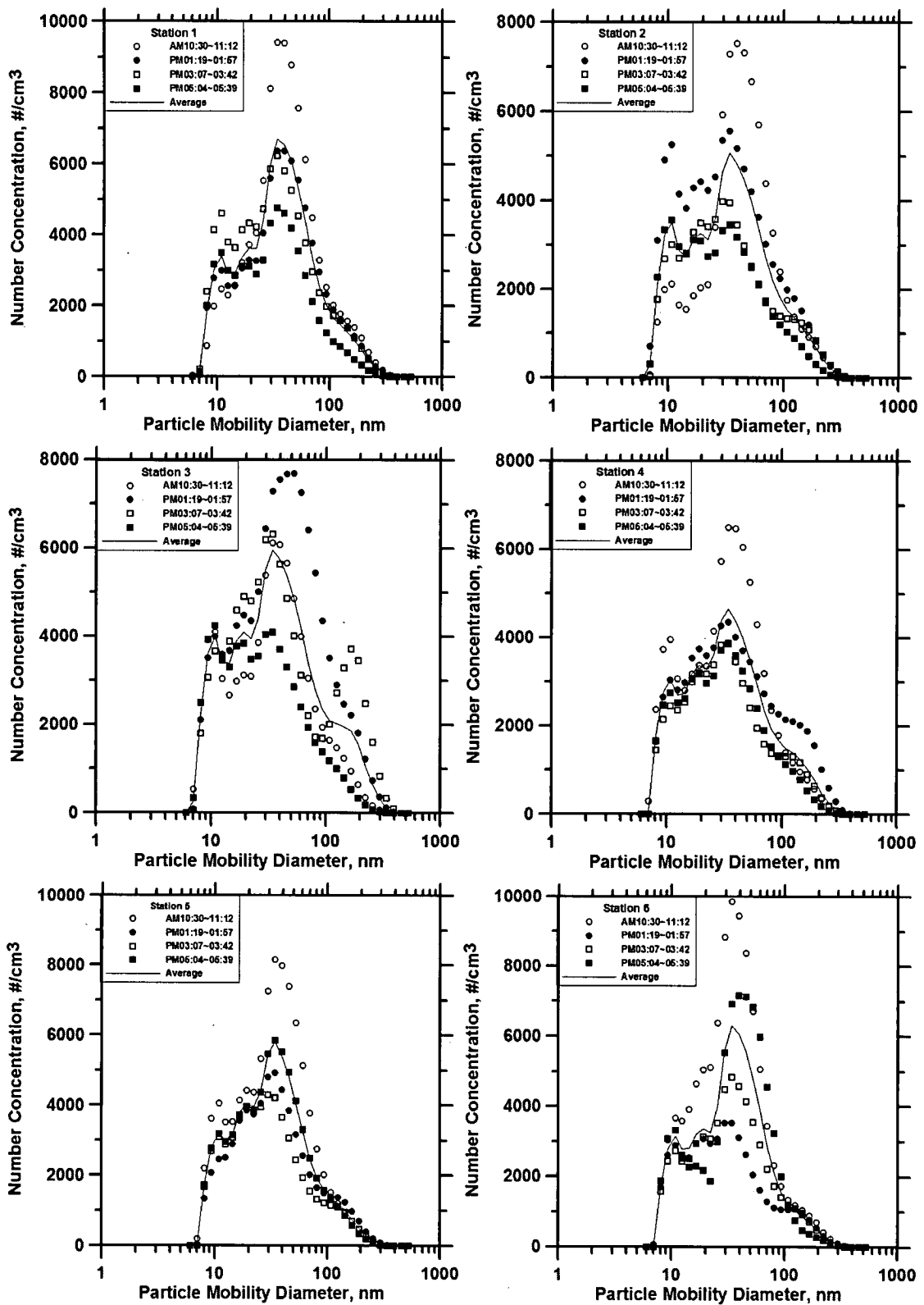


圖126 FMPS所量測的微粒粒徑分布 I, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

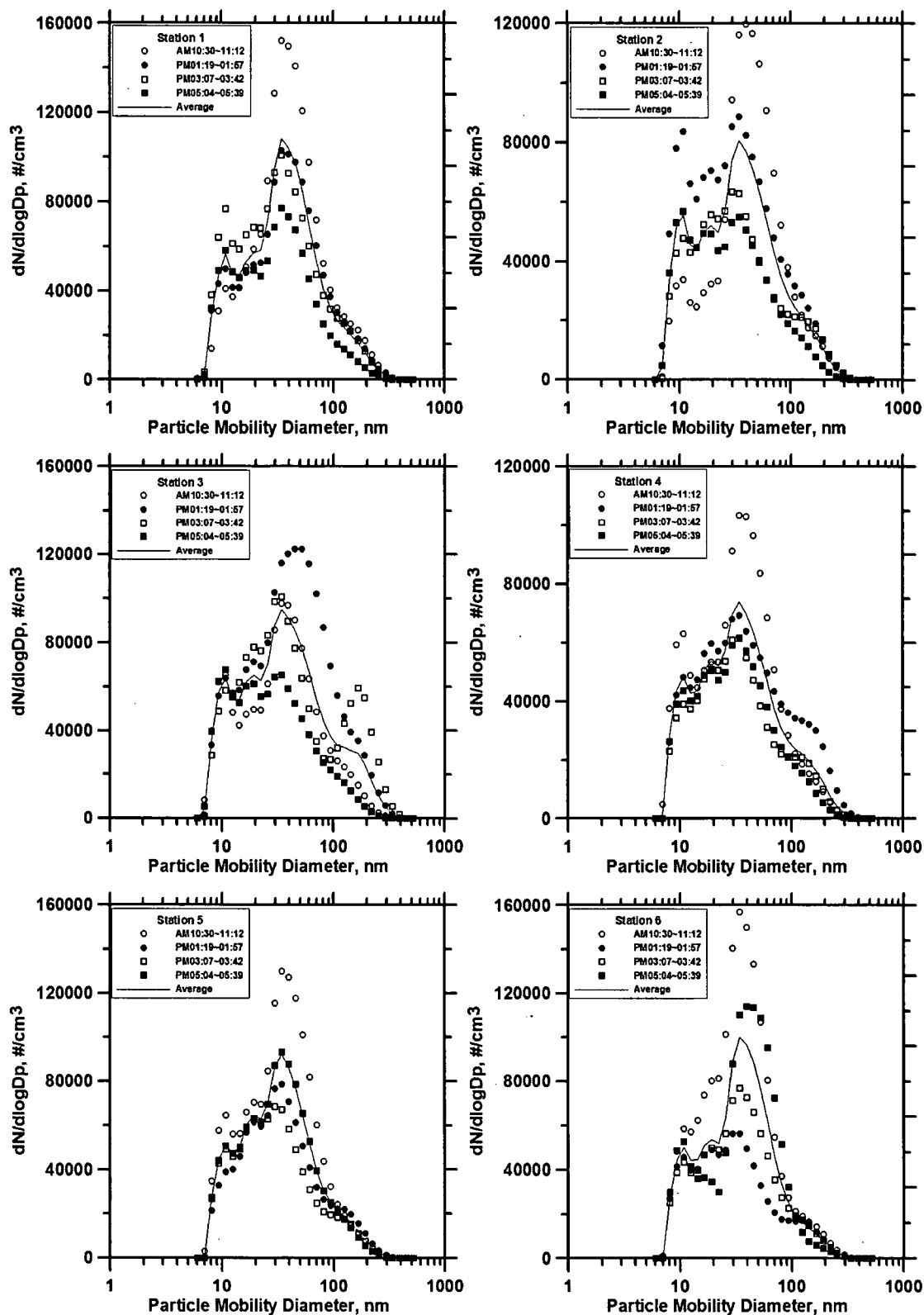


圖127 FMPS所量測的微粒粒徑分布 II, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

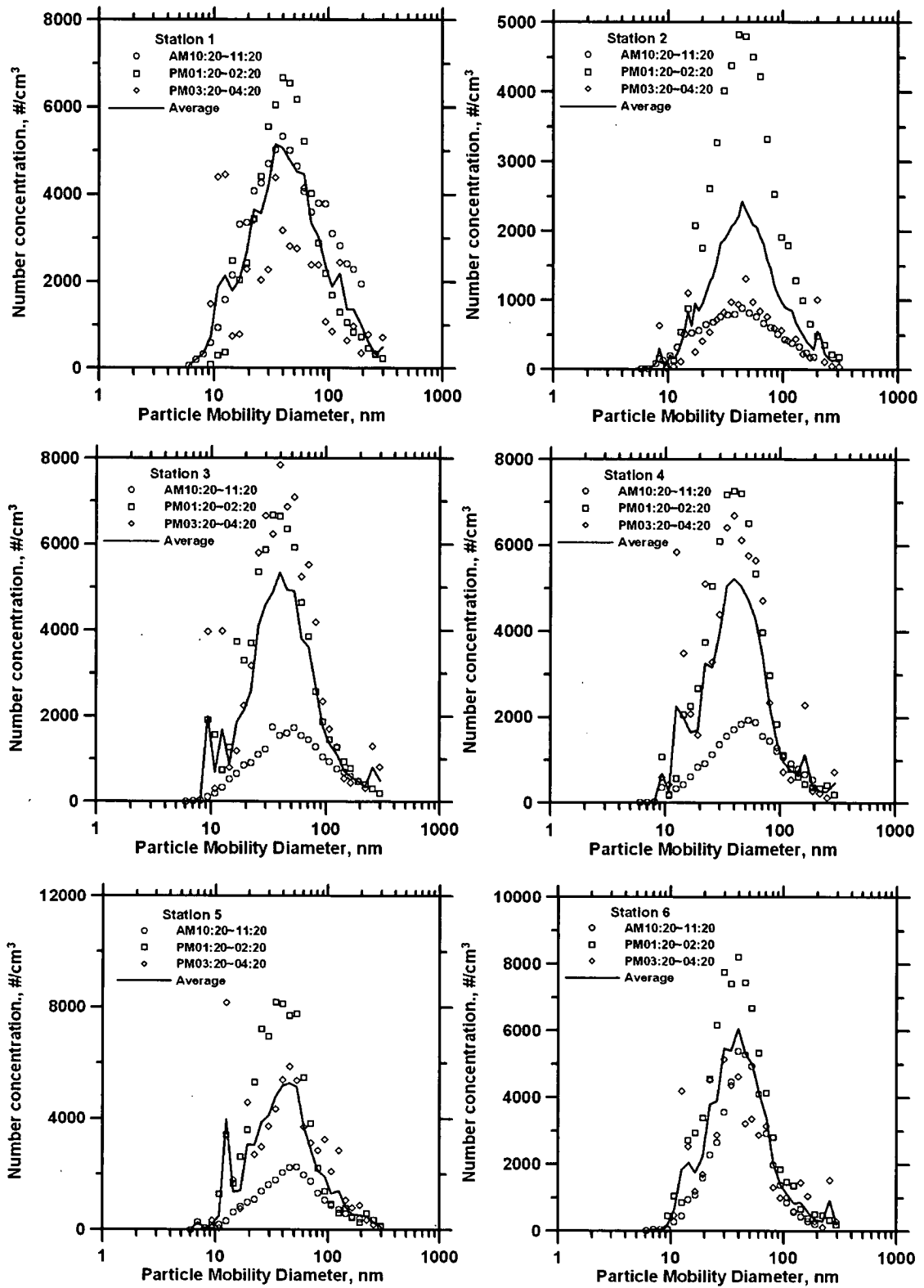


圖128 SMPS所量測的微粒粒徑分佈 I, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

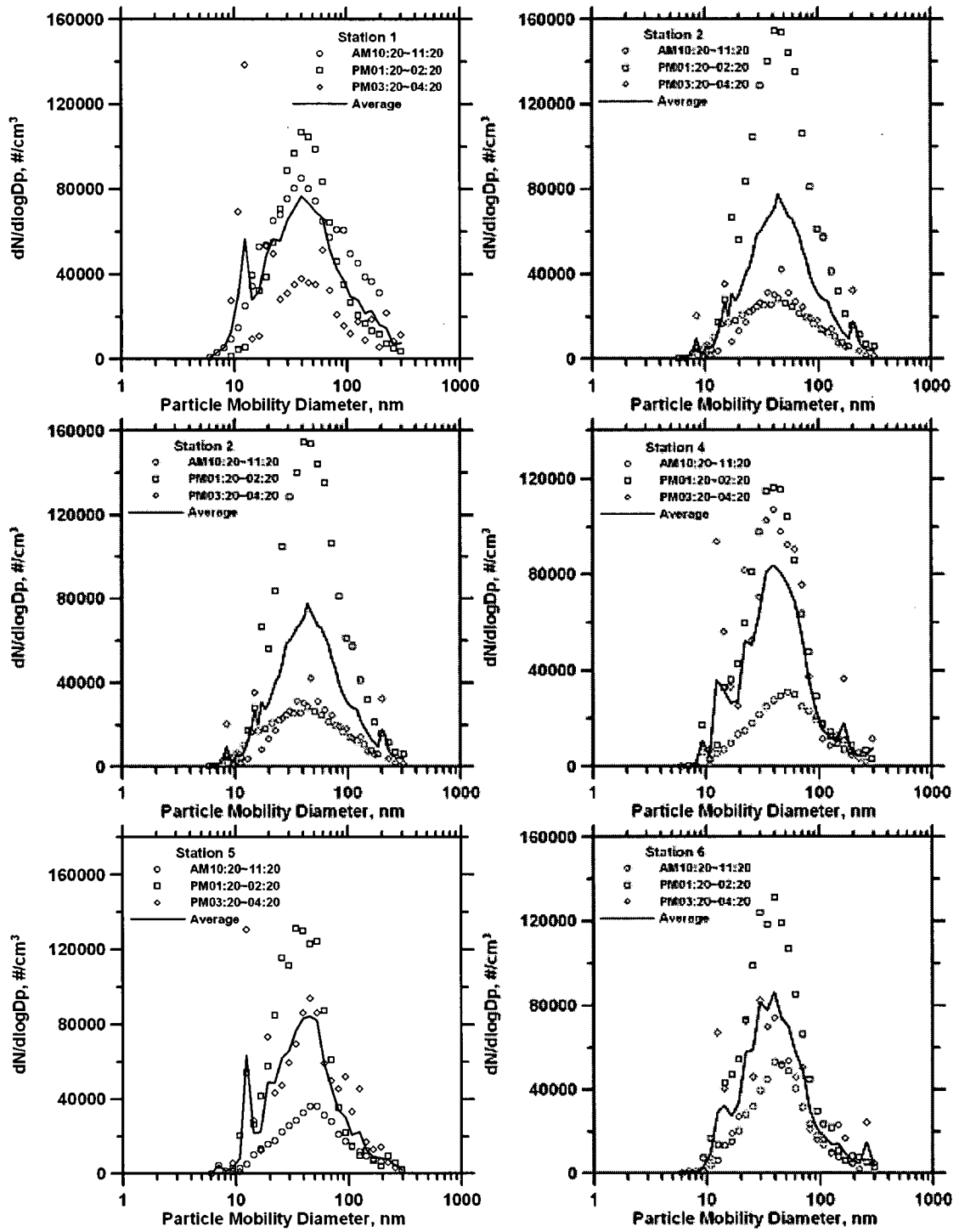


圖129 SMPS所量測的微粒粒徑分佈 II, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

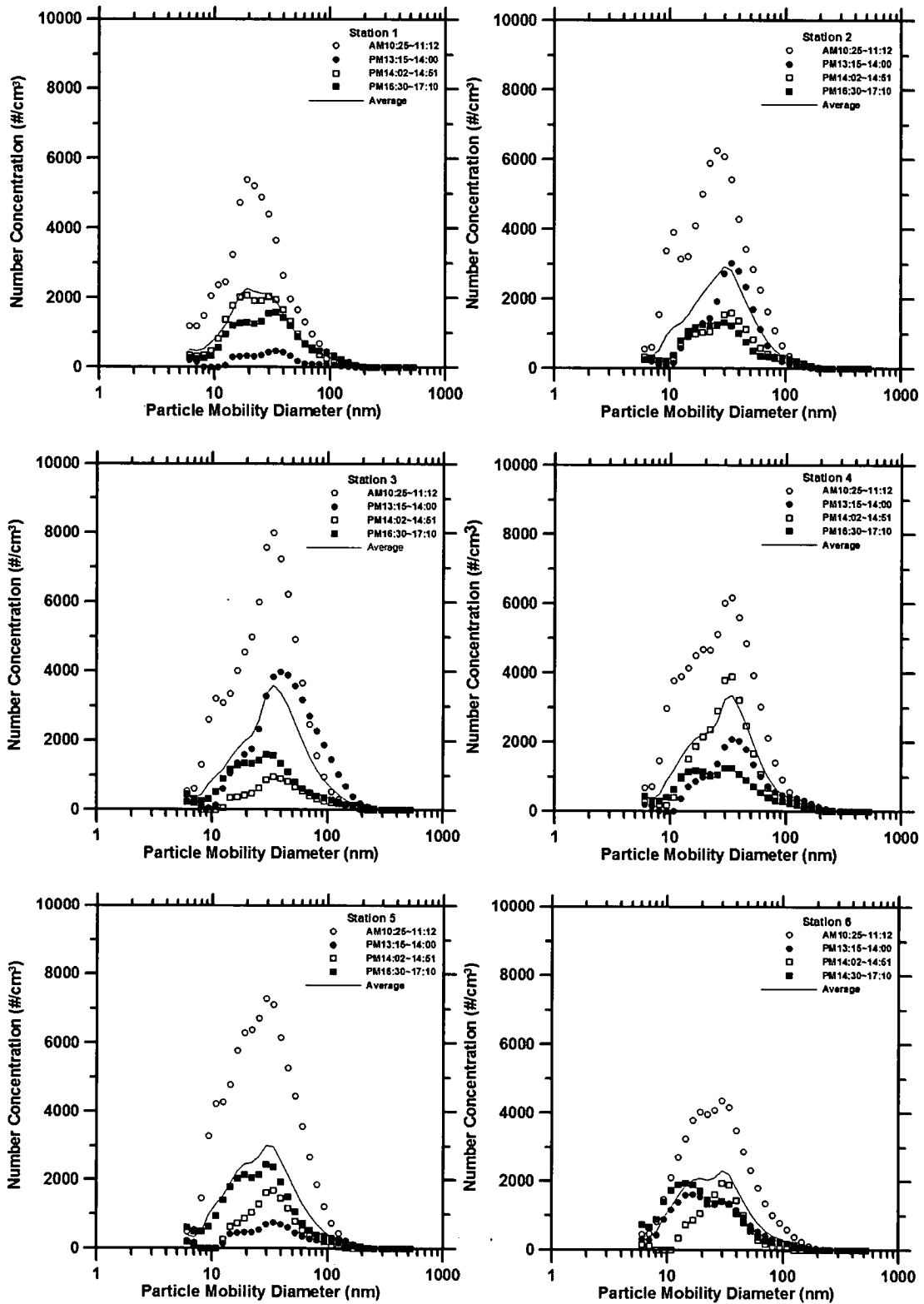


圖130 FMPS所量測的微粒粒徑分佈 I, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

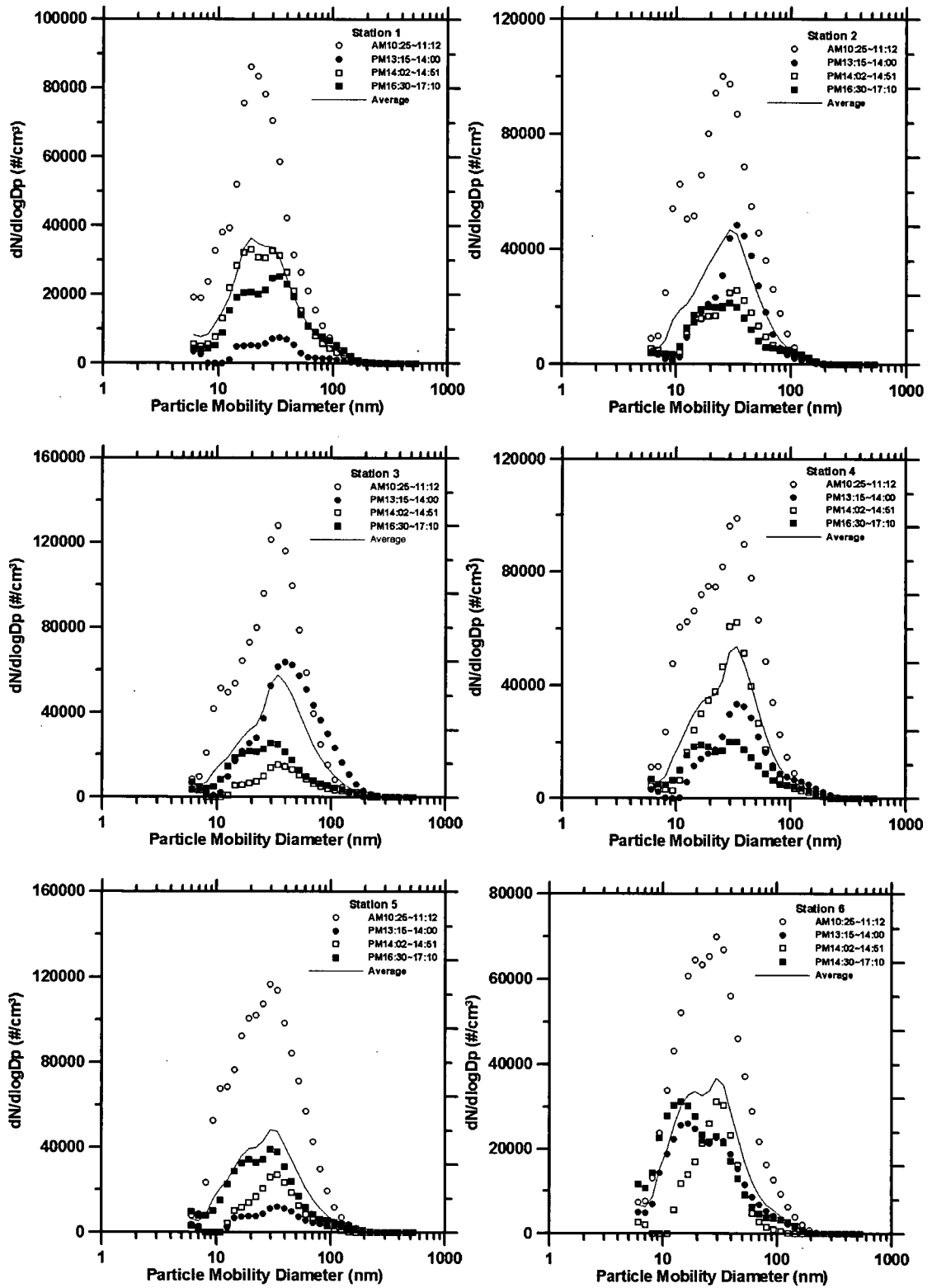


圖 131 FMPS 所量測的微粒粒徑分佈 II, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

第一次量測時由 Aerosol Trak 量測各量測點的胸腔區微粒總表面積濃度如圖 132 所示，其量測粒徑範圍為 10~1000 nm，結果為在量測點 3 的胸腔區微粒總表面積濃度也是最高，主要原因為此量測點最靠近粉體包裝機，故可知當微粒的數目濃度越高時，其微粒總表面積就越大，其他點之表面積濃度與微粒數目濃度之變化趨勢相同。第三次量測時可呼吸微粒的表面積濃度如圖 133 所示，除了在第一次全廠量測時微粒表面積濃度偏高外，其餘全廠量測的微粒表面積濃度都較低，主要原因為第一次全廠量測發生跳電導致風扇未開啓造成濃度偏高。

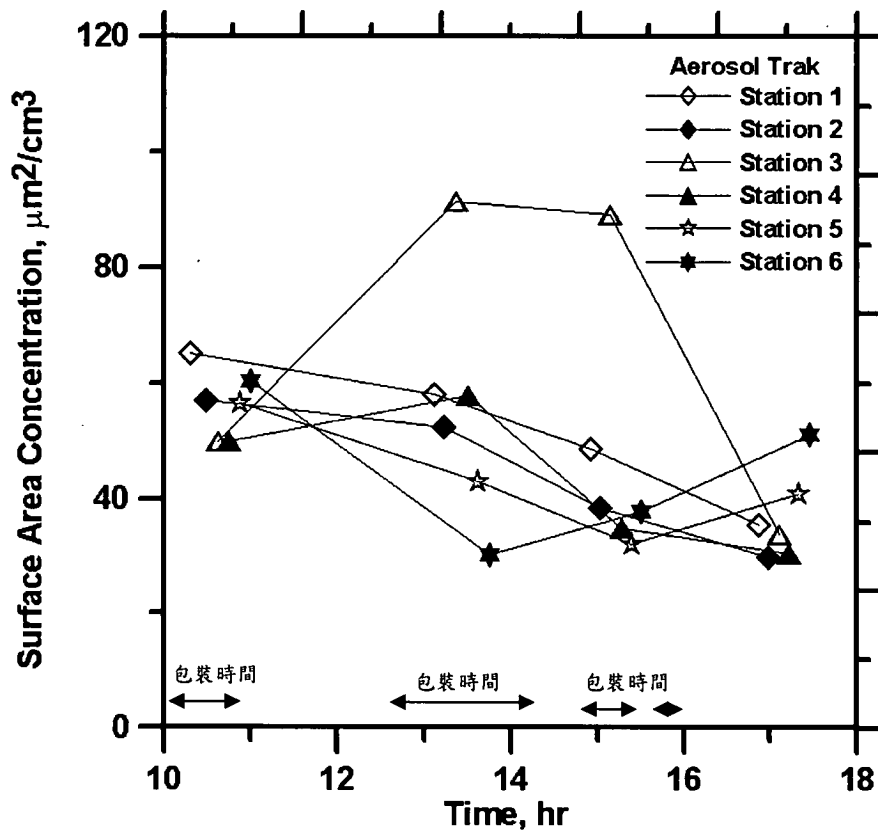


圖132 Aerosol Trak所量測的胸腔區微粒總表面積濃度, 97/04/28,  
二氧化鈦粉體廠

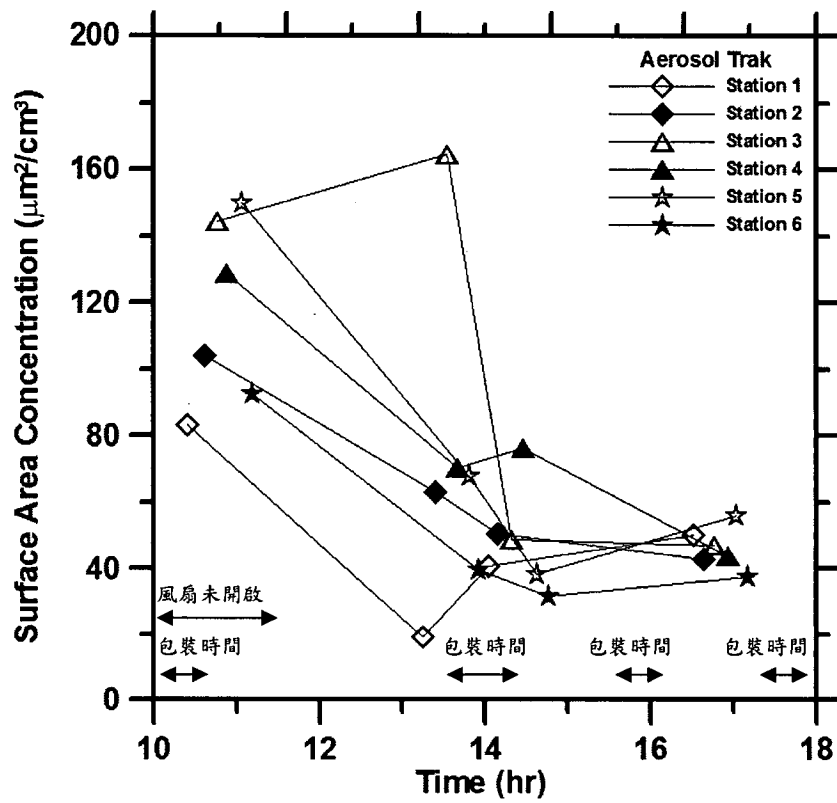


圖133 Aerosol Trak所量測的可呼吸性微粒的總表面積濃度, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠



## 貳 固定點微粒重量濃度及粒徑分布

本研究也探討作業場所固定點微粒重量濃度及粒徑分布，在固定量測點 1、3、4、6 所使用的儀器有 2 個 IOSH 旋風器/點，量測點 3 另有 2 台 MOUDI (Model 110, MSP Corp., St. Paul, USA)、2 台尼龍旋風器及 1 台 Dust Trak，量測方式為將上述儀器放置在粉體包裝區的固定量測點進行至少 8 小時的粉體採樣。採樣結果如下，圖 134 為第一次採樣時利用 Dust Trak 在工廠粉體包裝區進行微粒重量濃度即時量測，一天工作中進行四次的分裝作業，時間分別是 10:10~10:40、12:40~14:15、14:55~15:25 及 15:55~16:00，而使用 Dust Trak 即時監測儀器在固定量測點 3 量測結果顯示，在整體量測期間內可呼吸性微粒濃度有明顯上升，而以時段 2 及時段 3 最為明顯，分別有最高 3.717  $\text{mg}/\text{m}^3$  及 5.752  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。圖 135 可知在量測點 3 在包裝與非包裝時的平均濃度，在離出料口 4.1 m 處粉體包裝時和粉體未包裝時的濃度差異將近 3.4 倍。

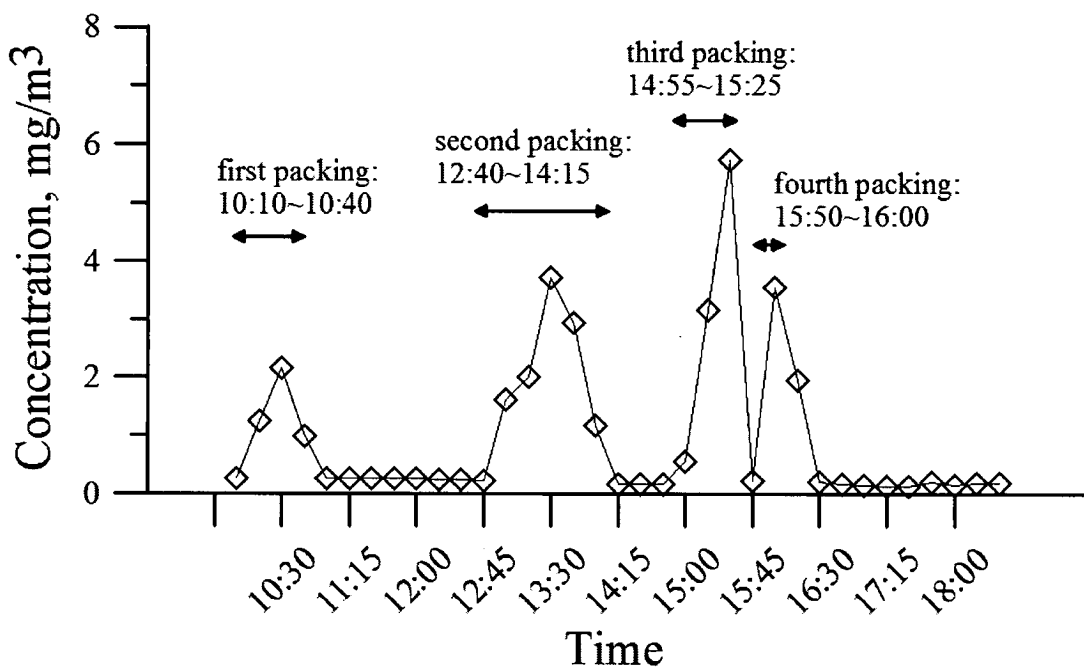


圖 134 Dust Trak 於量測點 3 進行全程量測, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

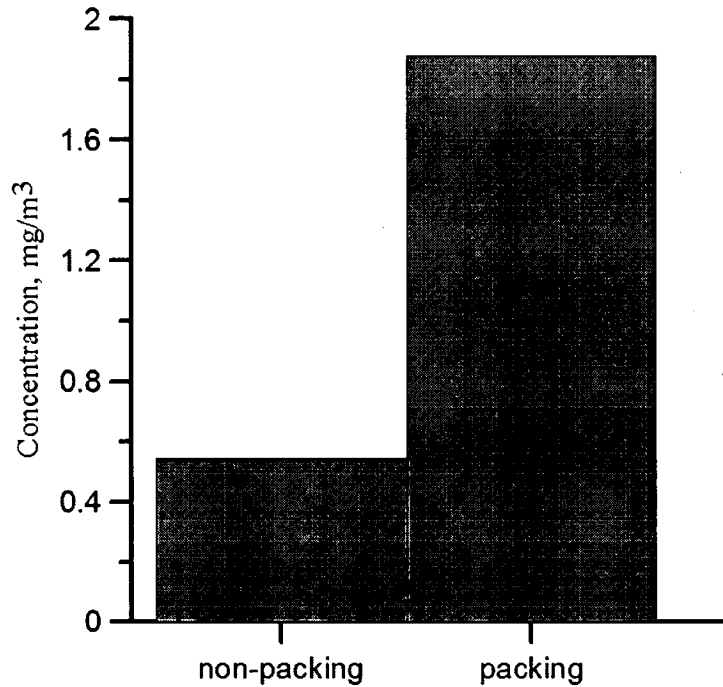


圖 135 量測點 3 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

圖 136 為第二次採樣時利用 Dust Trak 在工廠粉體體包裝區進行微粒重量濃度即時量測，一天工作中進行四次的分裝作業，時間分別是 10:15~10:35、12:49~13:15、14:54~15:35 及 15:55~16:00，而使用 Dust Trak 即時監測儀器量測結果顯示，在整體採樣期間內可呼吸性微粒濃度有明顯上升，而以時段 1 及時段 2 最為明顯，分別有最高  $6.681 \text{ mg/m}^3$  及  $5.562 \text{ mg/m}^3$ ；而在各量測點的比較上，可觀察出量測點 1 及量測點 6 的量測數值皆有偏低的傾向，其他量測點則以量測點 2 濃度上升最為明顯。圖 136 可知在各個量測點的量測上，可觀察出量測點 3、量測點 4、量測點 5，量測到的濃度較高，而量測點 2 在包裝與非包裝時的平均濃度如圖 137 所示，在離出料口 8.4 m 處粉體包裝時和粉體未包裝時的濃度差異將近 1.75 倍。

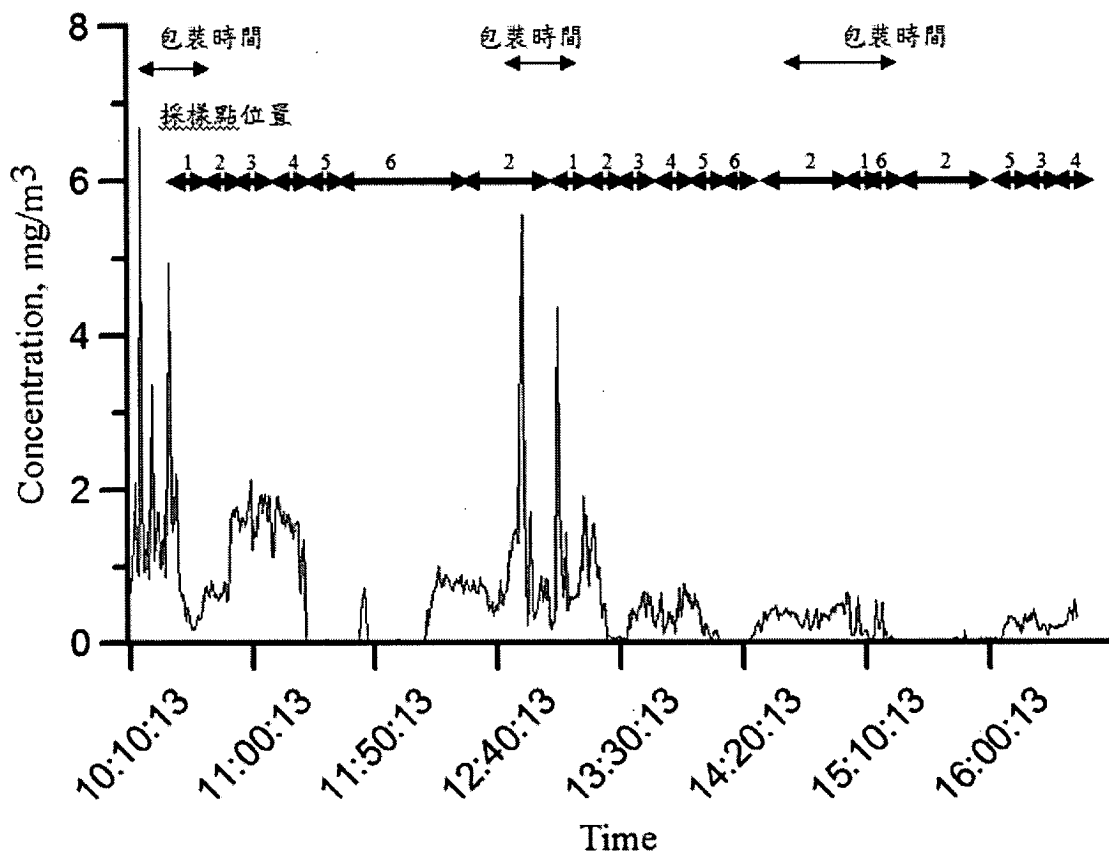


圖 136 Dust Trak 各點的測量濃度與包裝作業時間, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

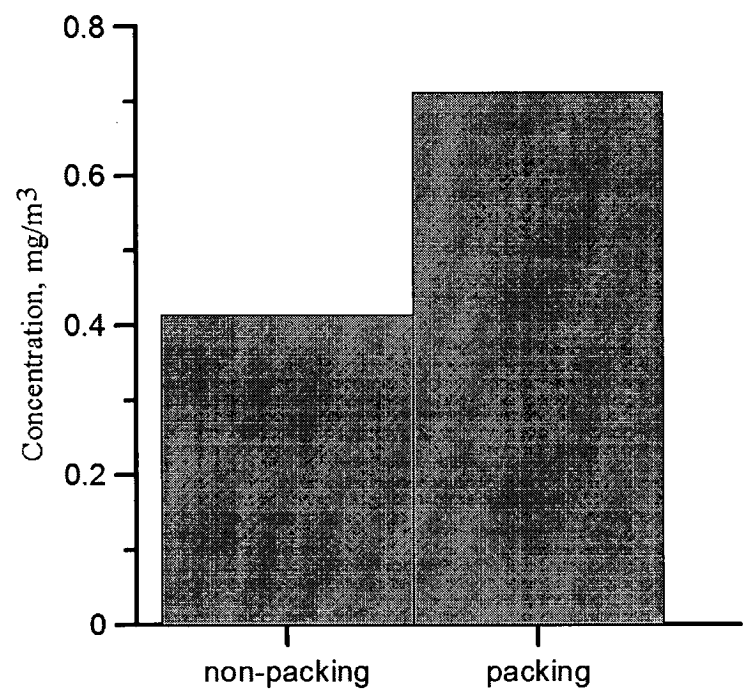


圖 137 量測點 2 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

圖 138 可知該工廠粉體體包裝區，一天工作中進行五次的分裝作業，時間分別是 8:55~9:50、10:12~10:37、13:30~14:25、15:30~16:10 及 17:20~17:50，而使用 Dust Trak 即時監測儀器量測結果顯示，在整體採樣期間內，可呼吸性微粒濃度有明顯上升，而以時段 1 及時段 3 最為明顯，分別有最高 1.600 mg/m<sup>3</sup> 及 1.081 mg/m<sup>3</sup>。圖 138 可知在各個量測點的量測上，可觀察出量測點 3、量測點 4、量測點 5，濃度上升趨勢較為明顯，而量測點 6 在包裝與非包裝時的平均濃度如圖 139 所示，在離出料口 12.9 m 處粉體包裝時和粉體未包裝時的濃度差異將近 1.9 倍。

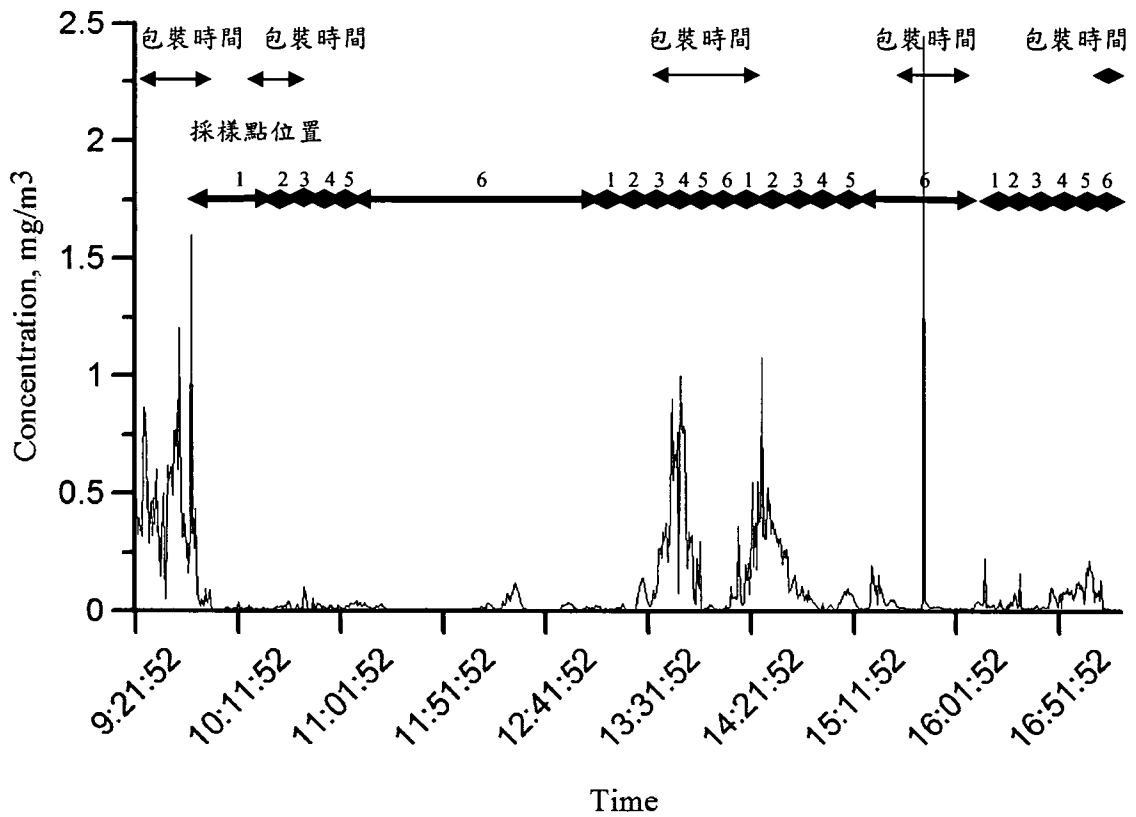


圖 138 Dust Trak 各點的測量時間與包裝作業時間, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

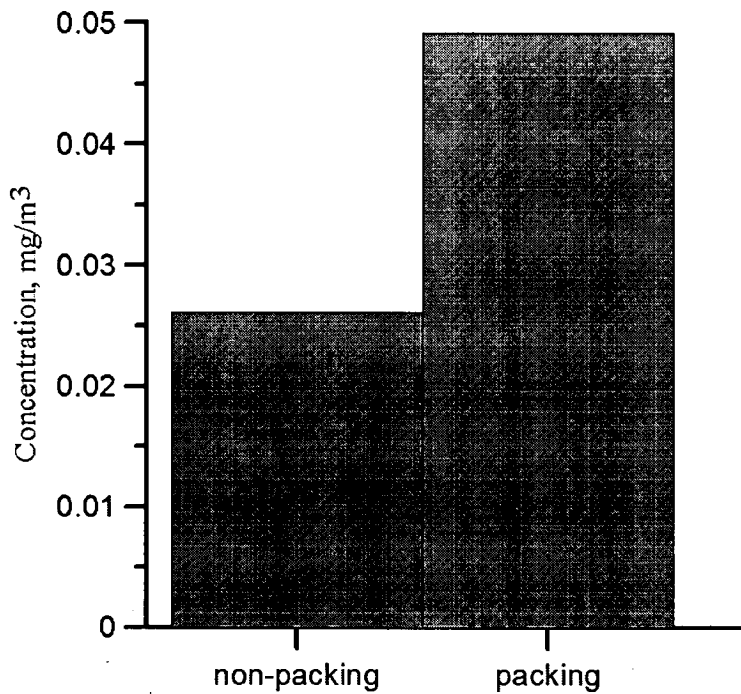


圖 139 量測點 6 粉體包裝與未包裝平均濃度比較, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

本研究在第一次採樣時，在量測點 3 比較 IOSH 旋風器、尼龍旋風器及 Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度差異。實驗結果顯示 IOSH 旋風器、尼龍旋風器、Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度分別為  $486.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $280.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $991.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $484.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究結果顯示，Dust Trak 所量測微粒重量濃度明顯大於 IOSH 旋風器、尼龍旋風器及 MOUDI 的測值，原因可能是自動儀器偵測原理不同所致(如表 36 所示)，而 MOUDI 與 IOSH 旋風器採樣的呼吸性微粒重量濃度值十分接近。本研究也比較鐵弗龍濾紙與酯化纖維素濾紙採集微粒金屬的差異，實驗結果顯示不同測量點，酯化纖維素濾紙的金屬平均濃度略高於鐵弗龍濾紙的金屬平均濃度(如表 37 所示)。本計畫採用酯化纖維素濾紙進行微粒金屬成分分析，並使用鐵弗龍濾紙進行秤重。另外將各階層的微粒重量濃度乘上呼吸性微粒比率(RF)即可得到呼吸性微粒的重量濃度，其公式如下所示，經計算後可得知第一次在量測點 3 的推估呼吸性微粒重量濃度為  $484.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第二次為  $695.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三次為  $214.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此推估濃度與 IOSH 旋風器在量測點 3 所採集的呼吸性微粒的重量濃度相近(第一次為  $486.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第二次為  $688.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三次為  $267.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。由 MOUDI 所採集的微粒重量濃度可換算出呼吸性微粒的重量濃度，其換算公式如下：

可吸入性微粒的比例(IF)

$$IF(da, U_0) = 0.5(1 + \exp(-0.06da)) + 10^{-5} U_0^{2.75} \exp(0.055da)$$

da : 氣動直徑,  $\mu\text{m}$

$U_0$  : 氣流速度,  $\text{m/s}$

可呼吸性微粒比率(RF)

$$RF = (IF)(1 - F(x))$$

其中

$$x = 2.466 \ln(da) - 3.568$$

$$F(x) = 0.5(1 - 0.1969x + 0.1152x^2 - 0.0003x^3 + 0.0195x^4)^{-4} \text{ for } x \leq 0$$

$$F(x) = 1 - 0.5(1 + 0.1969x + 0.1152x^2 + 0.0003x^3 + 0.0195x^4)^{-4} \text{ for } x > 0$$

表 36 量測點 3 不同採樣器比較表, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

分析項目		RPM (Teflon) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬總濃度 (Teflon) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬總濃度 (MCE) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 3						
採樣器	Nylon	280.49	35.82	22.06 (61.59%)	59.96	39.13 (65.26%)
	IOSH	486.72	90.70	89.97 (99.20%)	93.06	84.49 (90.80%)
	Dust Trak	991.5				
	MOUDI	484.48				

表 37 不同濾紙採集微粒金屬濃度, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

IOSH 旋風器				
分析項目		RPM(Teflon)	金屬總濃度(Teflon)	金屬總濃度(MCE)
量測點		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1		334.97	23.34	31.75
量測點 3		486.72	90.70	93.06
量測點 4		375.20	23.24	35.26
量測點 6		294.53	50.44	38.60
固定點平均		372.86	46.93	49.67
移動推車		367.15	26.50	45.71

在第二次採樣時，在量測點 3 比較 IOSH 旋風器、尼龍旋風器、Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度差異。實驗結果顯示 IOSH 旋風器、尼龍旋風器及 Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度分別為  $688.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $226.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $873.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  及  $695.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (如表 38 所示)，而 MOUDI 與 IOSH 旋風器採樣的可呼吸性微粒重量濃度值十分接近。

表 38 固定點 3 不同採樣器比較表, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

分析項目		RPM	金屬總濃度	Ti (比例, %)	金屬總濃度	Ti (比例, %)
量測點 3		(Teflon)	(Teflon)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	(MCE)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
採樣器	Nylon	226.34	1.92	1.32 (68.70%)	8.12	5.99 (73.72%)
	IOSH	688.03	10.08	6.03 (59.87%)	11.54	6.64 (57.56%)
	Dust Trak	873.16				
	MOUDI	695.1				

在第三次採樣時，在量測點 3 比較 IOSH 旋風器、尼龍旋風器及 Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度差異。實驗結果顯示 IOSH 旋風器、尼龍旋風器及 Dust Trak 及 MOUDI 所量測微粒重量濃度分別為  $267.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $149.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $282.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  及  $214.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (如表 39 所示)，在 MOUDI 與 IOSH 旋風器的量測值差異較之前二次採樣大。

表 39 固定點 3 不同採樣器比較表, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

分析項目		RPM (Teflon) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬總濃度 (Teflon) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬總濃度 (MCE) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 3						
採樣器	Nylon	149.25	2.42	2.42 (100%)	2.89	2.89 (100%)
	IOSH	267.88	3.78	3.78 (100%)	4.61	5.30 (86.91%)
	Dust Trak	282.1				
	MOUDI	214.09				

表 40 為 IOSH 旋風器在粉體包裝區所量測的時平均可呼吸性微粒的重量濃度，第一次採樣結果如下，量測點 1 可呼吸性微粒的重量濃度為  $334.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 3 為  $486.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 4 為  $375.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 6 為  $294.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為  $372.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，另外由採樣推車上量測的結果來代表在粉體包裝區可呼吸性微粒的平均重量濃度，其濃度為  $367.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此濃度與 4 個固定點量測的平均濃度  $372.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  十分接近。第二次採樣結果如下，量測點 1 可呼吸性微粒的重量濃度為  $195.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 3 為  $688.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 4 為  $587.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 6 為  $232.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均為  $425.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，由此可知第二次在粉體包裝區的重量濃度分布範圍較廣且平均濃度( $425.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )也較第一次採樣的結果高( $372.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )，由於第二次量測時的粉體包裝主要是採大包包裝的方式，所以造成更大量的粉體逸散，可呼吸性微粒的重量濃度也就相對地變高。第三次採樣結果如下，量測點 1 可呼吸性微粒的重量濃度為  $80.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 3 為  $267.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，採樣推車上量測的可呼吸性微粒的平均重量濃度為  $84.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。



表 40 IOSH 旋風器所量測的可呼吸性微粒重量濃度，二氧化鈦粉體廠

97/04/28	
量測點	分析項目 RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1	334.97
量測點 3	486.72
量測點 4	375.20
量測點 6	294.53
固定點平均	372.86
移動推車	367.15
97/06/05	
量測點	分析項目 RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1	195.1
量測點 3	688.0
量測點 4	587.0
量測點 6	232.8
固定點平均	425.7
97/08/07	
量測點	分析項目 RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1	80.27
量測點 3	267.88
量測點 4	223.5
量測點 6	80.04
固定點平均	133.81
移動推車	84.11

另外表 41 為 MOUDI 採集的微粒重量濃度。第一次採樣粉體包裝區的奈米微粒重量濃度為  $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第二次為  $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三次為  $15.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，濃度均遠低於 NIOSH 所建議的  $\text{TiO}_2$  超細微粒時量平均濃度值( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。由微粒數目濃度分布圖可以發現第一次與第二次所量測到的微粒數目濃度分布相似，而第三次所量測到的微粒數目濃度約是前二次量測濃度值的一半，這與風扇放置位置有關。另外比較第一次與第二次 MOUDI 微粒重量濃度可發現第二次 MOUDI 採樣的微粒重量濃度變高了，由此可知大包包裝會明顯增加粗微粒及可呼吸性微粒的

逸散，但對奈米微粒的逸散增加卻相對比較低。第三次 MOUDI 採集的粗微粒和可呼吸性微粒重量濃度發現濃度都比前兩次採樣時低，這是因為風扇擺放位置導致即時量測儀器所量測到的微粒數目已明顯偏低，所以採樣儀器所採集的微粒重量也就相對地偏低。

表 41 MOUDI 採集的微粒重量濃度，二氧化鈦粉體廠

分析項目 量測點 3	RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	粗微粒重量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒 重量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
97/04/28	484.48	383.1	8.9
97/06/05	695.1	865.4	9.5
97/08/07	214.09	200	15.8

### 參 作業環境奈米微粒金屬成分特徵

本研究利用 ICP/OES 分析微粒中的金屬濃度，使用消化液 25 ml 及假設採樣時間 8 小時下，IOSH 旋風器及 MOUDI 的 Ti 元素偵測極限分別為  $0.312 \mu\text{g}/\text{m}^3$  及  $0.0177 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由酯化纖維素濾紙回收率測定可知 Ti 元素回收率介於 96%~106% 之間(如表 42 所示)。鐵弗龍濾紙回收率測定可知 Ti 元素回收率介於 81%~99% 之間(如表 43 所示)。

表 42 酯化纖維素濾紙 Ti 回收率

MCE	介質空白 ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )	濃度一			濃度二			濃度三		
		添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)	添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)	添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)
1	0.0211	30	31.8978	106.3260	60	57.8807	96.4678	120	117.7863	98.1553
2	0.0213	30	31.8320	106.1066	60	58.4016	97.3360	120	115.4306	96.1922
3	0.0213	30	31.7083	105.6944	60	57.2335	95.3892	120	115.8923	96.5769
4		30	31.4791	104.9303	60	57.4625	95.7708	120	115.5114	96.2595
5		30	31.6891	105.6302	60	57.2736	95.4560	120	117.7510	98.1258
6		30	30.4765	101.5884	60	58.3841	97.3068	120	116.5849	97.1541
平均值	0.0212		31.5138	105.0460		57.7727	96.2878		116.4928	97.0773
標準偏差	0.0001		0.4821			0.4860			0.9761	
變異係數(%)	0.4475%		1.5297%			0.8412%			0.8379%	

三個濃度之平均回收率 = 99.4704 %  
 分析變異係數(CVa)% = 1.12

表 43 鐵氟龍濾紙 Ti 回收率

PTFE	介質空白 ( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )	濃度一			濃度二			濃度三		
		添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)	添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)	添加量 ( $\mu\text{g}$ )	分析量 ( $\mu\text{g}$ )	回收率 (%)
1	0.0202	30	29.5001	98.3338	60	54.4258	90.7097	120	98.2148	81.8457
2	0.0203	30	28.9101	96.3671	60	55.2280	92.0466	120	99.0988	82.5823
3	0.0203	30	29.2370	97.4567	60	55.0464	91.7441	120	97.1168	80.9307
4		30	29.9492	99.8308	60	56.1137	93.5229	120	97.5053	81.2544
5		30	29.0258	96.7526	60	55.5580	92.5967	120	97.9478	81.6232
6		30	28.9304	96.4346	60	55.6299	92.7165	120	99.2690	82.7242
平均值	0.0203		29.2588	97.5292		55.3336	92.2227		98.1921	81.8267
標準偏差	0.0001		0.3695			0.5267			0.7821	
變異係數(%)	0.3852%		1.2628%			0.9519%			0.7965%	

三個濃度之平均回收率 = 90.5262 %  
 分析變異係數(CVa)% = 1.02

圖 140~圖 142 為利用 ICP/OES 分析 IOSH 旋風器的酯化纖維素濾紙所量測的可呼吸性微粒中的金屬濃度，第一次量測結果如圖 140 所示，由表 44 可知在量測點 1 的 Ti 濃度為  $25.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，換算成  $\text{TiO}_2$  濃度為  $42.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，量測點 3 的 Ti 濃度為  $84.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $140.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 4 的 Ti 濃度為  $4.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $7.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 6 的 Ti 濃度為  $30.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $51.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而移動點的 Ti 濃度為  $38.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $65.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 44 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

IOSH 旋風器					
量測點	分析項目	RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬元素 總濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1		334.97	31.75	25.37 (73.0%)	42.33
量測點 3		486.72	93.06	84.49 (90.8%)	140.97
量測點 4		375.20	35.26	28.56 (81.0%)	47.64
量測點 6		294.53	38.60	30.72 (79.6%)	51.26
固定點平均		372.86	49.67	36.34 (73.2%)	60.63
移動推車		367.15	45.71	38.98 (85.3%)	65.04

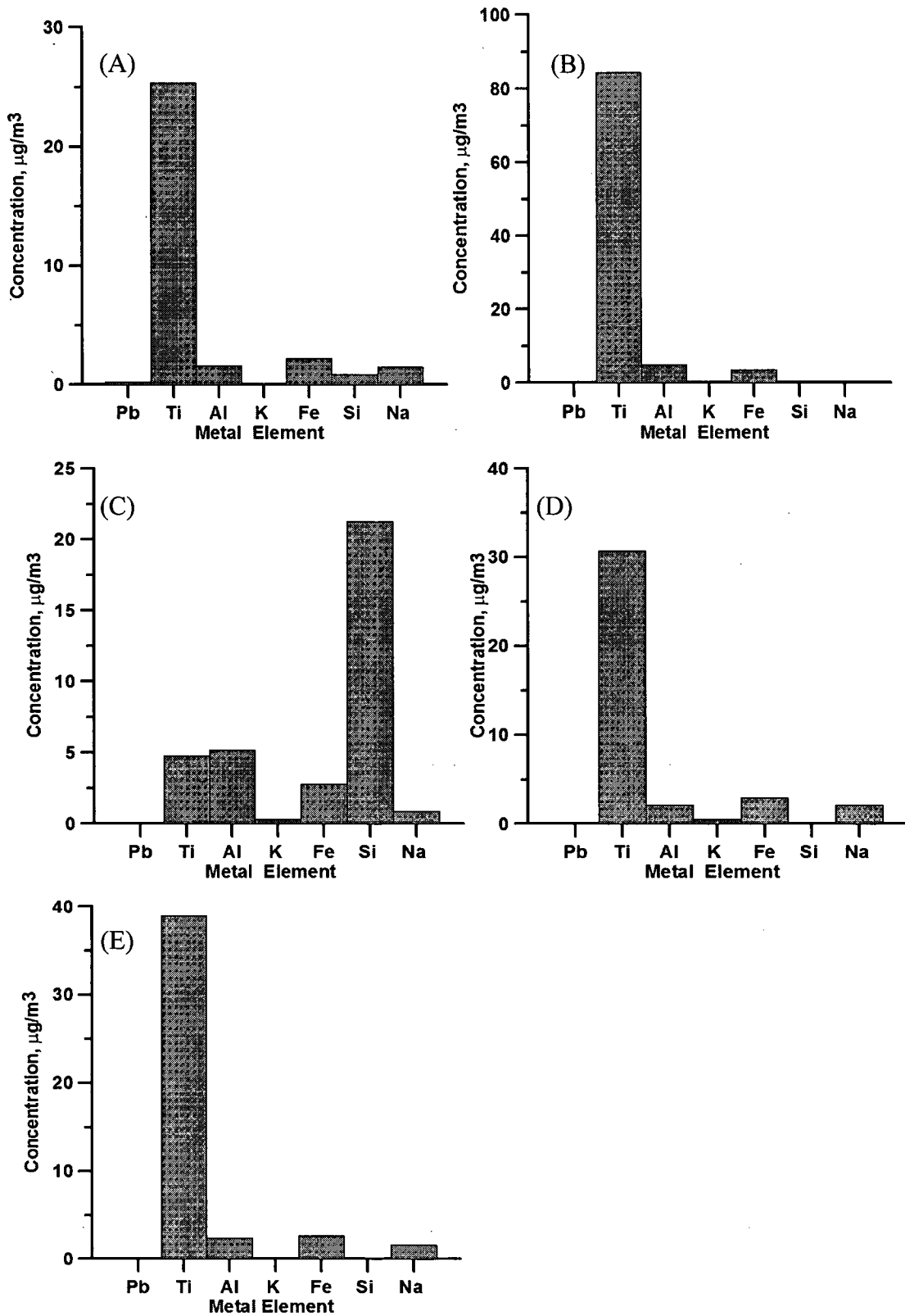


圖 140 金屬成分分析, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

(A)量測點 1(B)量測點 3(C)量測點 4 (D)量測點 6(E)移動推車

第二次量測結果如圖 141 所示，由表 45 可知在量測點 1 的 Ti 濃度為 4.34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，換算成  $\text{TiO}_2$  濃度為 7.24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，量測點 3 的 Ti 濃度為 6.64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 11.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 4 的 Ti 濃度為 8.90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 14.85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 6 的 Ti 濃度為 4.79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 7.99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而移動點的 Ti 濃度為 6.17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 10.29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此次分析到的金屬濃度較第一次採樣時偏低很多，主要原因為當天對流效應較旺盛或是與風扇吹的方向有關。

表 45 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

IOSH 旋風器				
分析項目 量測點	RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	金屬元素 總濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ti (比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1	195.1	6.90	4.34 (62.9%)	7.24
量測點 3	688.0	11.54	6.64 (57.5%)	11.08
量測點 4	587.0	15.11	8.90 (58.9%)	14.85
量測點 6	232.8	18.86	4.79 (25.4%)	7.99
固定點平均	425.7	13.10	6.17 (47.1%)	10.29

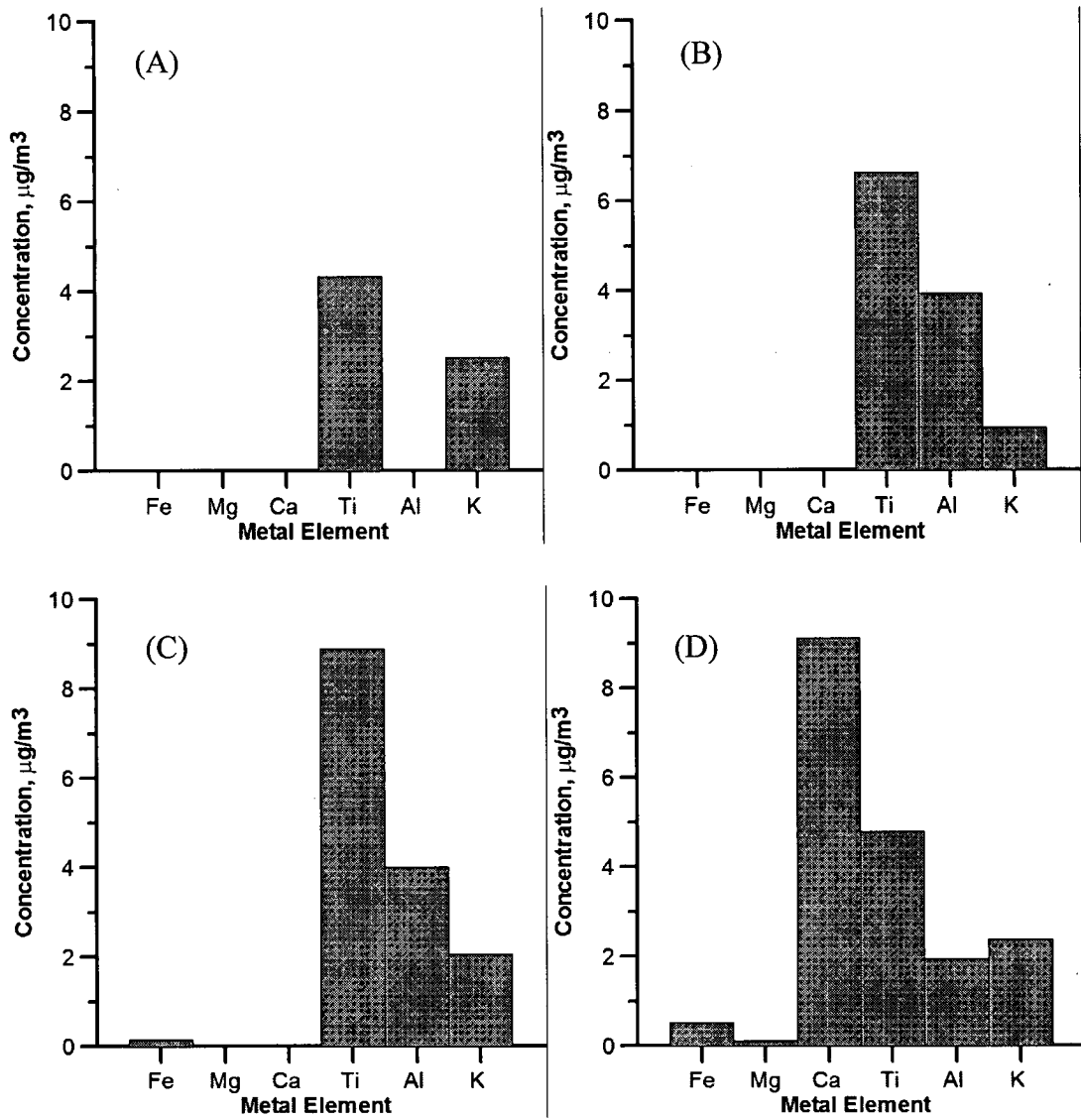


圖141 可呼吸微粒中的金屬成分分析, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

(A)量測點1 (B)量測點3 (C)量測點4 (D)量測點6

第三次量測結果如圖 142 所示，由表 46 可知在量測點 1 的 Ti 濃度為 1.30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，換算成  $\text{TiO}_2$  濃度為 2.17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，量測點 3 的 Ti 濃度為 4.61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 7.69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 4 的 Ti 濃度為 3.63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 6.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；量測點 6 的 Ti 濃度為 0.89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 1.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而移動點的 Ti 濃度為 1.45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為 2.42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由上述的分析結果可發現第一次量測時除了在量測點 4 的 Ti 元素在金屬中所佔的比重偏低外，其餘量測點的金屬濃度中都是以 Ti 元素為主，第二、三次量測所分析可呼吸微粒中的金屬濃度都較第一次低，第三次量測時由於風扇擺放位置造成粉體包裝區微粒的逸散量較低，所以分析可呼吸微粒中的金屬濃度也相對地較低。此外，第一次固定量測點的平均  $\text{TiO}_2$  濃度為 60.63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第二次固定量測點的平均  $\text{TiO}_2$  濃度為 10.29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第三次固定量測點的平均  $\text{TiO}_2$  濃度為 4.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，由以上三次量測所測得的  $\text{TiO}_2$  濃度可以發現均遠低於 NIOSH 所建議的  $\text{TiO}_2$  細微粒時量平均濃度值(1500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

表 46 IOSH 旋風器的採樣數據, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

IOSH 旋風器				
分析項目	RPM	金屬元素	Ti (比例, %)	$\text{TiO}_2$
量測點	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	總濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 1	80.27	5.58	1.30 (23.3%)	2.17
量測點 3	267.88	5.30	4.61 (87.0%)	7.69
量測點 4	223.5	8.61	3.63 (42.2%)	6.05
量測點 6	80.04	6.18	0.89 (14.4%)	1.48
固定點平均	133.81	6.42	2.61 (40.7%)	4.35
移動推車	84.11	5.60	1.45 (25.9%)	2.42



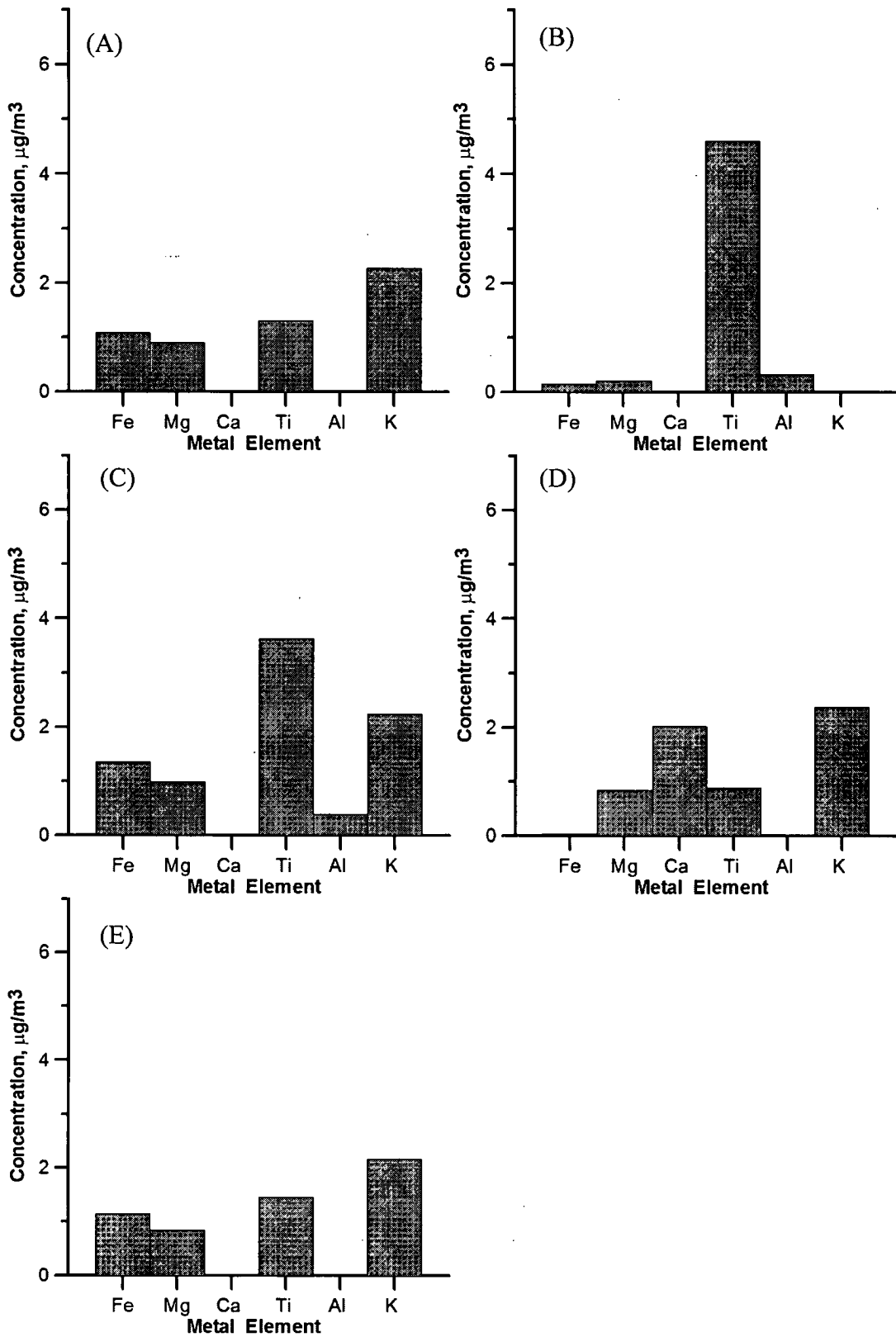


圖 142 可呼吸性微粒的金屬成分分析, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠  
 (A)量測點 1 (B)量測點 3 (C)量測點 4 (D)量測點 6 (E)移動推車

圖 143 和圖 144 為利用 ICP/OES 分析 MOUDI 的酯化纖維素濾紙所量測的奈米微粒重金屬濃度，由表 47 可知第一次量測的分析結果為 Ti 濃度為  $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，表 48 可知第二次量測的分析結果顯示微粒中的 Ti 濃度低於儀器偵測下限，表 49 可知第三次量測的分析結果為 Ti 濃度為  $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  或  $\text{TiO}_2$  濃度為  $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，另外由圖 143 和圖 144 可知分析 MOUDI 酯化纖維素濾紙的結果金屬濃度中都不是以 Ti 元素為主，因此可知由 MOUDI 採集到的超細微粒中只有極少量 Ti 元素的存在，進而可推斷由工廠產生的二氧化鈦微粒不屬於奈米微粒。

表 47 MOUDI 的採樣數據, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

MOUDI						
分析項目 量測點	RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	粗微粒重 量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒 重量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒中 金屬元素 總濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒中 Ti(比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒 中 $\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 3	484.48	383.1	8.9	0.83	0.03(0.34%)	0.05

表 48 MOUDI 的採樣數據, 97/06/05, 二氧化鈦粉體廠

MOUDI						
分析項目 量測點	RPM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	粗微粒重 量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒 重量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒中 金屬元素 總濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒中 Ti(比例, %) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒 中 $\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
量測點 3	695.1	865.4	9.5	N.D	N.D	N.D

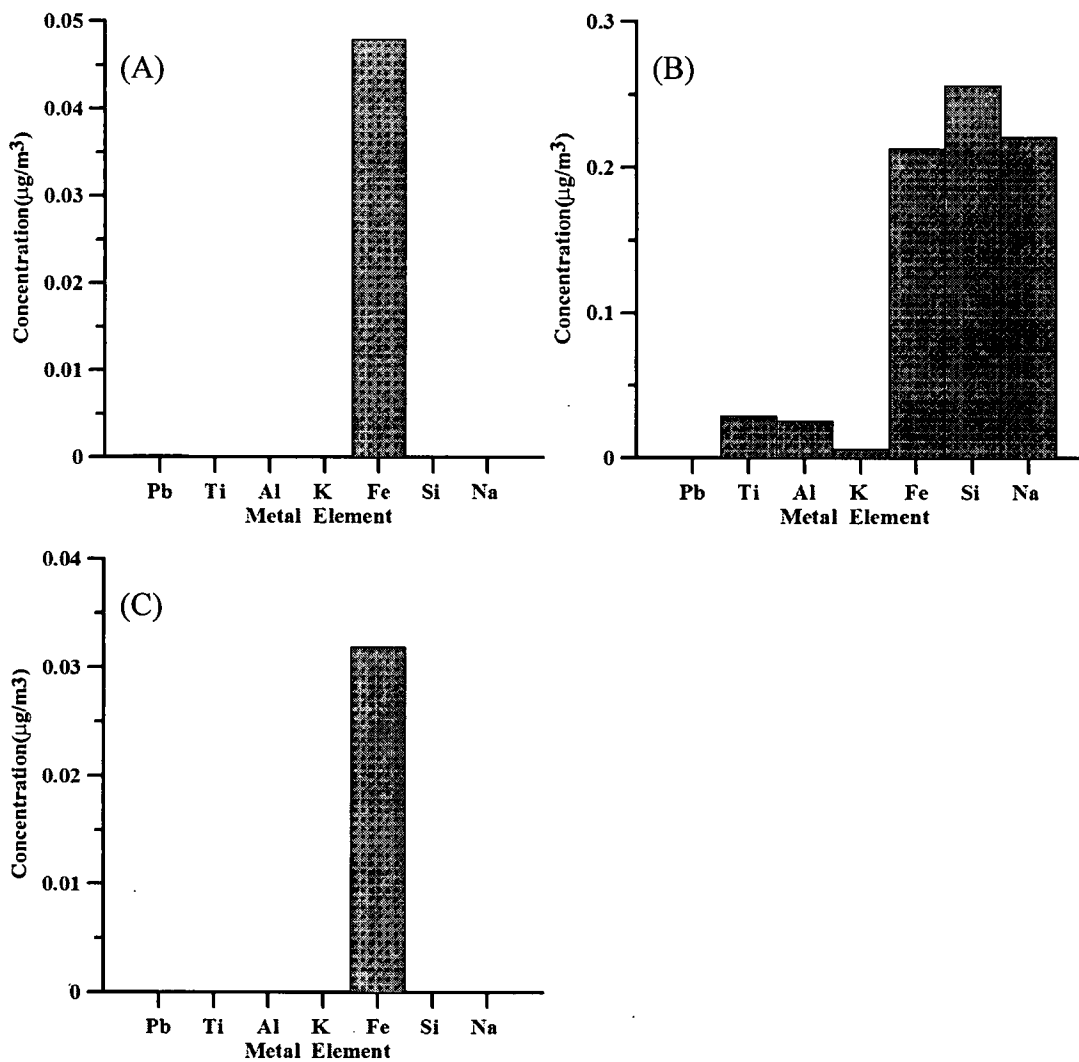


圖 143 MOUDI 所採集的金屬濃度, 97/04/28, 二氧化鈦粉體廠

(A)微粒粒徑：180~100 nm (B)微粒粒徑：100~56 nm (C)微粒粒徑：小於 56 nm

表 49 MOUDI 的採樣數據, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

MOUDI							
量測點	分析項目	RPM	粗微粒重	奈米微粒	奈米微粒中	奈米微粒中	奈米微粒
		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	量濃度	重量濃度	金屬元素	Ti(比例, %)	中 $\text{TiO}_2$
			( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	總濃度	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
					( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
量測點 3		214.09	200	15.8	0.42	0.06(0.38%)	0.1

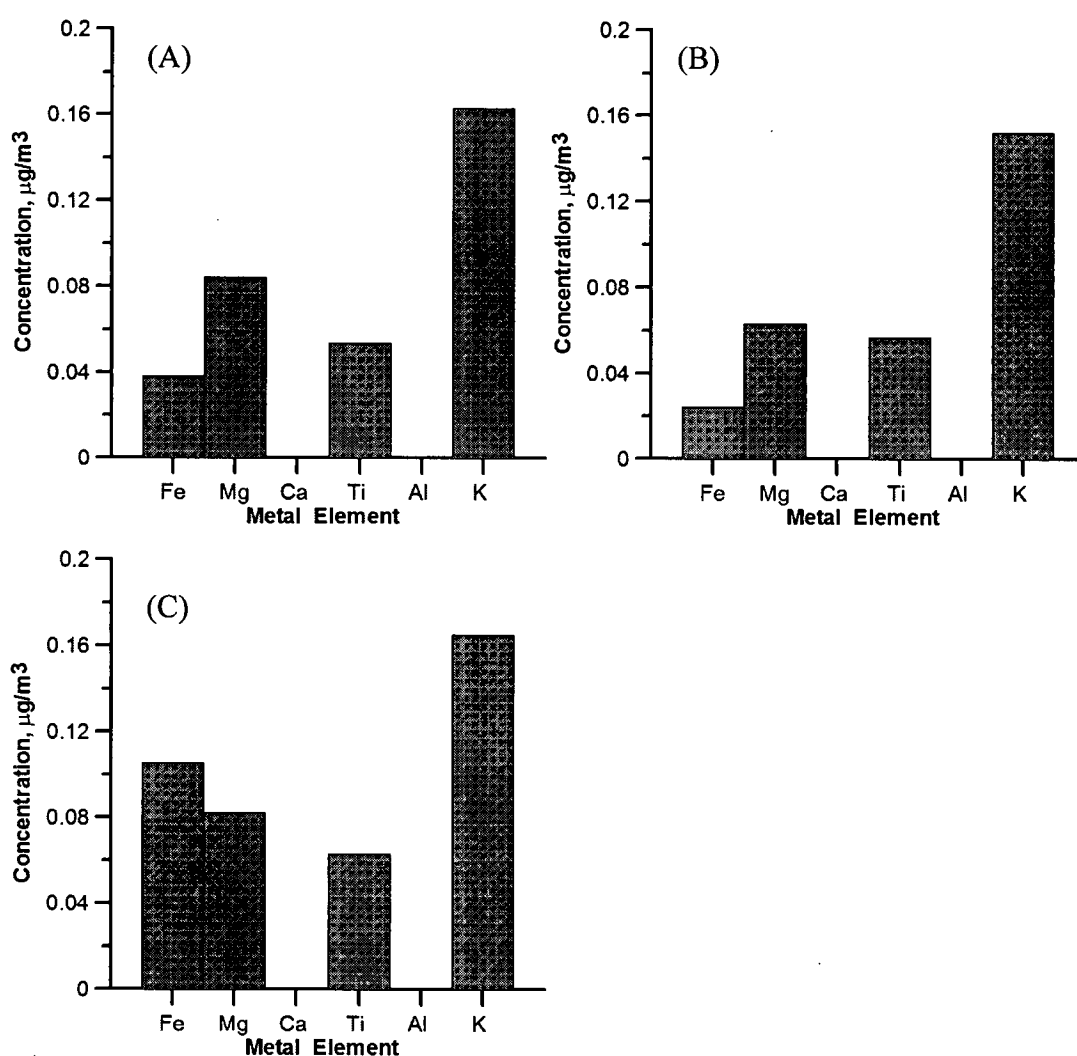


圖 144 MOUDI 所採集的金屬濃度, 97/08/07, 二氧化鈦粉體廠

(A)微粒粒徑：180~100 nm (B)微粒粒徑：100~56 nm (C)微粒粒徑：小於 56 nm

### 第三節 衛浴設備製造廠及奈米碳管製造廠的奈米微粒暴露測量

#### 壹 衛浴設備製造廠的奈米微粒暴露測量

在衛浴設備製造廠的微粒濃度量測結果如下，圖 145 為 FMPS 在軌道燒成窯旁的走道的量測位置及數目濃度分布圖，其量測位置分別在離窯入口 5 m、15 m、30 m、50 m、55 m、70 m 及出口，軌道燒成窯旁的微粒數目濃度如表 50 所示，離進口 5 m 的微粒濃度為  $166000 \text{ \#/cm}^3$ ，離進口 15 m 的微粒濃度為  $347000 \text{ \#/cm}^3$ ，離進口 30 m 的微粒濃度為  $825000 \text{ \#/cm}^3$ ，離進口 50 m 的微粒濃度為  $1230000 \text{ \#/cm}^3$ ，離進口 55 m 的微粒濃度為  $257000 \text{ \#/cm}^3$ ，離進口 70 m 的微粒濃度為  $54600 \text{ \#/cm}^3$ ，出口的微粒濃度為  $34800 \text{ \#/cm}^3$ ，故微粒數目濃度在高溫燒成帶旁最高。由即時儀器量測的結果可知在越靠近高溫帶所偵測到的奈米微粒數目濃度就越高，造成此現象可能與高溫作業有關，殘留在衛浴設備表面上的釉料或化學溶液因高溫蒸發後核凝產生奈米微粒。

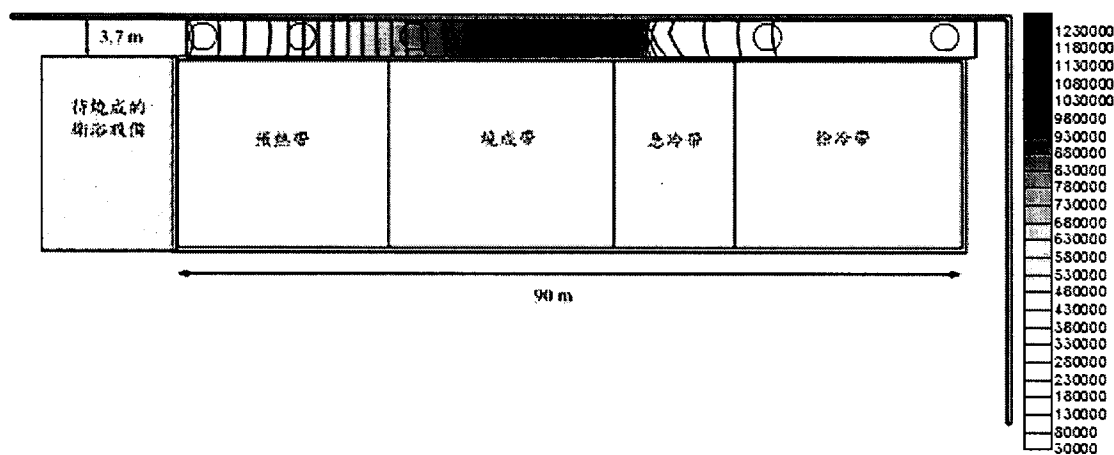


圖 145 FMPS 在軌道燒成窯旁的量測位置與微粒數目濃度分布圖，  
97/10/22，衛浴設備製造廠

表 50 軌道燒成窯旁的微粒數目濃度, 97/10/22, 衛浴設備製造廠

量測位置	微粒數目濃度(#/cm <sup>3</sup> )
離窯進口 5 m	166000
離窯進口 15 m	347000
離窯進口 30 m	825000
離窯進口 50 m	1230000
離窯進口 55 m	257000
離窯進口 70 m	54600
出口	34800

表 51 為 IOSH 旋風器在軌道燒成窯旁所採集的可呼吸性微粒重量濃度，旋風器擺放的位置為在窯進口、出口及離窯 40 m 處，結果顯示窯進口處的可呼吸性微粒重量濃度為 179.17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，離窯 40 m 處為 83.75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，出口處為 242.08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，由此可知在軌道窯進出口所採集到可呼吸微粒的重量濃度較高，主要原因為在進出口兩端都有員工在進行作業，如在衛浴設備在送進軌道窯燒成前作業人員都會先利用噴槍將衛浴設備表面的微粒清除，故在進口端所採集到的可呼吸性微粒濃度較離窯 40 m 處高，而在燒成窯末端附近為衛浴設備組裝、包裝區，所以在窯出口處所採集到的可呼吸性微粒為在成品組裝、包裝時所產生的微粒。如表 52 所示，MOUDI 採集到總微粒重量濃度為 134.70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，可呼吸性微粒重量濃度為 94.46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，奈米微粒重量濃度為 17.93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表 51 IOSH 旋風器採集的可呼吸性微粒重量濃度, 97/10/22,  
衛浴設備製造廠

採樣位置	可呼吸性微粒重量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	總金屬濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	主要金屬成分
窯進口	179.17	61.28	K(39%) Al(24%) Mg(16%)
離窯進口 40 m	83.75	29.20	K(41%) Al(22%) Mg(25%)
窯出口	242.08	4.86	Mg(66%) Mn(11%)

表 52 MOUDI 採集的微粒重量濃度, 97/10/22, 衛浴設備製造廠

採樣位置	總微粒重量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	可呼吸性微粒重量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	奈米微粒重量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
離窯進口 40 m	134.70	94.46	17.93

圖 146 為軌道燒成窯旁各量測位置的金屬成分分析，其分析結果如下微粒中所含的金屬成分都很低，在窯進口及離窯進口 40 m 處其總金屬在微粒中所占的比例約為 34.20%，而在窯出口處為 2.01%，而分析到的金屬中大部分都是地殼元素，如鉀、鋁、鎂、錳、鈉等。在出口端所分析的金屬濃度都較低，這是因為衛浴設備經 1200°C 高溫燒成時因超過部分金屬沸點及處理排氣管線抽走，故在出口所採集到的金屬濃度都偏低。

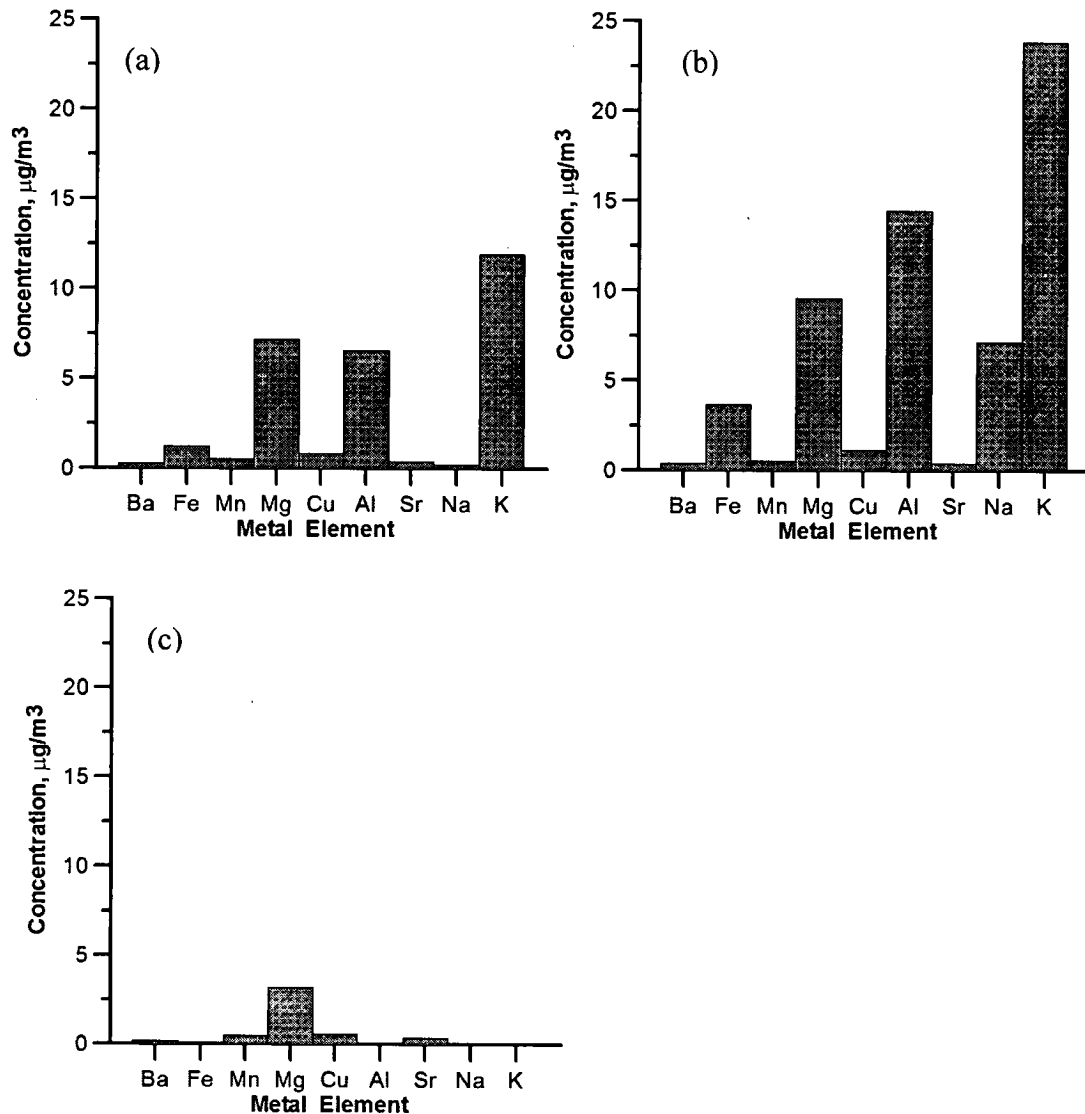


圖 146 軌道燒成窯旁各量測位置的金属成分分析, 97/10/22, 衛浴設備製造廠  
(a)窯進口 (b)離窯進口 40 m 處 (c)窯出口

## 貳 奈米碳管製造廠的奈米微粒暴露測量

在奈米碳管製造廠的微粒濃度量測結果如下，表 53 為生產奈米碳管流程中的微粒數目濃度，通風櫃內的微粒數目濃度背景值為  $6580 \text{ \#/cm}^3$ ，觸媒倒在石英管上時會產生些許的微粒逸散，其微粒數目濃度為  $9320 \text{ \#/cm}^3$ ，而奈米碳管分裝時微粒的數目濃度大約都在  $7000 \text{ \#/cm}^3$ ，由此可知奈米碳管分裝時的微粒濃度與通風櫃內的背景濃度很接近，所以分裝奈米碳管時產生的微粒逸散很少。在微粒粒徑分布方面，由圖 147 可知粒徑在 7 nm 和 120 nm 處有峰值出現，逸散的微粒粒徑絕大多數都是大於 100 nm。將包裝時逸散微粒的粒徑分布與大氣微粒比較可知，一般大氣微粒粒徑的眾數約在 30~40 nm 之間，而包裝奈米碳管時逸散微粒的粒徑眾數為 120 nm，另外一般大氣的微粒數目濃度大約為 20000~30000  $\text{\#/cm}^3$ ，所以在作業流程中所監測到的微粒數目濃度很低，這是因為包裝時產生的微粒逸散量很低再加上又在通風櫃裡操作所造成。表 54 顯示通風櫃背景、純化奈米碳管分裝及未純化奈米碳管分裝的微粒中間數目粒徑分別為 108.72 nm、117.99 nm 及 116.15 nm，而幾何標準差分別為 1.75、1.71、1.74。

表 53 製造奈米碳管流程中的微粒數目濃度, 97/09/16, 奈米碳管製造廠

作業流程	微粒數目濃度 ( $\text{\#/cm}^3$ )
觸媒倒在石英管上	9320
清潔通風櫃	8070
未純化奈米碳管分裝	6860
純化奈米碳管分裝	7330
通風櫃內背景值	6580
通風櫃外背景值	8550



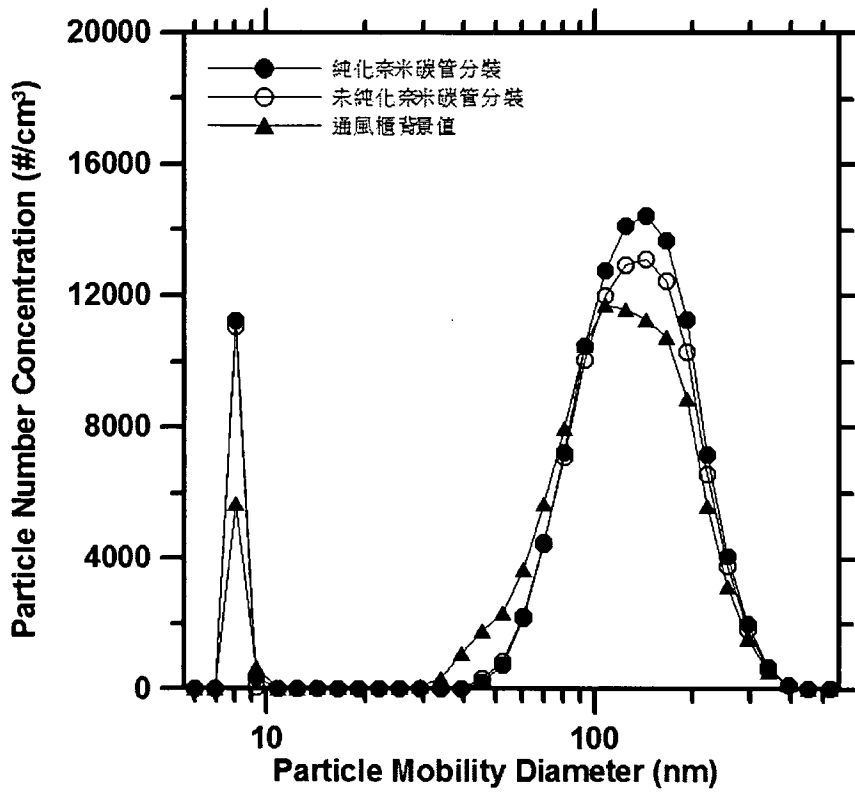


圖 147 FMPS 量測奈米碳管分裝時微粒的粒徑分布, 97/09/16, 奈米碳管製造廠

表54 通風櫃背景及奈米碳管分裝時微粒的中間數目粒徑及幾何標準差, 97/09/16, 奈米碳管製造廠

	FMPS	
	NMD (nm)	GMD
通風櫃背景	108.72	1.75
純化奈米碳管分裝	117.99	1.71
未純化奈米碳管分裝	116.15	1.74

## 第四節 奈米微粒過濾控制性能評估

### 壹 吸塵器馬達微粒排放監測與分析

雖然真空吸塵器是設計用來去除作業環境表面的粉塵微粒，但是吸塵器本身也會自行產生微粒，主要是因為馬達旋轉部分的磨損。以 DMPS/C 系統 (Differential Mobility Particle Sizer, TSI 3932) 掃描在不同的吸塵器馬達運轉速度下，所產生的微粒濃度分布。結果如圖 148 所示，為 Nilfisk GM80 工業級 HEPA 高效率真空吸塵器流量約 2000 LPM、1500 LPM、1000 LPM、500 LPM 時(實驗系統以 Nilfisk GM80 為真空馬達，此四流量為 HEPA 效率測試所設定之流量)所產生的微粒濃度，由圖中可以發現當馬達轉速不同時，所產生的微粒濃度亦有所不同，大部分屬 100 nm 以下之奈米微粒。

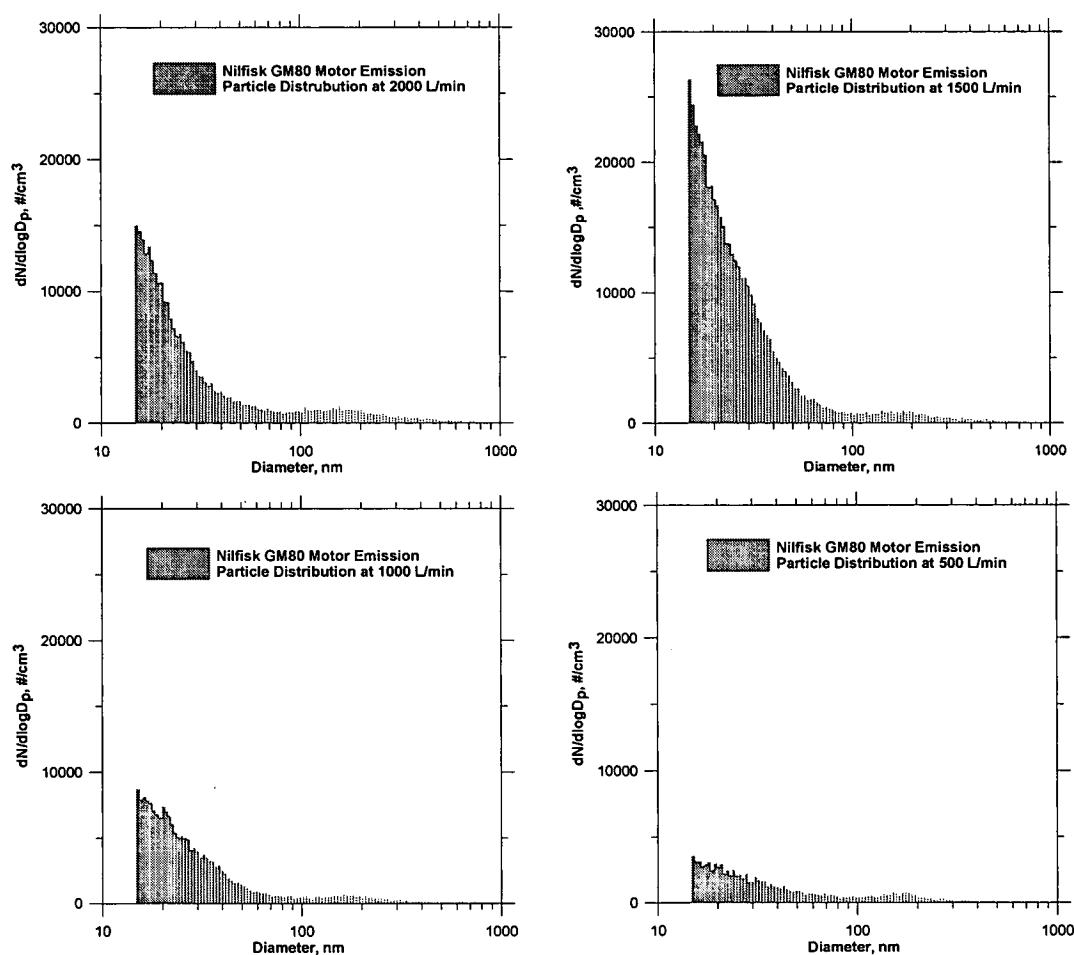


圖 148 Nilfisk GM80 吸塵器馬達在不同流量設定時排放之微粒濃度分布圖

而圖 149 為國內廠牌 TOSHIBA TVC-10.0 工業用真空吸塵器在其兩段式風速下，馬達所產生之微粒排放量。其排放量較 Nilfisk GM80 少，排放的微粒數目濃度分部亦多屬 100nm 以下之奈米微粒。

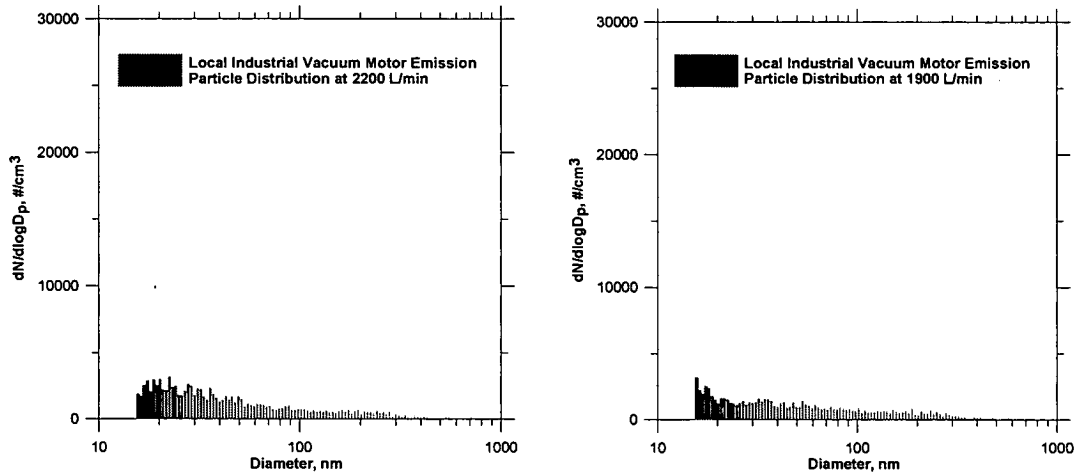


圖 149 為 TOSHIBA TVC-10.0 之馬達微粒排放量

以上吸塵器馬達產生微粒數目濃度分布為被大量空氣稀釋過的，若乘上其稀釋倍數，則排放量則每分鐘約  $7.2 \times 10^8$  至  $1.1 \times 10^{10}$  顆，如表 55 所示。

表 55 吸塵器在不同馬達轉速下，馬達本身所排放之數目濃度

吸塵器	流量 L/min	馬達排放微粒濃度 #/cm <sup>3</sup>	實際排放量 #/min
Nilfisk GM80	2000	4270	8.5E+09
	1500	7403	1.1E+10
	1000	2969	3.0E+09
	500	1436	7.2E+08
TOSHIBA TVC-10.0	2200	1616	3.6E+09
	1900	1332	2.5E+09

\*將吸塵器開啓、並且不導入微粒，量測吸塵氣未裝備有任何濾材時的吸塵器進口出口微粒濃度差，以算得馬達本身的微粒排放濃度  $C_{motor}$  如下： $C_{motor} = C_2 - C_1$

Lioy et al. (1999) 發現馬達排放的微粒是因碳刷的磨損與轉向器而產生碳、化學離子、金屬混和物。對於馬達本身會排放微粒的問題，國外的工業用真空吸

塵器已有妥善的解決方式，微粒由吸塵器進口會分別經過集塵袋、集塵濾布，緊接在濾布後面的是馬達，而馬達後方可加裝 HEPA filter 以去除馬達自行產生之微粒。然而，市售的國產工業用真空吸塵器並未在馬達後方加裝 HEPA filter，僅於馬達前方裝設標榜可過濾 0.3 $\mu\text{m}$  以上微粒之空氣濾清器，其主要的功用是爲了過濾進口集塵濾布未過濾乾淨的超細微粒，以避免微粒進入吸塵器而造成吸塵器馬達的損耗，並非作爲過濾馬達產生微粒之功效。

因此爲分析本實驗所使用之 Nilfisk GM80 工業用 HEPA 高效率真空吸塵器馬達微粒排放成分，實驗使用石英濾紙、鐵氟龍濾紙以濾紙夾採樣器在馬達排出口採樣。採樣時間六小時、採樣流速 10 L/min，微粒 loading 面積爲 9.621  $\text{cm}^2$ ，以分析馬達排放微粒的總質量濃度、碳成分、離子成分與金屬成分。分析結果如表 56 所示。

表 56 Nilfisk GM80 吸塵器馬達排放微粒之化學分析結果

分析類別	總質量濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	碳成分分析 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		離子成分分析 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		金屬成分分析 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
分析項目	58.94	OC	20.74	F <sup>-</sup>	ND	Na	13.7427
		EC	3.61	Cl <sup>-</sup>	0.0473	Mg	3.3413
		TC	24.35	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.124	Al	2.4668
				NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.0821	K	2.3644
				SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.068	Ca	10.3216
				Na <sup>+</sup>	0.3057	V	0.0146
				NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.2071	Cr	0.1077
				K <sup>+</sup>	0.0202	Mn	0.0864
				Mg <sup>2+</sup>	0.0019	Fe	1.4487
				Ca <sup>2+</sup>	0.0797	Ni	0.0545
				Total	0.9271	Cu	0.1143
						Zn	0.3376
						Sr	0.0851
						Ag	0.0359
						Cd	0.0027
						Sb	0.0027
						Ba	0.2578
					Pb	0.0239	
					Total	34.8087	

#### 4.4.2 國內外 HEPA Filter 對不同流量的壓差變化

濾材的兩個最主要的特性為壓損與顆粒收集效率。這兩個參數與濾材的結構(填充密度、纖維孔徑與厚度)、操作條件(過濾流速、溫度)以及過濾氣膠的特性(密度、顆粒粒徑與分布)有關；一般而言，適當的過濾系統設計需要考慮到這兩個因子。圖 150 為本實驗中，國內外吸塵器用空氣濾罐在不同流量時對應之壓差關係，結果可以發現，當過濾的流量越高時，HEPA filter 的前後壓差越大，而國外的 HEPA filter 壓差較國內的空氣濾清器壓差高，推估是濾材的纖維密度稀疏不同的原因。

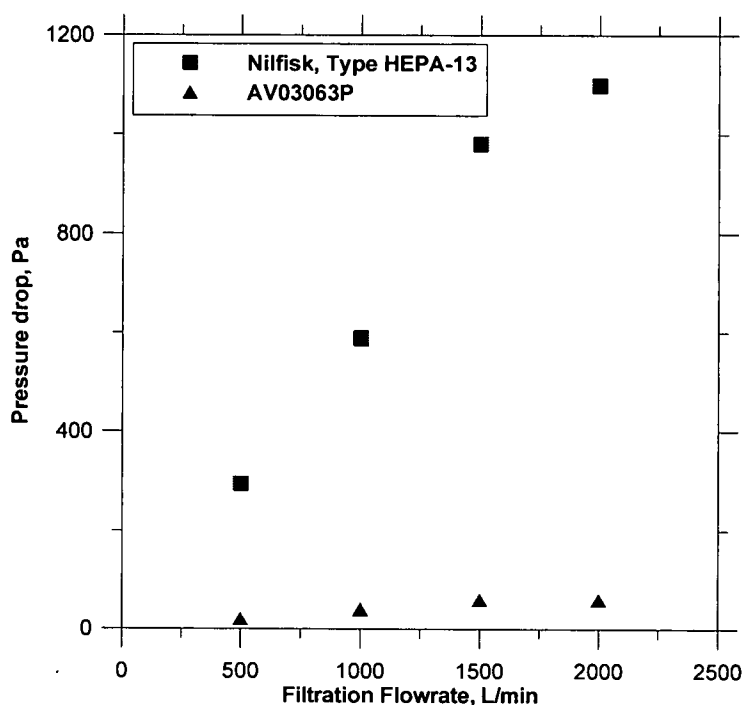


圖 150 國內外 HEPA filter 流量對壓差之關係

#### 參 乾淨濾材過濾效率

本研究針對國外 Nilfisk, Type HEPA-13 的 HEPA filter 與亞拓電器公司，V03063P 空氣濾清器測試其對奈米微粒的過濾效率，以 DMPS/C, TSI Model 3932 系統量測上下游濃度差以計算效率。

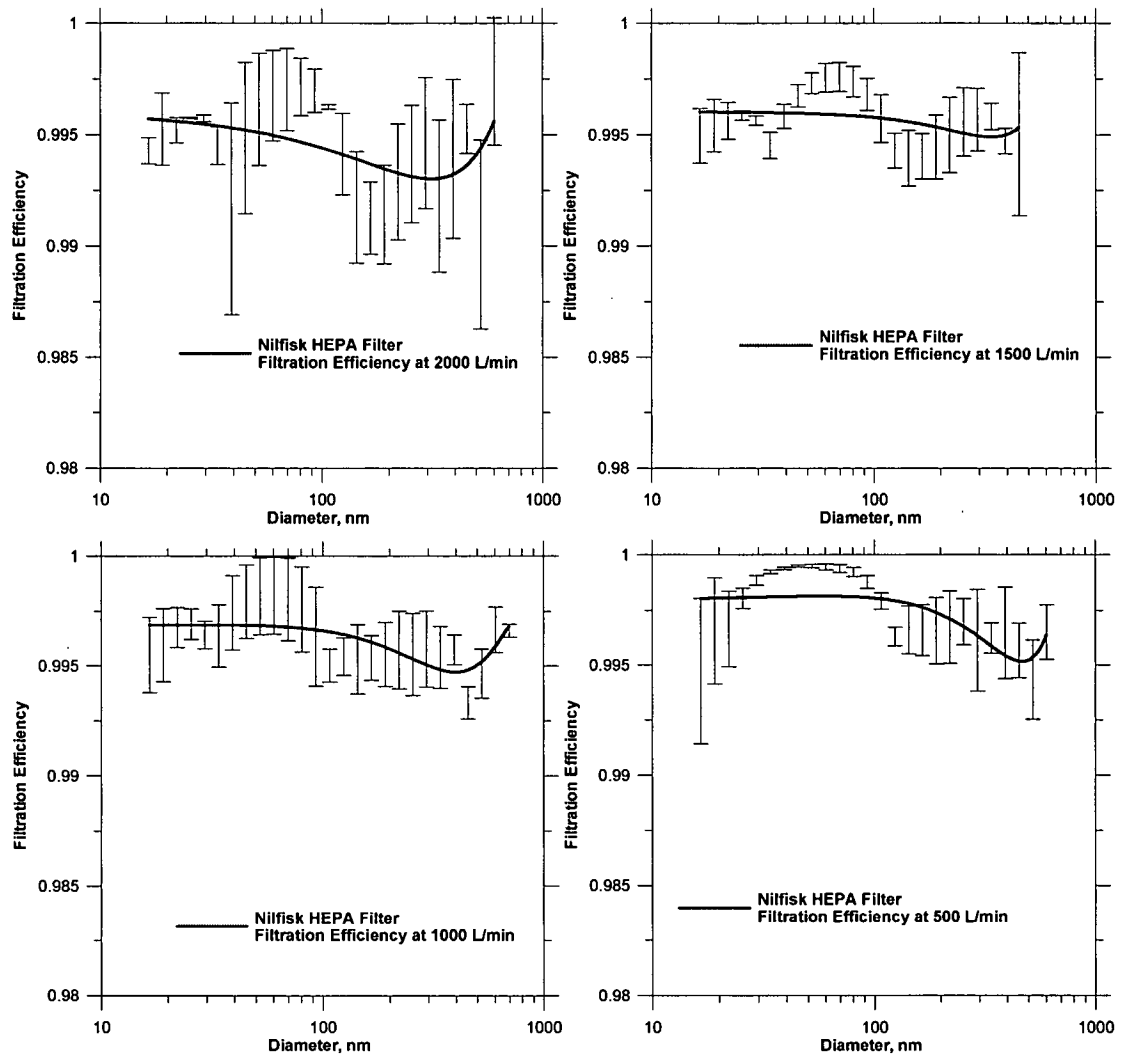


圖 151 Nilfisk, Type HEPA-13 在四種不同流速下對奈米微粒的過濾效率

以  $NMD = 30$ 、 $60$ 、 $100$  nm 的多徑食鹽奈米微粒作為導入 Nilfisk, Type HEPA-13 之效率測試微粒。如圖 151 所示，Nilfisk, Type HEPA-13 對奈米微粒的過濾效率非常好，不論顆粒的大小，其去除效率皆在 99% 以上。而亞拓電器公司的 V03063P HEPA filter 以  $NMD = 60$  nm 的多徑食鹽奈米微粒作為導入之效率測試微粒。由圖 152 可以發現其對奈米微粒的去除效率不盡理想，約在 20% ~ 60% 之間。當顆粒越大時，其去除效率越差，與其標榜可去除空氣濾材穿透的最大穿透顆粒粒徑 300 nm 以上之微粒不符，當流量小時才有去除效率上升的趨勢。

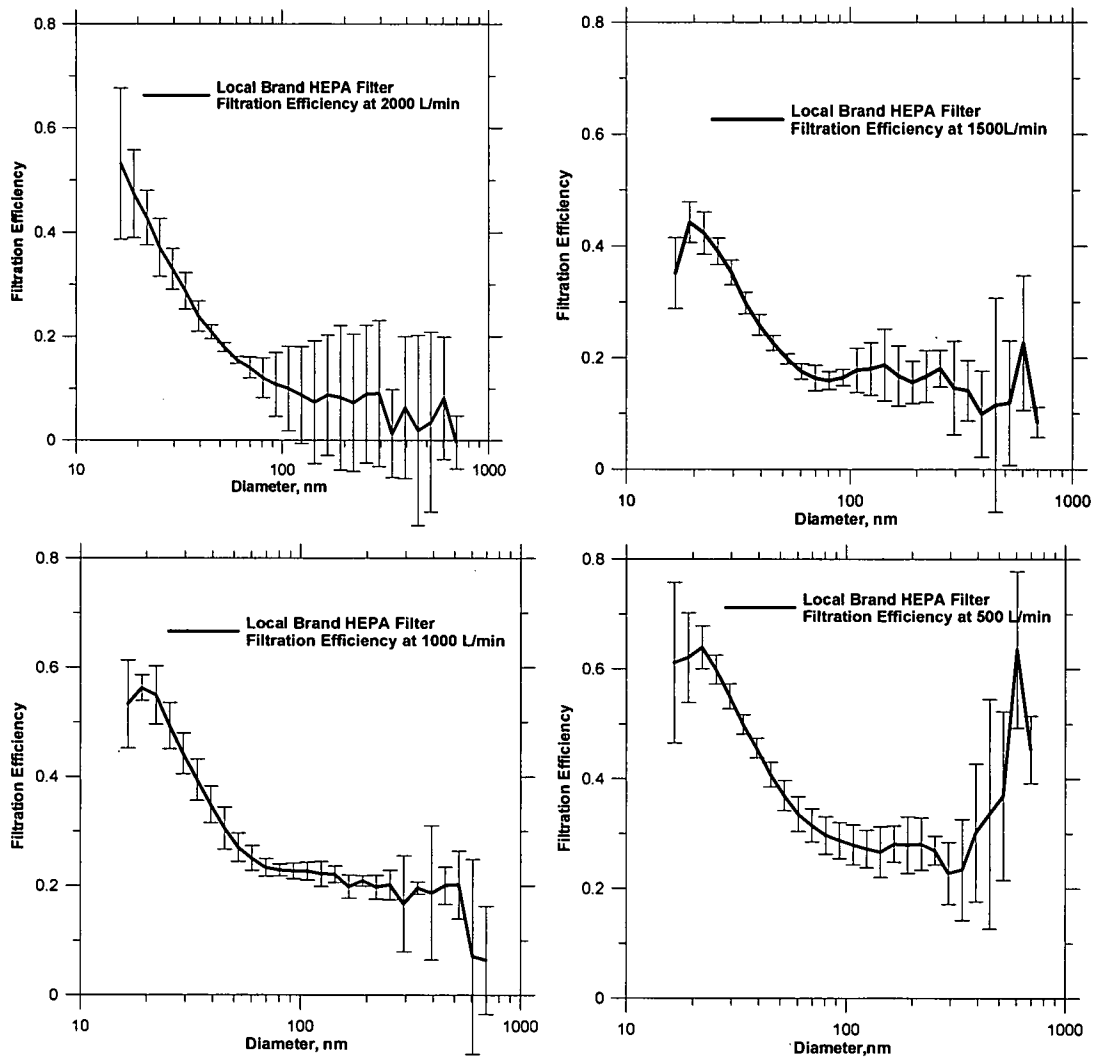


圖 152 亞拓電器公司，V03063P 在四種不同流速下對奈米微粒的過濾效率

## 第五章 奈米物質作業環境控制策略

奈米物質在作業場所的污染及造成作業人員的健康危害，是目前發展奈米技術最需要迫切解決的奈米安全衛生問題。爲了避免作業人員暴露於奈米物質而影響身體的健康，製程改善、作業環境管理、工程控制、過濾技術及個人防護設備等，均爲減少奈米微粒的暴露的控制方法，其他控制策略包括在密閉系統下生產製造、製程局部於密閉環境下生產、局部負壓、製程通風系統、限制製程的工作人員數目、管制其他人進入製程區域、減少作業人員可能暴露時間、定期清潔工作環境及機台表面、使用適合的個人防護裝備、污染區內禁止飲食等。

就暴露型態觀點而言，吸入性暴露是奈米微粒或材料最可能發生暴露潛在風險[16]，因此，廠方應將生產產品具有的潛在危害性，告知相關製程從業人員，並提供相關的個人防護具及防護設備等。評估和改善個人防護具及防護設備的效率，開發適用於奈米製程的口罩，研究奈米物質穿透手套可能性，以及個人防護具配戴後的處理方式等爲防止奈米物質暴露之個人防護手段。另外，定期舉行教育訓練和演練相關的緊急應變措施，以減少奈米物質意外逸散時的風險[2]。在奈米物質工程控制技術方面，一般常見的控制技術包括氣罩、局部通風系統、手套箱、空調系統（HVAC）、潔淨室（Cleanroom）、密閉製程、密閉管道系統、有害物質自動化系統層流工作台、生物安全櫃、正/負壓艙及手套袋等[2]。

世界各國已陸續發表了奈米物質作業環境控制指引，但本國尚無相關的控制指引供業者參考。爲防止粉塵作業引起之危害，我國目前訂定有粉塵危害預防標準[137]，規範的粉塵作業有採掘礦物場、積載礦物、坑內礦物、研磨、金屬加工、粉狀鋁或二氧化鈦之袋裝場、粉狀之礦物等或碳原料之製造或加工、鑄件拆除砂模等 23 種作業，其中只有粉狀鋁或二氧化鈦之袋裝場及粉狀之礦物等或碳原料之製造或加工二項作業和粉體有關。

在粉塵危害預防標準內，針對粉狀之礦物等或碳原料之製造或加工的發生源的說明爲”於室內混合粉狀之礦物等、碳原料及含有此等物質之混入或散布之處所”，應採措施爲(1) 設置密閉設備(2)設置局部排氣裝置(3)維持濕潤狀態；但是針對粉狀鋁或二氧化鈦之袋裝場作業的粉塵發生源及應採措施，及應著用呼吸防護具之作業則並未作說明。在粉塵危害預防標準內，對其他部份作業的一些污染源有規定要設置局部排氣裝置，排氣口的設置位置(室外、或室內)，移動式局部排氣



裝置所用的集塵設備等，且要求雇主至少每月應定期使用真空吸塵器或以水沖洗等不致發生粉塵飛揚之方法，以清除作業場所粉塵，但這些規定並未對集塵設備及真空吸塵器的效率作規範，對於一些污染源的作業要求著用呼吸防護具時，也未針對呼吸防護具的效率作規範。

另外我國也訂定有勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準[138]，規範了483種空氣中有害物及4種粉塵的容許濃度(表57)，大部份的有害物為氣狀污染物，和粒狀污染物有關的有氯化銨燻煙(容許濃度 $10 \text{ mg/m}^3$ )，砷及其無機化合物(容許濃度 $0.01 \text{ mg/m}^3$ )，碳黑(容許濃度 $3.5 \text{ mg/m}^3$ )，已內醯銨粉塵(容許濃度 $1 \text{ mg/m}^3$ )，鈷金屬燻煙及粉塵(容許濃度 $0.05 \text{ mg/m}^3$ )，銅燻煙(容許濃度 $0.2 \text{ mg/m}^3$ )，銅粉塵及液滴(容許濃度 $1 \text{ mg/m}^3$ )，棉塵(容許濃度 $0.2 \text{ mg/m}^3$ )，氧化鐵燻煙(容許濃度 $10 \text{ mg/m}^3$ )，鉛及其無機物(容許濃度 $0.1 \text{ mg/m}^3$ )，氧化鎂燻煙(容許濃度 $10 \text{ mg/m}^3$ )，錳燻煙(容許濃度 $1 \text{ mg/m}^3$ )，滑石(容許濃度 $2 \text{ mg/m}^3$ )，鉬金屬及粉塵(容許濃度 $5 \text{ mg/m}^3$ )，五氧化二釩粉塵(容許濃度 $0.5 \text{ mg/m}^3$ )，五氧化二釩燻煙(容許濃度 $0.1 \text{ mg/m}^3$ )，氯化鋅燻煙(容許濃度 $1 \text{ mg/m}^3$ )，氧化鋅燻煙(容許濃度 $5 \text{ mg/m}^3$ )。

表57勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準中的4種粉塵的容許濃度[138]

種類	粉塵	容許濃度	
		總粉塵	可呼吸性粉塵
第一種粉塵	含游離二氧化矽10 % 以上之礦物性粉塵	$10 \text{ mg/m}^3 / (\% \text{SiO}_2 + 2)$	$30 \text{ mg/m}^3 / (\% \text{SiO}_2 + 2)$
第二種粉塵	未滿一0%游離二氧化矽之礦物性粉塵	$1 \text{ mg/m}^3$	$4 \text{ mg/m}^3$
第三種粉塵	石綿纖維	1 f/cc	
第四種粉塵	厭惡性粉塵	可呼吸性粉塵 $5 \text{ mg/m}^3$	總粉塵 $10 \text{ mg/m}^3$

本章描述並比較世界各國的作業環境奈米物質控制指引，含英國國家安全奈米物質處理及處置指引[11]，美國 ASTM 工作場所懸浮工程奈米微粒處置標準指引[10]，日本奈米物質製造及處理作業環境現場暴露預防策略[139]，日本研究、製造現場奈米科技之確切管理手段之指引，日本勞働災害防防止協會[140]，英

國化學品分組控制評估模式-健康危害物質要件[141]，最後提出本國的奈米物質作業環境控制策略指引草案，供本國的學者專家及勞委會相關人員討論。

## 第一節 英國國家安全奈米物質處理及處置指引 [11]

英國的奈米微粒作業控制策略指引共分成十三節，含奈米物質之範圍、人造奈米物質之種類與特性、奈米微粒之暴露及風險、奈米微粒之一般風險管理方法、執行風險評估的人員的能力、資訊收集、奈米微粒之風險評估、暴露控制、健康檢查、暴露評估方法、溢出及意外釋放、廢棄物處置方法、火災及爆炸預防，以下扼要說明其重要內容。

### 壹 奈米物質之範圍

奈米物質的範圍涵蓋奈米微粒、奈米纖維、奈米粉體、奈米碳管和奈米線等，這些物質統稱為奈米物質。本文獻提出奈米物質有效的風險評估指引並建議奈米微粒風險的控制策略。因為奈米物質之風險評估仍有許多不確定性，安全的作業環境濃度限值也尚未確認，因此本指引建議處理和處置奈米物質時應採謹慎的策略。

### 貳 人造奈米物質之種類與特性

本章節描述幾種常見的奈米物質之特性，含富勒烯、奈米碳管、奈米線、量子點及金屬、氧化物等其他人造奈米物質。富勒烯結構類似於石墨，可以形成三維的結構，性質穩定且不溶於水，可應用在藥物傳輸、塗佈、氫氣儲存等。奈米碳管會形成直徑為 nm 之管狀結構，它有很強的張力、很大的表面積及很強的分子吸附能力，可應用在塗佈、電子學、水的純化等。奈米線為導電或半導體之奈米微粒組成，有很大的長寬比，可應用在連接器、感應器等。量子點為很小的半導體物質，通常含 1000 至 100000 個原子，可應用在催化、醫學射影、光學裝置等。其他的人造奈米物質有多種形式，也可能為圓形，聚集態(agglomerate)或聚合態(aggregate)，包含碳黑、二氧化矽、金屬氧化物、半導體與有機物之奈米物質，用於塗敷、顏料、觸媒、個人防護產品、化妝品及複合物質。

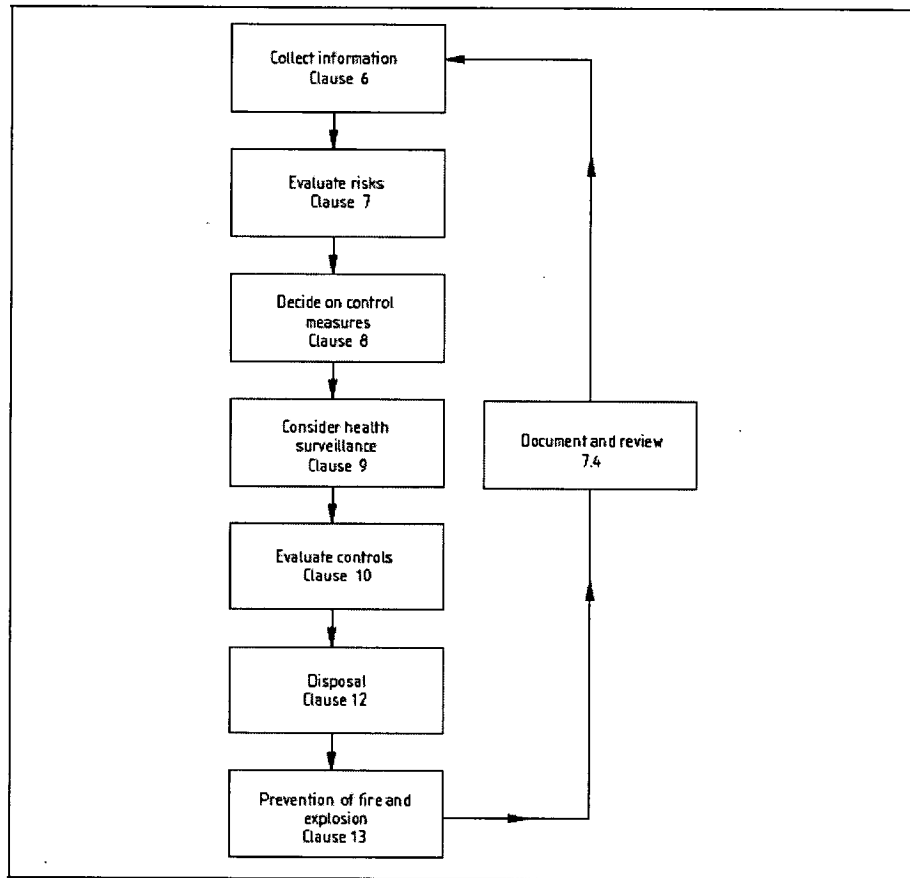
### 參 奈米微粒之暴露及風險

奈米微粒之暴露來自於工業上的活動和環境污染，暴露於奈米微粒會造成健康上的危害，故暴露量的多寡極為重要。吸入奈米微粒對健康之風險與微粒大小息息相關，因奈米微粒很小，可直接通過細胞邊界而從肺部進入血液或身體其他器官，此過程稱為“轉移”。此外小微粒會有較大的表面積會增加毒性的影響，奈米微粒和大微粒有不同的特性，若改變化學、物理及生物特性有可能會使奈米微粒的毒性增加，有些奈米微粒(如奈米碳管或奈米線)有很大的長度-直徑比，它們可被吸入但不易被移除。目前對奈米微粒食入或消化對健康之風險的研究甚少，亦無直接證據顯示食入奈米微粒對健康的危害，但也要減少此途徑之暴露。奈米微粒有可能已有暴露濃度限值，也可能在物質安全資料表中被歸類為致癌性或致突變性，或被歸類成有毒性、有害性、刺激性、腐蝕性物質等，但目前對於奈米微粒的毒性仍沒有足夠的證據，且物質安全資料表也尚無法反應出奈米物質的毒性，目前只能認定奈米物質具有潛在的毒性，使用奈米微粒的工作場所需控制其暴露量。奈米微粒也有火災及爆炸之風險，微粒愈小愈有爆炸之風險，目前奈米微粒的火災及爆炸風險仍需要再進行研究。

### 肆 奈米微粒之一般風險管理方法

和其他有害的化學品類似，奈米微粒的風險管理架構可分為八步驟，分別為辨識危害與風險、決定所需的事前預防、避免或控制暴露、確保控制措施的使用及妥善維護、暴露監測、實施健康檢查、準備好處理意外及緊急狀況的程序、確保員工接受充分的資訊、訓練與監督。風險管理的程序中，首先要收集奈米微粒的相關資料，經評估風險後再決定控制措施，同時實施健康檢查，檢討控制成效及妥善處置奈米物質，避免火災與爆炸，如圖 153 所示。

圖 153 奈米微粒之一般風險管理方法



#### 伍 執行風險評估的人員的能力

執行奈米微粒風險評估的人員涵蓋發展及應用奈米物質的人員、經理人員或職業衛生人員，因目前有關奈米微粒毒性及法規之資訊較不足，相關人員須有能力接受奈米微粒之風險評估資訊或接受訓練。

#### 陸 奈米微粒之資訊收集

風險評估首先要辨識風險，故必須收集奈米物質相關資訊，如物質的商業名稱和其專業術語，有無適當的物質安全資料表，它的粒徑分佈、化學組成、水溶性、揚塵性、長度-直徑比、危險性及毒性等，都是我們必須收集的資訊。

#### 柒 風險評估

在危害評估方面，建議可依奈米物質的特性將其分為四大類：纖維狀的奈米物質，致癌、致突變、致氣喘或生育毒素(CMAR, carcinogenetic, mutagenic ,

asthmagenic, or a reproductive toxin), 非可溶性奈米物質(非纖維或 CMAR 物質), 可溶性奈米物質(非纖維狀或 CMAR 物質)。纖維的奈米物質為長度-直徑比大、不溶解的纖維狀奈米物質, 大微粒狀態下且有致癌或突變的奈米物質也分類成爲 CMAR, 非可溶性奈米物質爲不溶或溶解度極差、且不是纖維狀或 CMAR 的奈米物質, 可溶性奈米物質爲溶解性高且不是纖維狀或 CMAR 的奈米物質。暴露評估時應涵蓋使用奈米物質的目的、範圍、程度及方法, 並估計個人或群組不同路徑下的暴露及劑量等。在暴露評估中還必須了解何種工作使人們暴露於奈米微粒(製造、清潔、維修、運輸和儲存等), 在工作中誰會暴露於奈米微粒之環境中(工人、參觀者和管理者等), 人體暴露的途徑有哪些(吸入、食入和皮膚滲透等), 暴露發生的機會及程度, 暴露控制的方法等, 都是我們必須考慮的。對奈米物質的潛在危害和暴露需要有相當程度的了解, 執行風險評估的優先順序由對健康之嚴重性、發生的快慢及可被處理的快慢來決定, 其中以對健康危害程度最爲優先。在作完風險評估後需要建檔並隨時補充新的資訊。

## 捌 暴露控制

在暴露的控制方面, 本指引建議的控制優先順序(hierarchy of control)如圖 154 所示, 可應用於吸入和皮膚接觸風險上, 暴露控制的選擇, 以圖 154 中金字塔的最上端最爲優先, 逐次往下作控制。

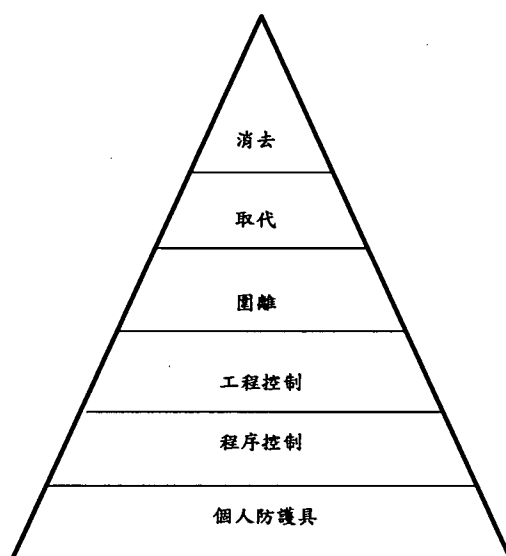


圖 154 暴露控制的優先順序

(1) 消去：避免使用有害的物質或會造成暴露的製程。假若奈米物質是因為它的特殊特性而被採用，則這個選項很難被達成。然而，業者應當考慮若使用奈米物質以改善物質的性質時，是否會造成風險的增加。

(2) 取代：將原來的奈米物質或製程改成較低風險的替代物或製程，若是無法取代某項奈米物質時，可使用一些方法來降低暴露的可能性，例如：使用固體或液體來結合奈米物質，如果技術可行的話，應該盡量使用懸浮液、糊狀或丸狀的形式來取代粉末狀的奈米物質。

(3) 圍離：所有會釋放奈米物質至在空氣中的的操作過程應該在密閉的設備內進行，或人員應該與製程隔離(例如：在小隔間內)，這包括產生氣相奈米物質與噴霧乾燥製程。其他利用乾式奈米物質的製程應該儘可能的被圍離。

(4) 工程控制：所有可能形成粉塵的製程應該在抽氣通風系統內完成。可用的抽氣系統範圍很廣，包括：氣櫃、氣罩、粉塵抽引器。適當控制的選擇端看風險的等級而定。抽風設備必須定期維護測試，抽出的氣體在沒有經過排氣淨化之前不可再循環使用。皮膚暴露的減少可藉由工程改善來避免奈米物質的飛濺和避免以手接觸液體之製程。

(5) 程序控制：程序控制須伴隨工程控制，雖然在某些場合下，風險評估可能指出僅需以程序控制即可完成暴露的改善。程序控制包括降低人員暴露數量或是減少人員停留在特定製程的時間、把製程限制在特別區域內、禁止未經授權之人員進入特定區域。相關人員應被告知游離奈米微粒的特定危害，特殊措施的需求，和暴露於粉塵中對健康的潛在效應，相關資訊應包在操作手冊中。必要時應該進行例行性的監測與健康及醫療檢查。雇主應該負責清潔工作服，並與私人的衣物分開儲存，且定期清潔工作場所。

(6) 個人防護具：人員防護是暴露控制的最後選項或是輔助性質的選項。

(a) 呼吸暴露防護：選擇與使用口罩的資訊可見於英國衛生安全局[142]。適當的呼吸防護具(RPE, respiratory protective equipment)，包含可拋棄式過濾口罩、半罩或全罩面罩、供氣式的氣櫃、頭盔、工作服及外套等的選擇取決於製程風險評估結果。一定要使用高效率的濾材(P3 和 FFP3 種類)。所有穿著 RPE 的人員需經過面罩的密合度試驗，來確保氣密及穿戴正確[143]。個人防護具，特別是呼吸防護具需要大量投資於訓練、管理與維修來提供所需的防

護等級。錯誤的選擇和密合度不良，或使用不當時會造成防護效果不良。

(b)皮膚暴露防護：風險評估結果有時會顯示需要防護手套、附側邊的防護眼鏡和防護衣。僅依據手套製造商所公佈的資訊來選用手套不足以確保足夠的防護。在假設手套被正確的穿戴與維護的情況下，選用防護手套有四個基本準則：(i) 適用於所使用的風險和環境 (ii) 應該適合穿戴者的健康狀態和符合人因工程要求 (iii) 合於穿戴者的尺寸 (iv) 應該防止暴露而不產生整體的危害。

為了協助暴露控制成效的評估，本指引建議了以下四種危害性奈米微粒的標竿暴露值(benchmark exposure levels)，但是這些值並未經過嚴格的研究過程，只可當成一個實用的基準，不能被使用為工作場所的安全暴露限值。四種危害性奈米微粒的標竿暴露值如下：

(1) 纖維的奈米物質：在英國,目前最嚴格的空氣中纖維濃度標準為0.01纖維數/ml，此為石綿的清除機制的下限值。纖維的定義為微粒的長寬比大於3:1且微粒長度大於5000 nm時稱之，所使用的計數方法是位相差光學顯微鏡。建議纖維奈米物質的標竿暴露限值為0.01纖維數/ml，此濃度以掃描式或穿隧式電子顯微鏡決定之。

(2) 致癌、致突變、致氣喘、生育毒素的奈米物質：CMAR奈米物質潛在增加的溶解度可能導致生物利用度增加。為了提供安全裕度，建議0.1 x 物質WEL(WEL, Workplace exposure limit) 為標竿暴露限值，以質量濃度的方式表示。

(3)非可溶性奈米物質：對非可溶性奈米微粒，NIOSH最近建議二氧化鈦微粒的暴露限值為1.5 mg/m<sup>3</sup>，超細二氧化鈦微粒為0.1mg/m<sup>3</sup>，均為時量平均值(TWA ,Time-weighted average) [6]。在沒有其他已發表的方法下，這不失為是建立其他奈米物質的標竿暴露限值的合理基準。在此基準上，建議非可溶性奈米物質的標竿暴露限值為0.066 x物質的時量暴露限值，以質量濃度的方式表示。另外也建議可利用微粒數目濃度作為標竿暴露限值。在英國，目前都市污染的範圍為20000~50000 #/ml，因此建議以這個範圍的最低點20000 #/ml作為工作場所微粒濃度的適當標竿暴露限值。

(4)可溶性奈米物質：對於在任何情況下具高溶解度的物質，奈米微粒形式不可

能導致較大的生物利用度，也不會產生非可溶性微粒相關的影響。因此對於這些物質，所建議之安全的標竿暴露限值為0.5 x 物質的時量暴露極限。

表 58 列出以上四種奈米物質的最低控制方法，但實際之控制成效則得以儀器測量才能決定。

表 58 不同工作型態的控制方法

產生氣膠化之生產或噴塗

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should be enclosed or otherwise separated from personnel.
Insoluble/soluble nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel, although ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods might be sufficient.

乾式物質的運送、混合、填料

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should be enclosed or otherwise separated from personnel.
Insoluble/soluble nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel, although ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods might be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.

懸浮液的運送、混合、填料

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel. However, in most cases, ventilated engineering controls should be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.
Insoluble/soluble nanomaterials	Ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods should be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.



## 維護及清潔

Fibrous and CMAR nanomaterials	The extent to which this process can be enclosed should be maximized. In practice, however, use of appropriate RPE and skin protective equipment should be effective. Cleaning cannot involve any deliberate aerosolization
Insoluble/soluble nanomaterials	In most cases use of appropriate RPE and skin protective equipment should be effective. Cleaning cannot involve any deliberate aerosolization.

## 玖 健康檢查

在工作場所的奈米微粒暴露是否會造成疾病或對健康上的危害尚無定論。但仍需謹慎地收集奈米物質之使用量及使用期間的資訊並建立檔案，以利於日後建立奈米微粒暴露資料，並解釋將來可能出現之健康危害。

## 拾 暴露評估方法

目前可以使用的儀器及方法在 ISO/TR27628 中描述，含數目、質量和表面積的直接測量儀器，如數目方面有凝結微粒計數器(CPC, condensation particle counter)，掃描式電動性粒徑分析儀(SMPS, scanning mobility particle size)，電子顯微粒(SEM,TEM)；在質量方面有固定點分徑採樣器(大都為多階衝擊器可採集奈米微粒，尚無個人的奈米微粒採樣器)及錐狀元件振盪天平(TEOM, Taper element oscillating microbalance)等；在表面積方面有擴散充電器(diffusion charger)作成的表面積分析儀，靜電低壓衝擊器(ELPI, electrical low pressure impactor)及電子顯微粒等。以上 SMPS 及 ELPI 得到的數據可藉由密度、微粒的形貌資料間接轉換成不同量度單位的奈米微粒數據[134]。(註:詳細的儀器說明，可參考 97 年度勞工安全衛生研究所 IOSH97-H104 ”奈米微粒作業環境控制性能評估”的研究報告，第二章第壹項奈米微粒暴露監測及採樣設備。)

暴露評估的採樣策略方面，NIOSH 建議採取多面向的採樣技術，第一步驟為污染源的辨識，可以利用 CPC 為之，但須先量測背景之奈米微粒濃度，再比較生產時的微粒濃度，才能測出人造奈米微粒的污染來源。對於特別的奈米微粒物種，如 TiO<sub>2</sub>，則須以濾紙採樣方式再以 TEM 決定微粒是否存在及分析微粒之粒徑分布。當污染源決定之後，再以表面積分析儀決定粒徑的表面積及利用 SMPS 或 ELPI 量測微粒的粒徑分布。目前有個人配戴型的表面積分析儀可以使

用。最後可使用個人的可呼吸性旋風式或衝擊式粉塵採樣器採集微粒，以便於化學分析，或用電子顯微鏡辨識及量測奈米微粒的粒徑分布。以上這些多面向的方法可以決定工作場所奈米微之暴露特性及濃度，但是由於這些方法以固定點採樣為主，與個人的實際暴露量之間會有差異。

### 拾壹 意外溢出及釋放

雇主應提供奈米物質在溢出及釋放的預防及處理程序，並予以文件化，確實完成此意外事件的風險評估並確保採取適當的行動方案。意外逸散的奈米粉體之清除時須確保人員的暴露量能降至最低。緊急應變的人員需受過完整的訓練，並配戴適當的個人防護具，避免人員進出污染區域，且清除的奈米粉體應適當的作處置。

### 拾貳 奈米廢棄物處置方法

處理含有奈米物質之廢棄物種類有純奈米物質，含有奈米物質的容器、個人防護具，含奈米物質的液體懸浮物及附著奈米物質的固體。用來製造或處理奈米物質的裝置在丟棄或再利用前須先除污。奈米廢棄物的處置前應先儲存，可儲存於廢棄物容器或塑膠袋中，將奈米廢棄物封存於容器中可避免溢散，在容器外需清楚標示廢棄物的相關資訊，塑膠袋可用來裝紙類、個人防護具等其他污染物，最好以兩層塑膠袋避免污染外洩，在塑膠袋上亦需標明廢棄物的相關資訊。奈米物質可視為化學廢棄物來處理，除了可以分為有機廢棄物處理程序和無機廢棄物處理程序外，還根據其危害特性來分成 H5(有害物質吸入、食入或滲透皮膚會造成些許健康風險)，H6(有毒物質吸入、食入或滲透皮膚會造成嚴重的健康風險甚至死亡)，H5 通常為不溶或可溶的奈米微粒，而 H6 通常為 CMAR 之種類。

### 拾參 火災及爆炸預防

在英國，火災與爆炸的議題在 DSEAR 中規範(The Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulation)，但奈米微粒火災、爆炸及催化預防和控制方法仍需評估。細微粒之火災及爆炸預防可以應用於奈米微粒，但對於會氧化的奈米金屬粉體需特別注意。奈米微粒較易分散成懸浮微粒，在空氣中停留時間較

久，電器設施的設計需特別考慮防塵措施，以防止火災。為減少其火災與爆炸風險，應在製造過程控制氣壓，儲存過程使用二氧化碳、氮氣或其他氣體。為防止奈米粉體之點火爆炸風險，應降低靜電之產生，如使用抗靜電的鞋子即為可行的方法。奈米物質若有反應性時，應避免其和不同物質接觸。

## 第二節 美國 ASTM 工作場所懸浮工程奈米微粒處置標準指引 [10]

美國的工作場所懸浮工程奈米微粒(UNP, unbound engineered nanoscale particle)處置標準指引共分成十二節，含指引之範圍、參考文獻、術語定義、指引摘要、重要性及使用、建立控制原則、危害評估、奈米微粒之風險評估、減少奈米微粒暴露的方法、特定工作場所的暴露降低與處置、奈米微粒意外逸散時的緊急應變、個人防護具，簡要敘述如下

### 壹 指引之範圍

本指引描述在研究、生產、實驗室或作業場所減少人體暴露於懸浮工程奈米微粒應採取的措施，在無相關的暴露標準、正確危害資訊及暴露數據下，本指引提供了控制及預防 UNP 暴露的方法。UNP 存在的形式很多，如粉體、懸浮物、聚集物( agglomerate )，原始微粒的聚合體( aggregate )，或分散於介質中的微粒。

### 貳 參考文獻

#### 5.2.2.1 ASTM Standards:E2456 Terminology Relating to Nanotechnology

### 參 術語

本指引中之術語在 Terminology E2456 中定義

氣動直徑(AED):和真正的微粒具有相同終端速度之單位密度圓球之直徑。

聚集物(agglomerate): 奈米微粒間以凡得瓦力鬆散的聚集成一較大微粒。

聚合體(aggregate): 奈米微粒以融合、燒結等緊密方式聚集成一較大微粒。

控制原則(control principle):本指引之控制原則為減少 UNP 暴露至最低合理可行的濃度。

奈米尺度(nanoscale):至少有一維以上的尺寸在 1~100 奈米尺度。

超細微粒(ultrafine particle):直徑比 100nm 小的微粒。

其他尚有可呼吸性、可吸入性奈米微粒等的定義。

#### 肆 指引總結

本指引提出 UNP 處理及降低暴露的要素，主要有六項:建立管理階層對控制原則之承諾，辨識及溝通潛在危害，工作場所 UNP 暴露的評估，在相關操作和活動中執行工程與行政控制原則，建立文件檔案，定期審查控制之有效性。本指引的控制原則是工作場所的 UNP 濃度須降至最低合理可行的濃度。

#### 伍 重要性及使用

本指引適合於工作場所 UNP 的處理原則及應用技術，含奈米物質的研發活動、生產、使用及加工。

#### 陸 建立一般執行控制原則的計畫

建立一個達成 UNP 控制原則的計畫，此計畫需有管理階層之承諾，人員組織及責任，訓練及督導，計畫之文件管理，及計畫之定期審核等，以將 UNP 之暴露降至最低合理可行的濃度。

#### 柒 危害評估

奈米微粒之毒性及健康危害與粒徑的分佈、形狀(纖維長度、直徑、長度/直徑比)、聚集狀態、表面積、孔隙率、表面化學、微粒中的不純雜質成分、化學組成、物理性質及晶型有關。目前尚無 UNP 的法規職業暴露限值(OELs, occupational exposure limits)，只有對厭惡性粉塵、石英粉塵有 OELs。建議針對既有 OELs 限值發展過程作研究，以了解其是否適用於奈米微粒。

在沒有明確的 OELs 之前，最謹慎的做法是將奈米微粒暴露控制至最低合理可行的濃度。以下為在此過渡時期的一些 OELs，可供 UNP 暴露控制之參考:

(a) ACGIH 認為在恕限值(TLV, threshold limiting value)訂定前，所有未定義微粒物質(PNOS, not otherwise specified)之可呼吸粉塵濃度應低於 3 mg/m<sup>3</sup>，可吸

- 入粉塵濃度應低於  $10 \text{ mg/m}^3$ 。此 PNOS 限在適用於非可溶或難溶於水、毒性低的微粒，但是未考慮到奈米微粒的差異性，可能無法適用於所有奈米微粒。
- (b) NIOSH(2005)建議奈米  $\text{TiO}_2$  的 8~10 小時 TWA 為  $0.1 \text{ mg/m}^3$ ，但是 Warheit 等人以不同形狀的  $\text{TiO}_2$  奈米桿及點之研究顯示，增加表面積使奈米  $\text{TiO}_2$  微粒之毒性高於大微粒[144]；Sayes 等人發現奈米銳鈦礦石  $\text{TiO}_2$  的細胞毒性為金紅石奈米  $\text{TiO}_2$  的 100 倍，因而認為晶型比微粒大小對毒性的影響較重要，但此結論仍待動物實驗證實[145]。
- (c) 奈米碳管—2006 年 ACGIH 的總碳黑粉塵之 8 小時 TLV-TWA 為  $3.5 \text{ mg/m}^3$ ，可呼吸性石墨(除石墨纖維外)為  $2.0 \text{ mg/m}^3$ 。但這些暴露現值是否適用於奈米碳管仍待研究，奈米碳管之表面積、數目、質量濃度均有可能被列入 OELs 之考量，其中所含之微量金屬通常有 OELs 之規範。有一些單壁奈米碳管(SWCNT)的毒性和石英之毒性相當(以質量濃度計)，在過渡期間可使用可呼吸性石英粉塵之 8 小時 TLV-TWA  $25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  作為 SWCNT 之 TLV-TWA，應會比 2006 ACGIH 對可呼吸性合成石墨粉塵之 TLV-TWA  $2000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  適當，但仍應考慮 SWCNT 之聚集狀態、官能機及微量金屬。Donaldson 等人研究多壁奈米碳管(MWCNT)發現其致纖維化及致發炎毒性很高，與貴橄欖石石棉(Chrysotile)相當，因而建議用類似石棉的纖維數目評估方法作為 CNT 的風險評估方法，但是因 CNT 經常纏結成一團使得評估困難。2006 ACGIH 8 小時可呼吸貴橄欖石、可呼吸性耐火陶瓷纖維及玻璃棉纖維的 TLV-TWA 分別為  $0.1 \text{ fiber/cm}^3(\text{f/cc})$ 、 $0.2 \text{ f/cc}$  或  $0.1 \text{ f/cc}$ [146]。另外 Donaldson 等人也認為 CNT 的表面積濃比質量濃度較適合作為評估的量度(metric)標準。CNT 最常用的微量金屬如鐵、鈷、鎳、錳等在 ACGIH 已有可吸入、可呼吸性、總粉塵濃度的 OELs，將來會增加胸腔區的 OELs[146]。

### 捌 奈米微粒之暴露評估

暴露降低之計畫取決於上節中的危害評估及本節中的暴露評估及風險計算結果。工作場所中的 UNP 暴露路徑有吸入、食入和皮膚接觸三種，其中以吸入之暴露路徑最有可能；吸入後之 UNP 在呼吸道中被清除後有可能再被嚥入食道系統，由手至口之 UNP 傳輸也是食入 UNP 之可能路徑；一些奈米微粒有可能會

經由皮膚或眼球進入人體。以上的這些暴露與 UNP 之物理特性有關，如在奈米複合物質內的結合態(bound)UNP 在一般的物質處理時不會有暴露之虞，但是在加工或燃燒時則有可能釋出 UNP。直徑在 500 nm 以上之 UNP 在人體呼吸道內之沉積與氣動直徑有關，500 nm 以下擴散機制較重要，因而沉積與幾何直徑有關，逸散性較大之奈米物質較易變成氣膠態而侵入人體。

對於工作場所內可能暴露之地點必需要有完整之紀錄文件，如奈米物質之接收及開封，生產及成品過程，實驗室的操作、儲存、包裝及運送，廢料管理活動，維修及清理操作，人員在 UNP 工作區之進出等，均有可能造成人員暴露於 UNP 之製程或活動。當可能暴露點被辨識之後，再執行定性或定量之暴露評估，並完整的紀錄評估方法及結果，考慮之參數有不同製程點的 UNP 物質特性、使用量、製程設備之設計及性能，及行政及工程控制之方法等。對於新的製程而言，在設計階段即應執行暴露評估，以降低 UNP 之本質暴露，並於開工後、製程變更時及定期執行評估。

UNP 定量風險評估之目的在於估計不同製程之暴露程度，辨識 UNP 污染來源及暴露分佈，評估工程控制、工作法則(work practices)及製程變更之效率，評估 UNP 之暴露量度方法(metrics)並比較同一物質之既有 OELs 標準。但是定性及定量之暴露評估均有一些技術上之困難，目前仍有許多未有共識之處，如不同度量度方法之相對重要性，不同度量度方法測量暴露特徵或最佳暴露量測技術，背景奈米微粒之影響等。

## 玖 減少奈米微粒暴露的方法

有三種方法可以降低 UNP 之暴露，包括(1)工程控制(如製程改變，密閉製程，通風系統及工作區域圍離等) (2)行政控制(如工作法則及規定) (3)個人防護設備(手套、防護衣及面罩)。工程控制為較好的控制方法，當工程控制及行政控制無法有效降低 UNP 暴露時，則使用個人防護設備。

### (1)工程控制

UNP 工程控制之方法與一般控制微粒與氣體污染物的方法類似，污染圍離、整體換氣及局部排氣均為有效的方法，製程管線密封，連鎖控制，機器人代操作等也是可行的方法。UNP 合成、製造、傳輸、產品回收及其他處理活動應

在密閉之系統內進行，UNP 之處置應儘可能以密閉方式進行，如使用密閉反應室、密閉儲存容器、泵圍離、閥隔離等，一些 UNP 操作可在手套箱內進行。儘可能使用液態的製程，避免使用乾式粉體製程，以降低 UNP 的逸散。製程產生的 UNP 廢棄物盡可能減少，以降低廢棄物處理時 UNP 的污染。

整體換氣及局部通風對 UNP 之控制十分有效，但需將氣罩收集的 UNP 作有效的濾除後再排放至大氣，以避免污染環境或再污染工作場所。局部排氣在使用時避免粉體上面的空氣速度太高而造成揚塵，使用低速之手套箱、化學排煙櫃及平衡型的密封箱等；若使用高速之排煙櫃時，可在內部使用手套箱或密閉箱以避免揚塵。使用 HAVC 系統於 UNP 工作區時，需仔細的設計補充空氣及排氣系統，以避免將 UNP 自工作區帶至其他區域。若以清潔室作為 UNP 的圍離工作區，則內部應比其他區域之壓力低，避免 UNP 逸散至其他區域。在排氣通風系統內需裝設高效率 HEPA(high efficiency particulate air filter)過濾器，其他有效之控制設備，及管道清潔孔，及使用安全的濾材更換系統，避免濾材更換時 UNP 之逸散。

## (2)行政控制

行政控制是工程控制的重要輔助控制手段，包含工作法則及操作程序，以降低 UNP 之暴露濃度。保持操作階段時的作業區表面清潔，避免 HEPA 真空吸塵器及控制設備的排氣造成 UNP 的二次污染；避免使用壓縮空氣或吹風機清除表面的 UNP，其他擦拭、掃除等乾式清潔法也應避免。製程機台也要保持表面的清潔，每日應清除表面 UNP 粉塵。避免使用布面或多孔的家俱或設備，應使用光滑的材質便於清潔。

在 UNP 工作區內禁止吃、喝、抽菸或使用化妝品，離開工作區時人員應洗手，UNP 工作區的人員該管制。製程安全管理對工程控制的順利操作十分重要，避免 UNP 之意外逸散，製程流程圖、儀表及管路圖需齊備，試車前操作程序需文件化並由相關人員審查及核可。製程控制時需要有儀表測量相關製程變數，以提供安全條件的監控及緊急停機時機，避免 UNP 之意外洩露。檢視可能產生火災或爆炸之生產或製程作業，並安裝適當的控制設備以避免火災或爆炸之發生。當粒徑越小時，UNP 之爆炸風險會升高很多，十分惰性的物質奈米化後有可能變成可燃物質，不可不慎。通風及控制設備需要作定期檢查，以確認其操作正常。操作及維修人員需定期的訓練，以確保 UNP 不會有意外之逸散。UNP 之工作人

員必須定期健康檢查，NIOSH 正在準備奈米技術的職前衛生健檢之指引。

## 拾 特定工作場所暴露降低與處置

玖節所述控制方法在特定工作場仍有許多應補充之處。例如當有身體暴露之虞時，實驗室之研究人員應穿著工作服，避免將工作服穿至 UNP 污染區之外。廠內清潔、預防保養及維修時易產生 UNP 之逸散，負責人員應建立適當的作業程序，並施以適當的訓練。使用 HEPA 過濾系統、負壓隔離減少 UNP 從工作場所逸散置其他區域。被 UNP 污染的物體從工作場所移除前應先用去污裝置去污。就地清潔技術(CIP, cleaning in place)可在清理過程中減少 UNP 的逸散。UNP 應儲存於容器中，為避免其外露除非有必要時的加入或移除均應密封，而儲存器由塑膠或金屬製成，應堅硬、無毒、密封且 UNP 無法滲透，且需被存放於指定的地點。被 UNP 污染的容器與襯墊若要重複使用時，需經過徹底清洗、擦拭或真空吸除後，才可重複利用。

## 拾壹 奈米微粒的意外逸散時的緊急應變

應建立 UNP 逸散時的緊急應變計畫，UNP 逸散的意外發生時須儘快將 UNP 清理乾淨，處理程序有包括將工作人員撤離逸散 UNP 場所並限制人員進入，使用 HVAC system，減少 UNP 擴散至其他場所，提供特定暴露人員的檢查，受到 UNP 污染的物質應被密封儲存在容器中等。

## 拾貳 個人防護具

### (1)呼吸防護

不同的呼吸防護具提供不同程度的保護，應根據 UNP 的特性與暴露量來選擇，可參考(CFR, Title 29, Part 1910, Section 1910.134, 選擇適當的呼吸防護具 <http://www.osha.gov/pls/oshaweb>)

### (2)防護衣

防護衣或手套於預防 UNP 之暴露時，需針對奈米物質的特性及廠商提供之建議，選擇適當的材質。ASTM 提供了防護衣計畫、選擇、使用及管理的指引。汙損的防護衣在脫下時要注意 UNP 揚起的問題，脫下前先要去汙



(decontamination)，且脫下防護衣時應帶著防護面具[147]。

### (3)眼睛保護

最低的眼睛防護措施為具有護邊的安全眼鏡，[31]提供了眼睛保護的指引，可供參考。

## 第三節 日本奈米物質製造及處理作業環境現場暴露預防策略 [139]

### 壹 奈米物質的對象

由元素的原物質製成的固體狀物質，至少有一維的尺寸小於 100nm 的奈米粒子及奈米構造物稱為奈米物質。

### 貳 作業人員的對象

以第一點所稱之奈米物質之製造及處理(含修理、預防保養，及研究製造場合)有關作業人員(含管理人員) 為對象。

### 參 暴露預防的方法

#### (1)製造設備方面

原則上奈米物質製造設備應密閉，但是若有困難時應設置局部排氣系統，排出屋外的排氣口應加裝高性能的過濾器，且局部排氣設施應定期維修保養。

#### (2)奈米物質的其他處理作業方面

奈米原物質之接收、原物質及製品的秤重、製造加工設備的投料、製造加工設備產品的回收、容器的移出更換、製造加工設備的清潔、點檢、維修或容器清洗等作業的作業人員，用以下的方法預防暴露：

(i)以密閉化、無人化、自動化之方法，使作業人員不會暴露於奈米物質，有困難時應設置局部排氣系統，且排出屋外的排氣口應加裝高性能的過濾器。

(ii)局部排氣設施裝設後應定期維護保養。

(iii)直接處理奈米物質之作業人員應穿戴適當的防護具及作業衣服。

#### (3)作業管理方面

(i)奈米物質處理有關的作業應研擬計畫，免於作業人員暴露於奈米物質。

- (ii)作業場所之地面及作業台面的清掃須避免奈米物質之擴散，應使用高性能的真空吸塵器或以濕布擦拭，使用過後的抹布及濾材應妥善的處置。
- (iii) 應對作業人員施以奈米物質的物理化學特性及暴露預防的教育訓練。
- (iv)奈米物質的製造加工場所或處理場所應與其他場所隔離，二者間應設置除汙區，勿使附著奈米物質污染至其他場所。
- (v)應限制與奈米物質的製造加工或處理作業無關的人員進入奈米物質的作業場所。

#### (4)防護具方面

- (i)使用適當的呼吸防護具防止奈米物質的吸入需準備足夠的呼吸防護具並保持清潔有效。防塵口罩的規格須經國家認證(昭和 63 年 勞動省告示第 19 號)，粒子捕集效率在 99.9%以上或使用同等級的產品。
- (ii)使用適當材質的手套避免奈米物質在皮膚附著。手套應保持清潔有效，使用後即丟棄，但需裝入袋中妥善的處置。
- (iii)使用護目鏡，需備妥足夠的數目並保持清潔有效。
- (iv)為防止來自作業衣上面的奈米物質暴露，需使用奈米物質專用的防護衣，一般此防護衣以不織布製成，須保持其清潔有效，且附著奈米物質之防護衣不得攜出作業場所之外。

#### 肆 其他有關的資訊獲得

今後獨立行政法人勞動安全衛生綜合研究所之網頁首頁應設計連結，以公佈研究所的奈米物質研究成果及各國奈米物質控制指引有關的資訊。

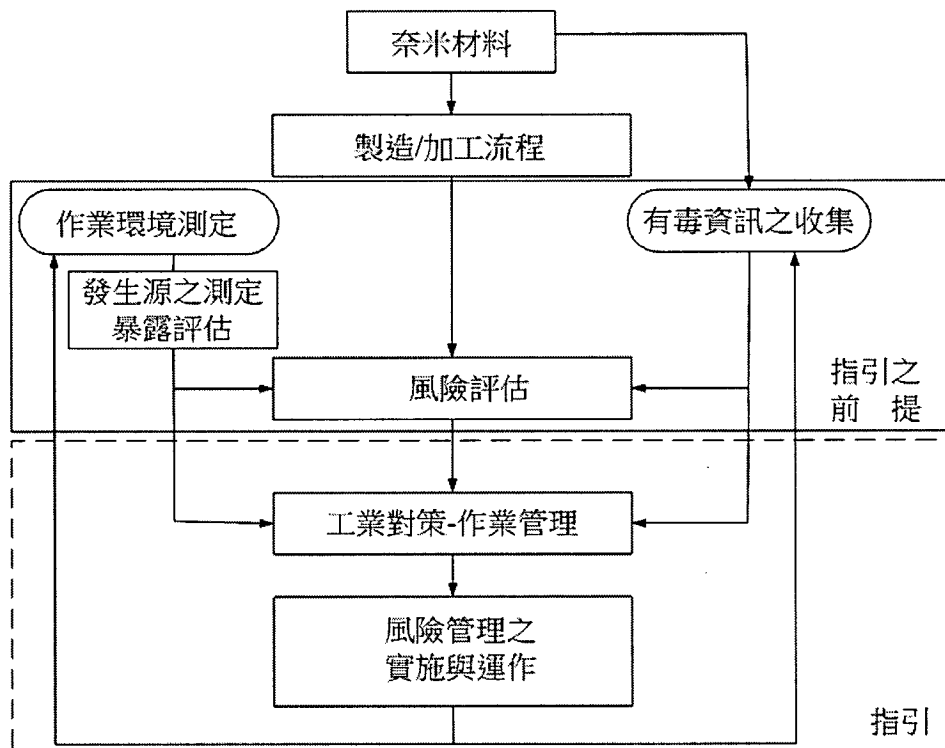
#### 第四節 日本研究、製造現場奈米科技之確切管理手段之指引 [140]

##### 壹 前言

奈米科技製程產品的市場愈來愈大，但奈米物質的製造及處理場所，奈米技術的研究場所的物質處理，至今尚無統一的管理指引。無論是否奈米物質存在，目前已有根據粉塵吸入及爆炸風險制定的作業環境限值。雖然國際上對於奈米物質是否會產生風險仍未有一致見解，但在科學見解明確之前仍有必需檢討適切的管理手段。本指引針對研究機關或製造場所現狀以及國外之事例進行調查，檢討並完成現今最適當之奈米科技管理手段，希望本指引對企業、大學、一般研究機關的奈米科技自主性管理有所助益。

##### 貳 奈米物質之風險評估、風險管理之流程與指引定位

奈米物質之研究、製造現場實施風險評估與管理之流程參考下圖。首先決定奈米物質之製造或加工，再參考有害物之資訊，評估在流程中何處有暴露之可能及暴露量。其次採取風險(有害性與暴露量之積)對策。最後判定研究室/作業場所之風險管理計畫，並加以實施。再依有害物資訊之更新、製造/加工流程變更/作業量之增加及作業環境結果，重新檢討對策與管理計畫。



以危害物資訊之更新、製造/加工製造之變更/作業量增加及作業環境測定結果，重新檢討對策及管理計畫

## 參 指引之前提

### 5.4.3.1 何謂「奈米物質」

「奈米粒子」之定義，一般在國際上均以「至少有一維度之長度在 100 nm 以下之微粒」稱之。此外，存在於自然界之奈米微粒或非故意產生之微粒則不包括在本指引內，而以研究開發或工業上所製造之微粒為對象。

### 5.4.3.2 奈米物質之危害性(Hazard)之可能性

風險(risk)為危害性與暴露量之積。雖然奈米粒子之危害性尚不確定，但暴露在奈米物質中，有可能會引起危害。此外，同一物質的奈米微粒，與粒徑大之粒子相比，其表面積極速增加，有人認為會增加危害性。因此，現今欲避免風險，必須極力採取可以減低奈米微粒侵入人體之對策。此外也應積極蒐集奈米物質相關危害性之資訊，更進一步自行試驗或委託試驗，就開發、製造、加工過程中之奈米物質之可能危害進行檢查，並列入管理對策之中。

### 5.4.3.3 與現行法令、規則、指引之關係

奈米粒子屬粉塵之一種，在作業現場如適用粉塵障害防止規則(粉塵則:昭和 54(1979)年 4 月 26 日勞動省令第 18 號)時，應依法實施管理。另在罹患塵肺之虞之粉塵作業。則有實施健康診斷之義務(塵肺法:昭和 35(1960)年；法律第 30 號第七條至第十一條)。除塵排氣裝置之過濾材之裝設與保養，應是切實管理(以粉塵則第十七條等規定之「局部排氣裝置之定期自主檢點指針」、「除塵裝置之定期自由檢點指針」)。對使用過之濾材，濕式集塵時之廢液處理，亦應遵守「廢棄物之處理及清掃相關法律(昭和 46(1971)年；法律第 137 號)」或地方自治體(地方政府)條例。平成 18(2006)修正施行之勞動安全衛生法(平成 17(2005)年；法律第 108 號)中規定事業者應依厚生勞動省之規定，對建築物、設備、原(材)料、氣體、蒸氣、粉塵等活動及其他業務引起的危險性或有害性加以調查，依調查結果。採取本法律或依本法律之命令規定採取措施外，應致力為防止勞動者之危險或健

康危害採取必要之措施(第二十八條之二第一項)。危險性或有害性之調查(在本指引稱「風險評估」)時機為建築物之設置、移轉、變更或解體時，採用新設備、原(材)料、或變更時，採用新作業方法或作業程序變更時及其他危險性或有害性等發生變化或有發生之虞時(參照勞動安全衛生規則第二十四條之十一)。在奈米微粒有發生危害之虞之作業場所中，根據風險評估結果實施必要管制措施時，本指引可作參考使用。

#### 5.4.3.4 奈米粒子之濃度測定與暴露可能性

風險評估之第一階段為暴露/發生源之測定(風險測定)，即需要實施確實之作業環境測定。首先電子顯微鏡採集粒子之樣本，由此可確認粒子之聚集狀態或形狀。奈米粒子之濃度無法使用原來的作業環境測定之，市面上已有儀器可以測定每個粒徑的奈米粒子。在分徑裝置有靜電分徑器(DMA)、擴散器組(DB)，它可與和粒子各數濃度測定裝置如凝結粒子計數器(CPC)/凝結核計數器(CNC)或法拉第杯電流計(FC)等組合，另有組合低壓衝擊器(LPI)與電流計之電子式低壓衝擊器(ELPI)或光散射計數器(OPC)等光學測定儀器。其中 DMA 與 CNC/CNC 或 FC 等組合之裝置被稱為掃描式電動度粒徑測定儀，可量測至數 nm 以上之奈米微粒且解析度高，其他儀器可測定之粒子之最小粒徑約在數十 nm 左右。

至於作業環境測定方法方面，已有 ISO TC146(大氣)/SC2(作業環境大氣測定法)，粒子測定裝置及方法有 ISO TC24(篩網、篩分、篩分法以外之粒徑測定方法)/SC4(篩分法之外之上述儀器粒徑測定方法)正在進行標準化中，將來可以參考。現在已開始使用上述儀器進行實驗室或製造現場奈米粒子之測定，在實驗室之模型(model)實驗中，於奈米粒子之取出、清掃之際，以檢出有濃度之上升，但尚無可攜式之測定儀器，也更少有此方面之測定專家。

#### 5.4.3.5 降低風險的對策與其有效性驗證問題

實行風險評估後，應依此採取降低風險的對策。通常在計劃階段時，應考慮選擇危險性小之原(奈米材)料。其次，在工學對策方面，首以密閉製造裝置或加工設備之密閉化、圍離、整體換氣、局部排氣。在管理對策方面，有作業者之物理、空間、時間性隔離，作業手冊之準備及教育訓練等，有必要時可使用個人防

護具之使用。在採取之對策之有效驗證方面，因奈米領域的測定尚有困難度，因此不易驗證。個人防護具尚未以奈米粒子執行檢定，但有關的認證研究進展很快。依危害性程度與暴露狀況應採取之對策方面，目前有所謂 Control Banding(分組控制)之方法可作參考，此方法由英國 HSE 創始，經由世界勞工組織 ILO 推展至全世界。所謂 Control Banding，意指對於某一危害性群組內之化學物質可適用單一控制技術，預期可達到該群組管理濃度範圍，如下表所示。(由 NIOSH Home page <http://www.dc.gov/niosh/topics/ctrbanding> 摘錄)，此方法並未決定危害性奈米微粒之容許濃度或管理濃度等。

Control Band No.	粒子暴露濃度之管理 範圍 mg/m <sup>3</sup>	工學對策
1	10~1	良好安全衛生工作法則 整體換氣
2	1~0.1	局部排氣或適用氣流管理
3	0.1~0.01	製程圍離 手套櫃
4	0.01 以下	專家之建言，以隔離方式實施奈米物質之嚴格暴露量管理

#### 肆 研究、製造現場之奈米科技之切管理手段之指引

##### 肆-1 奈米粒子之製造/加工製程之暴露對策

- (1) 奈米粒子之製造裝置，在基本上應予以完全密封，為達成密閉的目的，製造方法、原料輸入、製品回收均應採取連續製程為宜。
- (2) 在製品回收系統無法完全密閉時，在回收系統可使用氣罩、氣櫃、手套箱等。液相法為密閉之分批(batch)法，如最後產品為乾燥固體粒子時，則應依上述方法儘可能防止暴露。
- (3) 以懸浮液(suspension)方式處置奈米粒子之濕式方法，為有效之暴露預防方法。此時可防止加工時之分散、混煉時奈米粒子之飛散，然而液體之飛散或反應所引起存在暴露風險，故宜加注意。
- (4) 在非定時、保養時之作業必須為開放作業時，應充分留意奈米微粒之逸散。在此作業時，宜使用防護具。
- (5) 奈米粒子之搬運/保管，應使用不會造成暴露之容器及包裝。
- (6) 在奈米粒子之加工時，宜儘可能於密閉狀態下作業。加工時奈米粒子之包裝開封，微粒移至其他容器，與液體或其他粉體混合時，均有暴露之可能；若因作業條件至無法處於密閉狀態時，可使用局部排氣，此時也應儘可能將製程做有效圍離。

## 肆-2 實驗室/作業場所之管理上之暴露對策

### (1)將實驗室/作業場所與其他房間分隔

在實驗室/作業場所應禁止飲食。

進出實驗室/作業場所實應設更衣、洗手、洗眼之場所，如無法設置時，得在實驗室/作業場所內部做分隔。

### (2)必要時在實驗室/作業場所進行整體換氣

實施時，應維持適當之負壓。

排氣應設濾網、集塵器。

濾網之安裝與保養，應按照自主檢查方針作適切管理，對使用後的濾網及濕式除塵廢液之處置，應遵守法令或地方自治體(地方政府)條例等規定。

### (3)對每一配置在實驗室/作業場所之裝置及機器，應設置局部排氣系統。充分留意與整體換氣之關係，作好氣流管理。依裝置及機器的暴露程度，考慮氣體流動，將實驗室/作業場所作適當的配置與區分。因奈米粒子極為微小，質量也小，其運動與氣流相同，因此採用氣流管理的暴露對策最具效果。

### (4)應使用容易清潔的地面及牆面，尤其地面應容易水洗或可使用真空吸塵器。

### (5)實驗室/作業場所應定期實施作業環境測定

測定宜使用可涵蓋奈米領域之計測儀器，若奈米微粒易聚集，也可使用粉塵計作測定，測定時應涵蓋背景濃度，測定結果應與作業狀況一併記錄。

### (6)對可燃性粒子，應採取預防火災、粉塵爆炸之對策。可燃粒子在奈米化後更具危險性。使用可燃性氣體或溶劑時，應根據狀況使用具防爆規格的設備。若有必要時可將設備整體加以覆蓋，也是有效之對策。

## 肆-3 清潔、廢棄物管理

### (1)清潔時，應使用濕式擦拭或裝有 HEPA 濾網之真空清靜機清掃，不得使用空氣吹噴之方式做清潔。

### (2)製程廢棄物及集塵濾網、集塵廢液、清掃使用之抹布、濾網等，應做不會



引起二次污染之處理，並依法令進行廢棄處置。

#### 肆-4 防護具

實施肆-1~肆-2 之對策後暴露量之降低仍不足時，應檢討使用下列之防護具：

- 口罩:應與專家討論選擇適當口罩，(尤其注意配戴方法，且需實施教育訓練)
- 防護眼鏡:應使用具有氣密性者。
- 手套:應使用非浸透性者。
- 作業服:應使用非浸透性者。
- 鞋:可包覆全部足部者。
- 帽子:可覆蓋全部頭部者。

目前尚無充分之研究報告顯示防護具對奈米粒子的防護效果。但無論是否使用防護具，均不得露出皮膚傷口及皮膚病的部位。防護具使用後，不得攜出實驗室/作業場所，應注意防護具之清潔。

#### 肆-5 管理手冊之製作、教育與遵守

製作實驗/作業程序之手冊，充分對實驗者、作業者施以教育，並使其遵守。充分告知實驗者、作業者奈米物質之有害性之資訊，及作業環境測定結果等。

#### 肆-6 衛生上應注意之事項

##### (1)應急處置

- 侵入眼睛時：以水充分洗淨。
- 吸入時：漱口，洗淨口腔，將人員移往有清淨空氣的地方。
- 飲入時：儘可能使其吐出，再漱口、洗淨口腔。
- 附著於皮膚時:使用肥皂清潔或以清潔霜擦拭。

(2)健康管理：宜實施定期健康檢查。有一部分奈米粒子在未在法律上作規定，故應實施自主性檢查。依職業醫生之指示選擇檢查項目，連續實施並保持紀錄。

#### 伍 指引適用的項目

下表顯示上述的指引項目肆-1~肆-6 對應於不同控制分組時的奈米微粒控制策略。

	4.指引的項目						
Control band	肆-1(1)·(2)·(3)·(5)·(6)製程對策 (製造、搬運、保管、使用時)	肆-1(4)維護/非定期作業	肆 2(1)·(4) 實驗室 / 作業場所的區分	肆 2(2)·(3)氣流管理	肆-2(5)作業環境測定	肆-2(6)火災、爆炸對策	肆-3 清潔/廢棄物管理 肆-5 管理規則 肆-6 衛生上的注意
1	局部排氣	局部排氣	○	全體換氣	○	○	○
2	局部排氣	局部排氣 防護具	○	局部排氣	○	○	○
3	圍離	局部排氣 防護具	○	局部排氣	○	○	○
4	密閉製造	專家的建議	○	專家的建議	○	○	○

## 第五節 英國化學品分組控制評估模式-健康危害物質要件 [148]

如同大部分的化學物質一樣，奈米微粒並未有職業暴露控制限值(OELs, occupational exposure limit)，因此雇主及作業人員針對奈米微粒之暴露濃度要控制到什麼程度，並未有適當的指引。控制分組方法為工作場所化學物質暴露評估及風險管理的定性方法，其主要之作法是根據化學品的物理、化學及毒性，暴露的潛勢(如使用量、揮發性及揚塵性)，將化學物質作 5 個分組(band A-E)，並針對每個分組作控制之建議，以期達到一個目標的暴露濃度範圍(target exposure concentration)。

發展最完整的化學品分組控制評估模式由 UK HSE(Health and Safety Executive, 安全與衛生執行委員會)所完成，並由國際勞工組織推廣至全世界，此模式稱為健康危害物質要件(COSHH Essentials, Control of Substance Hazardous to Health)，其設計的目的在於協助中小企業依 COSHH 法令執行化學品及其混合物之風險評估。

以 OELs 作為化學物質的管制規範十分困難，無法應付數目十分龐大、且日益增加的化學品。以美國為例，2003 年美國化學學會(ACS, American Chemical Society)的化學摘要服務(CAS, Chemical Abstracts Service)登錄有 17,688,891 有機務和無機物質及 12,072,228 生物序列，在 CAS 線上化學目錄檔內則含有 1,323,227 個商業化及化學品，但在 CAS 管制化學品清單資料庫內只有 224,784 種物質，且在 ACGIH 列出的 TLV(threshold limit value)只有 642 個化學物質，可見利用研究訂出 OELs 值作為工作場所暴露濃度之定量規範，並無法應付大量化學物質之管制需求。奈米物質之產品至 2007 年 10 月止的統計已達 580 項，若欲針對每種奈米微粒訂出 OELs 再加以規範，也是一件十分不容易的事。因此利用控制分組之方法對一般化學物質及奈米微粒進行控制，為美國 NIOSH(2008)正在研究之方向。

EU 的危險物質指令(67/548/EEC)將危險物質分類成不同的 Risk phrases(風險警示號碼，簡稱 R-phrases)，共有 R1~R68 等 68 個分類，其根據為物質之爆炸、可燃性、呼吸毒性、水體毒性等，其中與控制分組相關者有 R20~R28, R34~R48, R60~R63，如表 59 所示：

表 59 R-phrases 與危害特徵 [149]

*R-phrases: indication of particular hazards*

R20 Harmful by inhalation	R39 Danger of very serious irreversible effects
R21 Harmful in contact with skin	R40 Possible risk of irreversible effects
R22 Harmful if swallowed	R41 Risk of serious damage to eyes
R23 Toxic by inhalation	R42 May cause sensitisation by inhalation
R24 Toxic in contact with skin	R43 May cause sensitisation by skin contact
R25 Toxic if swallowed	R45 May cause cancer
R26 Very toxic by inhalation	R46 May cause heritable genetic damage
R27 Very toxic in contact with skin	R48 Danger of serious damage to health by prolonged exposure
R28 Very toxic if swallowed	R49 May cause cancer by inhalation
R34 Causes burns	R60 May impair fertility
R35 Causes severe burns	R61 May cause harm to the unborn child
R36 Irritating to the eyes	R62 Possible risk of impaired fertility
R37 Irritating to the respiratory system	R63 Possible risk of harm to the unborn child
R38 Irritating to the skin	

COSHH Essentials 的觀念認為雖然有很多化學品在市面流通，但是只有少數幾個層次的風險管理或控制分組，可以用於控制作業場所之化學品之暴露控制，因此 HSE 設計了一個簡易的線上風險管理系統 COSHH Essentials，供業者使用（參考網站 [www.coshh-essentials.org.uk](http://www.coshh-essentials.org.uk)）。COSHH Essentials 之核心模式之考量因子如表 60 所示。

表 60 COSHH essentials 核心模式之考量因子[14]

Health hazard	+ Exposure potential	→ Generic risk assessment	→ Control approach
Substances allocated to a hazard band using R-phrases	Substances allocated to a dustiness or volatility band and a band for the scale of use	Combination of health hazard and exposure potential factors determine desired level of control	Type of approach needed to achieve adequate control

COSHH Essentials 線上風險管理系統首先依據 R-phrases 將物質列入某一風險分組(hazard band)，再依物質揚塵特性及使用量、使用頻率，選擇需要一個控制層級，及建議一個適當控制方法。表 61 列出風險分組，目標暴露濃度與 R-phrases 之間之關係，若業者按照建議的控制方法確實執行污染物的控制，則預期可以將污染物的濃度降至表 61 所列的目標濃度。

表 61 R-phrases 與危害分組的關係 [149]

Hazard band	Target airborne concentration range (Note 1)	R-phrases
A	>1–10 mg/m <sup>3</sup> dust; >50–500 ppm vapor	R36, R38, all dusts and vapors not allocated to another band (Note 2)
B	>0.1–1 mg/m <sup>3</sup> dust; >5–50 ppm vapor	R20/21/22, R40/20/21/22
C	>0.01–0.1 mg/m <sup>3</sup> dust; >0.5–5 ppm vapor	R48/20/21/22, R23/24/25, R34, R35, R37, R39/23/24/25, R41, R43
D	<0.01 mg/m <sup>3</sup> dust; <0.5 ppm vapor	R48/23/24/25, R26/27/28, R39/26/27/28, R40 Carc. Cat. 3, R60, R61, R62, R63
E	See specialist advice	R40 Muta. Cat. 3, R42, R45, R46, R49
S: skin and eye contact	Prevention or reduction of skin and/or eye exposure	R34, R35, R36, R38, R41, R43, Sk (Note 3)

\*Abbreviations: ppm=parts per million; R-phrases=Risk Phrases; mg/m<sup>3</sup>=milligrams per cubic meter.

對液態物質而言，操作溫度及蒸氣壓、使用頻率及使用量會影響暴露潛勢，使用量分成少量(毫升)、中量(公升)及大量(立方米)。對於粉體物質而言，揚塵特性、使用量及使用頻率會影響暴露潛勢，分成低度揚塵(如丸狀物)、中度揚塵(如晶體化粉體)及高度揚塵(如極細粉塵，如奈米粉體)，使用量分成少量(克)、中量(公斤)及大量(噸)。

控制方法分成四大類(如表 62)，依層級順序分為一般通風(控制方法 1)、工程控制(控制方法 2)、圍離(控制方法 3)及尋求專家之建議(控制方法 4)，層級越高，控制越嚴，這些方法均為作業場所常用的工程控制方法，當化學物質及毒性愈強，暴露潛勢愈高，則建議的控制方法層級愈高，預期可以達到的污染物目標濃度愈低，如圖 86 所示。

表 62 四個控制分組 [149]

<b>Control Approach 1—General ventilation.</b> Good standard of general ventilation and good working practices.
<b>Control Approach 2—Engineering control.</b> Ranging from local exhaust ventilation to ventilated partial enclosure.
<b>Control Approach 3—Containment.</b> Containment or enclosure, allowing for limited, small scale breaches of containments.
<b>Control Approach 4—Special.</b> Seek expert advice.

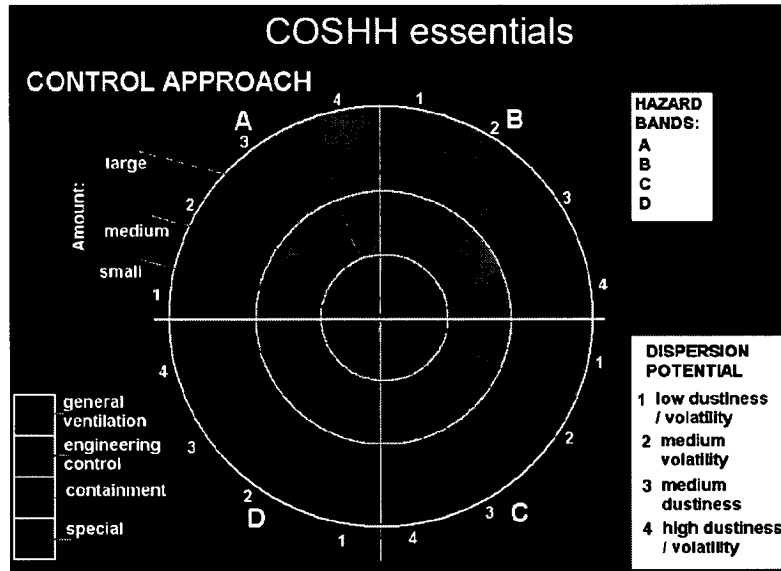


圖 155 COSHH essentials 的控制方法与風險分級、污染物特性及使用量之關係

[141]

[14]針對控制分組方法提出了文獻回顧及分析報告，供大眾評論，主要結論為

- (1)控制分組可當成職業風險管理之入門管理工具或複雜控制及評估方法的輔助工具，在一些特殊場合需要有準確的暴露數據以保障工人之健康時，則需要進行較複雜的控制及評估方法。
- (2)控制分組方法是 UK HSE 爲了在 COSHH 法令下協助中小企業執行化學品評估之方法，在美國(和我國)並未要求企業對化學品執行風險評估，但是對於業者而言，控制分組之精神—有數千種化學物質但只有幾個層次之控制方法—仍相當有價值，因此可以將 COSHH Essentials 視為完整的風險管理計畫(含個人防護、訓練及健檢)之補充工具。
- (3)控制分組方法需要以暴露評估決定其控制有效性，控制分組方法用於執行風險評估及選擇適當控制方法，但不能完全取代傳統之暴露監測及 OELs。應用控制分組模式於美國時需提升此模式之認知及標準化，驗證控制有效性，擴展控制分組模式於其他安全衛生問題(如經皮吸收、人因工程等)，發展、應用及研究控制分組方法，及國內及國際之合作及協議。

## 第六節 各國奈米微粒作業控制策略指引的比較

	英國	美國	日本
可讀性	可讀性高	條文太密，不易了解	簡單易懂
可行性	著重實務面，可行性尚可	著重管理面及現有的法規，不太容易執行	適合本國的國情，容易執行
奈米物質之定義	工程奈米物質的分類清楚	較不清楚	對於尺寸的定義，奈米物質的對象描述較明確
名詞解釋	無	有	無
奈米微粒之暴露及風險	目前對奈米微粒吸入、食入或消化對健康之風險的研究甚少。	暴露路徑有吸入、食入和皮膚接觸三種，其中以吸入之暴露路徑最有可能	奈米粒子之危害性尚不確定，但暴露後可能會引起健康危害
奈米微粒之風險管理方法	收集奈米微粒的相關資料，經評估風險後再決定控制措施，同時實施健康檢查，檢討成效且妥善處置奈米物質	未提及	評估奈米物質之製造或加工流程中，何處有暴露之可能及暴露量，其次採取風險對策判定作業場所風險管理計畫、並加以運作
建議濃度限值	四種奈米物質的分類各建議了目標濃度值	不確定。建議控制至最低合理可行之濃度	未提及
暴露控制	消去、取代、圍	工程控制(污染圍)	選擇危險性小的

	籬、工程控制、程序控制及個人防護具	籬、整體換氣及局部換氣)與行政控制(工作法則及操作程序減少 UNP 之暴露濃度)	物質，其次以密閉製造裝置或加工設備之密閉化、包圍、整體換氣須稀釋或局部換氣
通風系統之過濾	未提及	HEPA	HEPA
真空吸塵器的要求	未提及	HEPA	高效能
防塵口罩	P3 或 FFP3	依奈米物質特性選定	效率>99.9%
意外溢出及釋放	應提供奈米物質在溢出及釋放的預防及處理程序，並予以文件化	應建立 UNP 逸散時的緊急應變計畫，盡速將 UNP 清理乾淨	未提及
奈米廢棄物處置方法	可依有機和無機廢棄物處理程序處理，另外也可依危害特性來分類處理	未提及	製程廢棄物及集塵濾網、廢液應做不會因起二次污染之處理，並依法令進行廢棄處置
火災及爆炸預防	製造過程控制氣壓，儲存過程使用二氧化碳、氮氣或其他氣體	未提及	使用防爆規格之設備，整體設備加以覆蓋



## 第七節 本國奈米物質作業環境控制策略指引草案

本研究將收集到的英國、日本及美國的對奈米物質作業環境控制指引加以詳細閱讀、重點整理並比較其優劣點，並據以撰寫出本國奈米物質作業控制策略指引草案。此草案共分成九節，含奈米物質之範圍，人造奈米物質之種類及特性，風險評估，暴露評估方法，暴露控制方法，意外溢出及釋放、奈米廢棄物處置方法，火災及爆炸預防，健康檢查，茲分述如下：

### 壹 奈米物質之範圍

奈米物質指物質至少有一維的長度在 100 nm 以下時稱之[140]，涵蓋奈米微粒、奈米纖維、奈米粉體、奈米碳管和奈米線等[11]。一般所稱的奈米微粒亦指超細微粒(*ultrafine particle*)，其直徑在 100 nm 以下，但本指引不包括存在於自然界之奈米微粒或非故意產生之奈米微粒。本指引提供奈米物質之安全處理及處置的控制策略，以奈米物質之製造及處理(含修理、預防保養，及研究製造場合)有關的作業人員(含管理人員) 為對象[139]。

### 貳 人造奈米物質之種類及特性[11]

奈米物質可存在於多種形式，如粉體或懸浮物、聚集成較大的粒子，或分散於物質中。常見的奈米物質有富勒烯、奈米碳管、奈米線、量子點及金屬、氧化物等其他人造奈米物質(如銀微粒，氧化鋅，碳黑，二氧化矽等)。富勒烯結構類似於石墨，可以形成三維的結構，性質穩定且不溶於水，可應用在藥物傳輸、塗佈、氫氣儲存等。奈米碳管會形成直徑為 nm 之管狀結構，它有很強的張力、很大的表面積及很強的分子吸附能力，可應用在塗佈、電子學、水的純化等。奈米線為導電或半導體之奈米微粒組成，有很大的長寬比，可應用在連接器、感應器等。量子點為很小的半導體物質，通常含 1000 至 100000 個原子，可應用在催化、醫學射影、光學裝置等。其他的人造奈米物質有多種形式，也可能為圓形，聚集態(*agglomerate*)或聚合態(*aggregate*)，包含碳黑、二氧化矽、金屬氧化物、半導體與有機物之奈米物質，用於塗敷、顏料、觸媒、個人防護產品、化妝品及複合材料。

### 參 風險評估

在沒有明確的濃度限值(TLVs, threshold limit values)之前,最謹慎的做法是將奈米微粒暴露濃度控制至合理可行的最低程度。在此過渡時期,可參考本國勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準,作為奈米微粒暴露控制之參考,如碳黑的容許濃度為  $3.5 \text{ mg/m}^3$ , 氧化鋅煙塵的容許濃度為  $5 \text{ mg/m}^3$ , 及 NIOSH 建議的奈米二氧化鈦微粒暴露限值  $0.1 \text{ mg/m}^3$  (ASTM, 2008)。另外英國建議的以下四種危害性奈米微粒的標竿暴露值亦值得參考:

- (1) 纖維的奈米物質: 建議纖維奈米物質的標竿暴露限值為  $0.01 \text{ 纖維數/cm}^3$ , 此濃度以掃描式或穿隧式電子顯微鏡決定之。
- (2) 致癌、致突變、致氣喘、生育毒素的奈米物質: 建議  $0.1 \times$  物質的 TLV 為標竿暴露限值。
- (3) 非可溶性奈米物質: 建議標竿暴露限值為  $0.066 \times$  物質的 TLV。
- (4) 可溶性奈米物質: 建議標竿暴露限值為  $0.5 \times$  物質的 TLV。

#### 肆 暴露評估方法 [11]

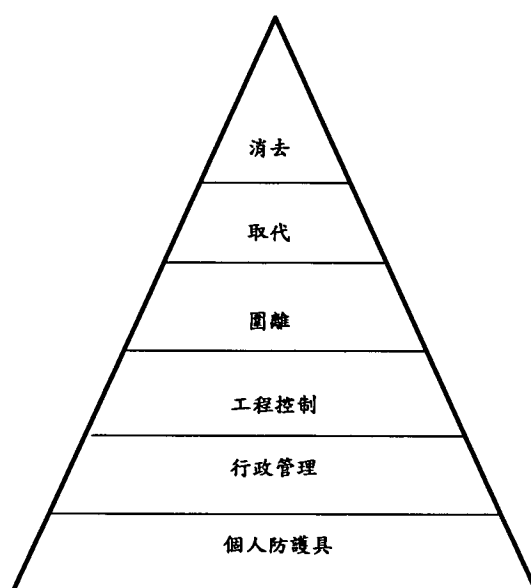
目前可以使用的儀器含數目、質量和表面積的直接測量儀器。在數目方面有凝結微粒計數器(CPC, condensation particle counter), 掃描式電動性粒徑分析儀(SMPS, scanning mobility particle size), 電子顯微鏡(SEM, TEM); 在質量方面有固定點分徑採樣器(大都為多階衝擊器可採集奈米微粒, 尚無個人的奈米微粒採樣器)、錐狀元件振盪天平(TEOM, Taper element oscillating microbalance)及貝他計(beta gauge)等; 在表面積方面有擴散充電器(diffusion charger)作成的表面積分析儀, 靜電低壓衝擊器(ELPI, electrical low pressure impactor)及電子顯微鏡等。以上 SMPS 及 ELPI 得到的數據可藉由微粒密度及形貌資料間接轉換成不同量度單位的奈米微粒濃度。

暴露評估的採樣策略方面, 第一步驟為污染源的辨識, 可以利用手提式 CPC 為之, 但須先量測背景之奈米微粒濃度, 再比較奈米微粒生產或處理時的微粒濃度, 才能測出人造奈米微粒的污染來源。對於特別的奈米微粒物種, 如  $\text{TiO}_2$ , 則須以濾紙採樣方式再以 TEM 決定微粒是否存在及分析微粒之粒徑分布。當污染源決定之後, 再以表面積分析儀決定粒徑的表面積, 及利用 SMPS 或 ELPI 量測微粒的粒徑分布。目前有個人配戴型的表面積分析儀可以使用。最後可使用個

人的可呼吸性旋風式或衝擊式粉塵採樣器採集微粒，以便於化學分析，或用電子顯微鏡辨識及量測奈米微粒的粒徑分布。以上這些多面向的方法可以決定工作場所奈米微之暴露特性及濃度，但是由於這些方法以固定點採樣為主，與個人的實際暴露量之間會有差異。

## 伍 暴露控制

本指引建議的控制優先順序如下圖所示，可應用於吸入和皮膚接觸暴露控制的選擇，選擇暴露控制技術時以圖中金字塔的最上端最為優先，逐次往下作控制。



- (1) 消除：避免使用有害的物質或會造成暴露的製程。假若奈米物質是因為它的特殊特性而被採用，則這個選項很難被達成。然而，應當考慮若使用奈米物質以改善物質的性質時是否會造成增加風險的機會[11]。
- (2) 取代：將原來的奈米物質或製程改成較低風險的替代物或製程。雖然可能無法取代該物質，但可使用一些方法來降低暴露的可能性。例如：使用固體或液體來結合奈米物質，如果技術可行的話應該使用懸浮液、糊狀或丸狀的形式來取代粉末狀的奈米物質[11]。
- (3) 圍離：所有會釋放奈米物質至在空氣中的的操作過程應該在密閉的設備內進行，或人員應該與製程隔離(例如：在小隔間內)，這包括產生氣相奈米物質與噴霧乾燥製程。其他利用乾式奈米物質的製程應該儘可能的被圍離[11]

(4) 工程控制：[139]

製造設備方面：

原則上奈米物質製造設備應密閉，但是若有困難時應設置局部排氣系統，排出屋外的排氣口應加裝高性能的過濾器，且局部排氣設施應定期維修保養。

奈米物質的其他處理作業方面：

奈米原物質之接收、原物質及製品的秤重、製造加工設備的投料、製造加工設備產品的回收、容器的移出更換、製造加工設備的清潔、點檢、維修或容器清洗等作業的作業人員，用以下的方法預防暴露：

(i)以密閉化、無人化、自動化之方法，使作業人員不會暴露於奈米物質，有困難時應設置局部排氣系統，且排出屋外的排氣口應加裝高性能的過濾器。

(ii)局部排氣設施裝設後應定期維護保養。

(iii)直接處理奈米物質之作業人員應穿戴適當的防護具及作業衣服。

(5) 行政管理：[140]

(i)奈米物質處理有關的作業應研擬計畫，免於作業人員暴露於奈米物質。

(ii)作業場所之地面及作業台面的清掃須避免奈米物質之擴散，應使用高性能的真空吸塵器或以濕布擦拭，使用過後的抹布及濾材應妥善的處置。

(iii) 應對作業人員施以奈米物質的物理化學特性及暴露預防的教育訓練。

(iv)奈米物質的製造加工場所或處理場所應與其他場所隔離，二者間應設置除汗區，勿使附著奈米物質污染至其他場所。

(v)應限制與奈米物質的製造加工或處理作業無關的人員進入奈米物質的作業場所。

(6)防護具方面：[139]

(i)使用適當的呼吸防護具防止奈米物質的吸入，需準備足夠的呼吸防護具並保持清潔有效。防塵口罩視粉塵的特性而選擇 N95、N99 或同等級的產品。

(ii)使用適當材質的手套避免奈米物質在皮膚附著。手套應保持清潔有效，使用後即丟棄，但需裝入袋中妥善的處置。

(iii)使用護目鏡，需備妥足夠的數目並保持清潔有效。

(iv)為防止來自作業衣上面的奈米物質暴露，需使用奈米物質專用的防護衣，

一般此防護衣以不織布製成，須保持其清潔有效，且附著奈米物質之防護衣不得攜出作業場所之外。

#### 陸 意外溢出及釋放 [11]

因為奈米物質有意外溢出及釋放之可能性，因此，雇主應提供奈米物質的緊急處理程序，並予以文件化，確實完成此意外事件的風險評估，並在意外溢出時採取適當的行動方案。意外逸散的奈米粉體清除時，應防止人員的暴露使暴露量降至最低。緊急應變的人員需受過完整的訓練，並配戴適當的個人防護具。意外溢出獲釋放時，負責人員應劃出溢散污染範圍，避免無關人員進出污染區域，且使用適當方法如清潔腳踏墊，避免將粉體帶出污染區域。清理污染粉體時，應使用濕式擦拭法或高效率的真空吸塵器，不要使用乾式的清掃或吹除方法。對於人員的疏散也要有相關計畫，當情況嚴重時應通知環保單位機關並請求外部支援。緊急應變時清除之粉體、吸收墊、濾材及抹布等應妥善處理。

#### 柒 奈米廢棄物處置方法 [11]

奈米物質的廢棄物應視為有害事業廢棄物，其儲存及處置應有完整的計畫書，且須考慮物質的有害性及數量，並應符合環保法令。含有奈米物質之廢棄物種類有純奈米物質，含有奈米物質的容器、個人防護具，含奈米物質的液體懸浮物及附著奈米物質且易碎的固體介質。用來製造或處理奈米物質的裝置在丟棄或再利用前須先除污，除污所用的抹布、濾材、個人防護具或實驗用的材料均視為奈米廢棄物。含有奈米物質之液體廢棄物不能直接排入水溝中或當一般廢棄物處理。奈米廢棄物在處置前，應先妥善的放入廢棄物容器中儲存，避免溢散，並在容器外清楚標示廢棄物種類及有害特性。塑膠袋或可封口的容器可用於收集紙、拭布、個人防護具及其他微量污染之物件，裝滿時應再利用另一個塑膠袋再包裝一次，封口後並清楚標示。

## 捌 火災及爆炸預防

奈米金屬粉體之最小點火點能量均小於 1mJ，在小於 20%低濕度下，人體的許多活動均遠超過此能量，容易引起火災；奈米粉體在研磨時或傳輸過程中也十分容易產生火災爆炸的危險。增加空氣中的溼度，降低靜電之產生及清除靜電均為防止火災爆炸之方法。奈米粉體易產生聚集現象，其爆炸特性與微米粉體類似；奈米粉體之表面積濃度愈大及粒徑愈小時，燃燒的初始溫度也愈低，亦即危險性會愈高。奈米粉體達最低爆炸濃度時，易點火產生爆炸，因此，監控空氣中奈米微粒的濃度，以避免濃度過高產生爆炸風險十分重要。奈米微粒較易分散成懸浮微粒，在空氣中停留時間較久，因此電器設施之設計需考慮防塵措施。為減少火災與爆炸風險，應在製造及儲存過程使用控制的氣體環境，如使用二氧化碳、氮氣或其他惰性氣體等[11]。在奈米物質的處理場所，應使用抗靜電的鞋子以防止靜電的累積。滅火器時應考慮奈米物質與水的相容性，有些金屬粉體與水會發生反應產生氫氣易引起火災，此時需使用乾粉滅火器。

## 玖 健康檢查 [11]

在工作場所的奈米微粒暴露是否會造成疾病或對健康產生危害尚無定論，但仍應收集作業場所的奈米物質之使用量及相關的資訊並建立檔案，以利於日後建立作業人員的奈米微粒暴露資料，及用於解釋將來可能出現之健康危害。

## 第六章 結論與建議

### 第一節 結論

1. 完成收集奈米微粒作業環境控制技術相關文獻，並且整理各國相關建議策略及指引。結論如下：(1) 世界各國已陸續發表了奈米物質作業環境控制指引，但本國目前只有粉塵危害預防標準及勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準，並無法適用於所有的奈米物質，因此有必要訂定本國的奈米物質作業控制策略指引供業者參考。(2) 本研究收集及整理英國、日本及美國的奈米物質作業環境控制指引，發現各國的指引差異並不太，且均採取謹慎的態度，希望能將作業場所的奈米物質濃度降至最低合理可行的濃度。本報告已完成本國的奈米物質作業控制策略指引草案供專家學者討論。
2. 完成奈米微粒工程控制、監測技術、呼呼防護、揚塵測試等文獻整理及評估工作，並已完成相關的報告。
3. 完成不同奈米粉體揚塵的測試實驗。結論如下：(1) 粉體逸散實驗中所使用的六種粉末中，奈米級二氧化矽粉體是裡面分散性最不好的粉體，次微米級二氧化鈦粉體是微粒濃度最高的粉體，奈米氧化鋅粉體則為 FMPS 與 SMPS 之 NMD 差異最大的粉體。(2) 同一種粉末以三種實驗方式分散後，比較三種方法的經過儀器量測後得到的 NMD 和 NMAD 資料，可以發現微小粉末分散器得到的 NMD 和 NMAD 都是三者中最小的，這表示微小粉末分散器分散粉體的能力比另外兩種儀器要高。(3) 粉體材料的物理特性，如形狀、導電度、密度等等，皆需要做進一步的探討，因為這些因素可能會對微粒粒徑偵測儀器(如 SMPS、FMPS 和 APS 等)判斷分散後的粉末微粒粒徑造成影響。
4. 完成二氧化鈦粉體廠中奈米微粒之測量工作。結論如下：(1) 堆高機在粉體包裝區運作時會排放碳煙而造成廠內奈米微粒數目濃度上升。(2) 風扇的放置位置會影響採樣的微粒重量濃度結果。(3) 分析採樣的奈米微粒後發現奈米微粒中只有極少量 Ti 元素的存在及利用電子顯微鏡觀察二氧化鈦微粒的外貌，進而可推斷由工廠產生的二氧化鈦微粒不屬於超細微粒。(4) 奈米  $\text{TiO}_2$  的質量濃度幾乎為零，可呼吸性  $\text{TiO}_2$  的質量濃度也遠低於 NIOSH REL 值。
5. 完成衛浴設備製造廠及奈米碳管製造廠中奈米微粒之測量工作。結論如下：  
(1) 衛浴設備製造廠微粒濃度採樣的結果可以得知在軌道燒成窯燒成區旁的

奈米微粒數目濃度很高，主因為高溫作業會導致殘留在衛浴設備表面上的釉料或化學溶液因高溫蒸發後核凝產生奈米微粒，由於奈米微粒的粒徑小導致所採集到的重量濃度很低。(2) 在奈米碳管製造廠的微粒濃度量測結果顯示奈米碳管分裝時的微粒濃度與通風櫃內的背景濃度很接近，所以分裝奈米碳管時產生的微粒逸散很少。

6. 完成工業級高效率真空 HEPA 吸塵器對奈米粉體的過濾效率實驗系統設計及架設，並以多徑的奈米食鹽微粒(NMD=30、60、100 nm)作測試。實驗結果如下：(1) 國外的 HEPA filter 壓差較國內的 HEPA filter 壓差高。(2) NMD = 30、60、100 nm 的多徑食鹽奈米微粒導入 Nilfisk, Type HEPA-13 之效率測試，結果為不論顆粒的大小，其去除效率皆在 99%以上。(3) 亞拓電器公司的 V03063P HEPA filter 以 NMD = 60 nm 多徑食鹽奈米微粒作為導入之效率測試微粒去除效率則不盡理想，約在 20%~60% 之間，與其標榜可去除空氣濾材穿透的最大穿透顆粒粒徑 300 nm 以上之微粒不符，當流量小時才有去除效率上升的趨勢。

## 第二節 建議

1. 建議於作業場所(含實驗室)研究奈米物質的逸散濃度，不同的量測儀器及量測方法，通風控制及過濾效率，奈米粉體的揚塵特性及粒徑分佈，局部排氣過濾方法，現場奈米微粒毒性測試方法開發，火災爆炸特性及預防方法等，以作為將來訂定及修正本國的奈米物質作業控制策略指引的依據。
2. 長期而言，可考慮發展較為實務、可電腦化、且適用於中小企業的奈米物質控制分組方法。
3. 因願意配合現場微粒採樣的工廠及實驗室很少，故在現場微粒採樣的執行上相當不易，將來可尋找願意配合的實驗室或研究單位，期能更準確地評估工作場所的微粒暴露濃度。
4. SSPD 使用的粉體量比旋轉腔體試驗機法及漩渦震盪器法要少很多，故可以試著去計算 SSPD 的揚塵指數，發展出新的揚塵指數實驗方法。
5. 除了本研究中所測試的粉體外，之後亦可使用奈米碳管等目前常被使用的奈米材料粉體進行此試驗，以增加對照比較的對象。



6. 國內生產之工業用真空吸塵器所使用之 HEPA filter 的產品標示不清，建議應明確標示過濾效率測試結果以供參考，且須大幅提高過濾效率，由於馬達碳刷的磨損會造成微粒之產生，國內工業用真空吸塵器之 HEPA filter 皆裝設於馬達之前會造成奈米微粒排放，因此將來應研發有效的 HEPA filter 且裝在馬達之後，避免產生奈米微粒的污染。

## 參考文獻

- [1] PEN, The Project on Nanotechnologies, <http://www.nanotechproject.org/inventories/>
- [2] ICON (International Council on Nanotechnology), (2006), "A Review of Current Practices in the Nanotechnology Industry.", International Council on Nanotechnology.
- [3] NSET Subcommittee, (2004), The National Nanotechnology Initiative Strategic Plan, Nanoscale Science, Engineering and Technology. Committee on Technology Subcommittee, National Science and Technology Council.
- [4] NIOSH, (2006), Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH.
- [5] NIOSH, (2007), Progress toward Safe Nanotechnology in the Workplace: A Report from the NIOSH Nanotechnology Research Center.
- [6] NIOSH, (2005), NIOSH Current Intelligence Bulletin: Evaluation of Health Hazard and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide (draft).
- [7] Castranova V, (2008), "The nanotoxicology research program in NIOSH", *J. Nanoparticle Res.*, (submitted).
- [8] 勞工安全衛生研究所，2006，奈米科技應用的可能潛在危害之探討，IOSH94-H317。
- [9] 勞工安全衛生研究所，2007，奈米微粒職業場所安全衛生狀況調查，IOSH95-H318。
- [10] ASTM, (2008), standard E 2535-07, Standard guide for handling unbound engineered nanoscale particles in occupational settings.
- [11] BSI, (2007a), Nanotechnologies-Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials, published document, PD6699-2.
- [12] 日本奈米科技管理技巧調查檢討委員會，2007，研究、製造現場奈米科技之確切管理手冊之指引，奈米粒子之勞動安全衛生研討會資料。
- [13] Murashov V, (2007), ISO/TC 229 Nanotechnologies-Standardization Needs Survey, Public Meeting on Research Needs Related to the Environmental, Health, and Safety Aspects of Engineered Nanoscale Materials, Arlington, VA.
- [14] NIOSH, (2008), "Qualitative risk characterization and management of occupational hazards (Control banding)—Literature Review and Critical Analysis."
- [15] Luther W, (2004), "Technological Analysis. Industrial application of nanomaterial-chances and risks.", VDI-Technologizentrum.
- [16] Brown S, (2007), "Best practices for working with engineered nanomaterials, tutorial course note.", 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei, Taiwan.
- [17] 勞工安全衛生研究所，1996，氣膠原理與應用。
- [18] Flynn MR and Ellenbecker MJ, (1986), "Capture efficiency of flanged circular local exhaust hoods.", *Ann. Occup. Hyg.*, 30: 497-513.
- [19] 陳友剛、葉文裕、陳春萬，1997。原型開口凸緣氣罩控制風速的理論探討。勞工安全衛生研究所季刊，第5卷第4期，第29-44頁。
- [20] 黃榮芳、陳友剛，2005。崗亭式氣罩最佳化設計研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告，IOSH 94-H101。
- [21] Seinfeld JA and Pandis SN, (1998), "Atmospheric Chemistry and Physics" New York: John Wiley & Son.

- [22] Hinds WC, (1999), "Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles", New York: John Wiley & Sons.
- [23] Lu BH, Huang SH, Chen CW, Chang CP, (2007), "Capture efficiency of local exhaust hoods for nanoparticles", Abstract, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei, Taiwan.
- [24] Maynard AD and Kuempel ED, (2005), "Airborne nanostructured particles and occupational health" *J.Nanoparticle Res.*, 7: 587-614.
- [25] Lee MH, McClellan W, Candela J, Andrews D, Biswas P, (2007), "Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace", *J.Nanoparticle Res.*, 9: 127-136.
- [26] Ellenbecker MJ, (2007), "Interim best practices for working with nanoparticles.", Center for High-rate Nanomanufacturing, University of Massachusetts Lowell
- [27] Department of Energy (DOE) Nanoscale Science Research Centers, Approach to Nanomaterial ES&H, Revision2, June 2007, [http://www.sc.doe.gov/bes/DOE\\_NSRC\\_Approach\\_to\\_Nanomaterial\\_ESH.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/DOE_NSRC_Approach_to_Nanomaterial_ESH.pdf)
- [28] BSI, (1994), "Laboratory fume cupboards. Part 4. Method for determination of the containment value of a laboratory fume cupboard.", (BS 7258:Part 4: 1994). BSI, London
- [29] European Committee for Standardization (CEN), (2003), Fume upboards-Part 3: Type test methods (prEN 14175-3). CEN, Brussels.
- [30] American National Standards Institute (ANSI) and American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), (1995), Method of testing performance of laboratory fume hoods (ANSI/ASHRAE Standard 110-1995). Atlanta, GA: ASHRAE.
- [31] ANSI, (2003), American National Standards Institute, Inc., Occupational and Educational Personal Eye and Face Protection Devices. ANSI Z87.1.
- [32] Kim T and Flynn MR, (1991a), "Air Flow Patterns Around a Worker in a Uniform Freestream.", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 52: 287-296.
- [33] Kim, T. and M.R. Flynn, (1991b), "Modeling a Worker's Exposure from a Hand-held Source in a Uniform Freestream.", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 52: 458-463.
- [34] Kim TH and Flynn MR, (1992), "The effect of contaminant source momentum on a worker's breathing zone concentration in a uniform freestream." *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 53: 757-766.
- [35] Flynn MR, Ljungqvist B ,(1995), "A review of wake effects on worker exposure.", *Ann Occup Hyg.*, 39:211-221.
- [36] Tseng LC, Huang RF, Chen CC and Chang CP, (2007), "Aerodynamics and performance verifications of test methods for laboratory fume cupboards." *Ann. Occup. Hyg.*, 51: 173-187.
- [37] Pathanjali C and Rahman MM, (1996), "Study of flow patterns in fume hood enclosures.", Proceedings of the 31st intersociety energy conversion engineering conference.
- [38] 陳友剛、黃榮芳、葉文裕、陳春萬，2006。開放液面槽吹吸式氣罩的流場與逸散關係探討。勞工安全衛生研究所季刊，第 14 卷第 2 期，第 108-123 頁。
- [39] Tsai C J, Wu CH, Leu ML, Chen SC, Huang CY, Tsai PJ, Ko FH, (2009), "Dustiness test of nanopowders using a standard rotating drum with a modified

- sampling train.”, *J. Nanoparticle Res.*, 11: 121-131.
- [40] [http://en.wikipedia.org/wiki/glove\\_box](http://en.wikipedia.org/wiki/glove_box)
- [41] Tsai CS and Hallock MF, (2006), “Workplace airborne nanoparticle exposure measurement at University Research Center.”, oral presentation at CSHEMA, Boston.
- [42] <http://www.jdarts.com.tw/vaccum1.htm>
- [43] Altman R, Offen G, Buckley W, and Ray, I, (2001) “Wet electrostatic precipitation: demonstrating promise for fine particulate control-part I.”, *J. Power Engineering*, 105: 37-39.
- [44] Bayless DJ, Alam MK, Radcliff R, Caine J, (2004), “Membrane-based wet electrostatic precipitation.”, *Fuel Processing Technology*, 85: 781-798.
- [45] EPA APTI course 413, (1981), “Control of particulate emissions.”, EPA 450/2-80-066.
- [46] Chang CL and Bai H, (1999), “An experimental study on the performance of a single discharge wire-plate electrostatic precipitator with back corona.”, *J. Aerosol Sci.*, 30: 325-340.
- [47] 羅玉雲, 2005, 以靜電集塵裝置及濾袋室集塵裝置處理紙錢焚燒排氣之研究, 國立中山大學環境工程研究所碩士論文。
- [48] Huang SH and Chen CC, (2003), “Loading characteristics of a miniature wire-plate electrostatic precipitator.”, *Aerosol Sci. Technol.*, 37: 109-121.
- [49] Altman R, Buckley W, Ray I, (2001) “Wet electrostatic precipitation: demonstrating promise for fine particulate control-part II.”, *J. Power Engineering*, 105: 42-44.
- [50] Lundgren DA, Marple VA, Herrick RA, (1995), United States Patent, US005395430A.
- [51] Mikropul H, (1998), “Innovative wet electrostatic precipitator technology.”, *Filtration & Separation*, 35: 433-435.
- [52] Kim HH, Yamamoto I, Takashima K, Katsura S, Mizuno A, (2000), “Incinerator Flue Gas Cleaning Using Wet-Type Electrostatic Precipitator.”, *J. Chem. Eng. JPN.*, 33: 669-674.
- [53] Pasic H, Alam MK, Bayless DJ, (2001), “Membrane electrostatic precipitator.”, United States Patent, US006231643B1.
- [54] Pasic H, (2006), “Membrane tubular wet electrostatic precipitators.”, *Filtration & Separation*, 43: 16-18.
- [55] Saiyasitpanich P, Keener TC, Khang SJ, Lu M, (2007), “Removal of diesel particulate matter (DPM) in a tubular wet electrostatic precipitator.”, *J. Electrostatics*, 65: 618-624.
- [56] 王竹方, 大氣中奈米微粒濃度監測與成分分析計畫, 環保署期末報告, EPA-95-B016, 民國96年。
- [57] Wang HC and Kasper G, (1991), “Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles.” *J. Aerosol Sci.*, 22: 31-41.
- [58] Ichitsubo H, Hashimoto T, Alonso M, Kousaka Y, (1996), “Penetration of ultrafine particles and ion clusters through wire screen.” *Aerosol Sci. Technol.*, 24: 119-127.
- [59] Alonso M, Kousaka Y, Hashimoto T, Hashimoto N, (1997), “Penetration of nanometer-sized aerosol particle through wire screen and laminar flow tube.” *Aerosol Sci. Technol.*, 27: 471-480.
- [60] Kim SC, Harrington MS, Pui DYH, (2007), “Experimental study of nanoparticles

- penetration through commercial filter media.”, *J. Nanoparticle Res.*, 9: 117-125.
- [61] Huang SH, Chen CW, Chang CP, Lai CY, Chen CC, (2007), “Penetration of 4.5 nm to 10  $\mu$ m aerosol particles through fibrous filters.”, *J. Aerosol Sci.*, 38: 719-727.
- [62] Wang J, Chen DR, Pui DYH, (2007), “Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media.”, *J. Nanoparticle Res.*, 9: 109-115.
- [63] Kirsch and Stechkina, (1978),
- [64] Tsai CJ, Lin CH, Wang YM, Wu ZX, Wang FC, (2005), “An efficient venturi scrubber system to remove submicron particles in exhaust gas.”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 55: 319-325.
- [65] Mark D, (2005), “The use of reliable measurements of dustiness of chemicals in selecting the most appropriate dust control technology”, IOHA, Pilaneser, G: S2-3.
- [66] BOHS ,(1985), Technical Guide No. 4, “Dustiness estimation methods for dry materials. Technical Guide No. 4. BOHS Technology Committee Working Group on Dustiness Estimation.”, Science Reviews Ltd.
- [67] Göran Lidén, (2006), “Dustiness Testing of Materials Handled at Workplaces.”, *Ann. Occup. Hyg.*, 50: 437–439.
- [68] Hamelmann F and Schmidt E, (2003), “Methods of Estimating the Dustiness of Industrial Powders - A Review.”, *KONA(Powder Science and Technology in Japan)*, 21: 7-18.
- [69] Sethi SA, Schneider TA, (1996), “A Gas Fluidization Dustiness Tester.”, *J. Aerosol Sci.*,27(1), S305.
- [70] Lyons CP, Mark D, (1994), “Development and Testing of a Procedure to Evaluate the Dustiness of Powders and Dusts in Industrial Use, Health and Safety Executive (HSE).”, UK.
- [71] Hjemsted and Schneider, (1994), “Documentation of a Dustiness Durm Test.”, *Ann. occup. Hyg.*, 40: 627-643.
- [72] CEN, EN 15051, (2006), “Measurement of the Dustiness of Bulk Materials-Requirements and Reference Test Methods.”, Document N330 of CEN/TC137/WG3.
- [73] DIN 55992, (1999), “Bestimmung einer Maßzahl für die Staubentwicklung von Pigmenten und Füllstoffen. “, Beuth Verlag, Berlin, Teil 1: Rotationsverfahren, Teil 2: Fallmethode.
- [74] EN 15051, (2006), “Workplace atmospheres—measurement of the dustiness of bulk materials—requirements and reference test methods.”, Berlin: Beauth Verlag.
- [75] Petavratzi E, Kingmam SW, Lowndes IS, (2007), “Assessment of the dustiness and the dust liberation mechanisms of limestone quarry operations.”, *Chem. Eng. Process.*, 46: 1412-1423.
- [76] Mark D, Bard D, Thorpe A, Wake D ,(2007), “Some considerations for the measurement of the dustiness of nanopowders.”, In 3rd international symposium on nanotechnology, occupational and environmental health, Taipei, Taiwan, 29 Aug–1 Sep 2007.
- [77] Schneider T and Jensen KA, (2008), “Combined Single-Drop and Rotating Drum Dustiness Test of Fine to Nanosize Powders Using a Small Drum.”, *Ann. Occup. Hyg.*, 52: 23–34.

- [78] Ibaseta N, Wistchger O, Thomas D, Biscans B, (2007), "Estimation of the dustiness of nanostructure powders by free falling.", Abstract, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei, Taiwan.
- [79] Maynard AD, Baron PA, Foley M, Shvedova A., Kisin ER, (2004), "Castranova, V., Exposure to carbon nanotube material: aerosol release during the handling of unrefined single-walled carbon nanotube material.", *J. Toxicol. Environ. Health*, 67: 87-107.
- [80] Maynard AD, Ku BK, Emery M, Stolzenburg M, McMurry PH, (2007), "Measuring particle size-dependent physicochemical structure in airborne single walled carbon nanotube agglomerates.", *J. Nanoparticle Res.*, 9: 85-92.
- [81] Isamu O, Sakurai H and Gamo M, (2007), "Dustiness testing of engineered nano-materials.", Abstract, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health, Taipei, Taiwan.
- [82] 蔡春進, 2008, "開發環境中奈米物質量測及特性分析技術"期中報告, 行政院環境保護署研究計畫
- [83] Marjamäki M and Keskinen J, (2006), "Technologies for Measuring Particulates, Tekes—The Finish Funding Agency for Technology and Innovation.", [http://www.tekes.fi/julkaisut/Fine\\_Mittaus.pdf](http://www.tekes.fi/julkaisut/Fine_Mittaus.pdf).
- [84] Chow JC, Watson JG., Watson, (2007), "Survey of measurement and composition of ultrafine particles.", *Aerosol Air Qual. Res.*, 7: 121-173.
- [85] Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N and Tekasakul P, (2007), "Inertial Classification of Nanoparticles with Fibrous Filters.", *Aerosol and Air Quality Research*, 7: 343-352.
- [86] Hering SV, Flaglan RC and Friedlander SK, (1979), "Design and evaluation of new low-pressure impactor. I.", *Environ. Sci. Technol.*, 13: 667-673.
- [87] Hillamo R. and Kauppinen EI, (1991), "On the performance of the Berner low pressure impactor.", *Aerosol Sci. Technol.*, 14: 33-47.
- [88] Gulijk CV, Marijnissen JCM, Makkee M and Moulijn JA, (2003), "Technical note Oil-soaked sintered impactors for the ELPI in diesel particulate measurements.", *J. Aerosol Sci.*, 34: 635-640.
- [89] Dekati website, <http://dekati.com/cms/elpi>
- [90] MSP corporation website, [http://www.msppcorp.com/air\\_sample.htm](http://www.msppcorp.com/air_sample.htm)
- [91] MSP corporation website, <http://www.msppcorp.com/MSP-PG10-RevA.pdf>
- [92] [http://mits10.ori.u-tokyo.ac.jp/vmap/instrument\\_info/TEOM.htm](http://mits10.ori.u-tokyo.ac.jp/vmap/instrument_info/TEOM.htm)  
與 [http://www.vv.se/filer/18758/figur10\\_2.gif](http://www.vv.se/filer/18758/figur10_2.gif)
- [93] TSI website, <http://www.tsiinc.fr/documents/3022A.pdf> 與  
<http://www.tsi.com/documents/3776.pdf>
- [94] TSI Website, [http://www.tsi.com/documents/3007\\_1930032.pdf](http://www.tsi.com/documents/3007_1930032.pdf)
- [95] TSI website, <http://www.tsiinc.fr/documents/3022A.pdf>;  
<http://www.tsi.com/documents/3776.pdf>
- [96] TSI Website, <http://www.tsi.com/Model.aspx?Mid=145>
- [97] TSI Website, <http://www.tsi.com/documents/3091FMPS.pdf>
- [98] TSI website, <http://www.tsi.com/documents/3550-PN2980333RevA.pdf>
- [99] [http://www.schc.org/schcnewsite/events/2007spring/present/Charles\\_Geraci.pdf](http://www.schc.org/schcnewsite/events/2007spring/present/Charles_Geraci.pdf)  
與 <http://www.iom-world.org>
- [100] Misra C, Singh M, Shen S, Sioutas C, Hall PM, (2002), "Develop and Evaluation of a Personal Cascade Impactor Sampler(PCIS)", *J. Aerosol Sci.*, 33: 1027-1047.

- [101] Oberdörster G, (2004), "An emerging discipline. Proceeding of International Symposium on Environment Nanotechnology.", *Nanotoxicology*, pp. 71-91, Taipei, Taiwan.
- [102] TSI website, <http://www.tsi.com/documents/3800SeriesPN1933798RevD.pdf>
- [103] Kuhlbusch T and Fissan H, (2005), "Occupational exposure in the carbon black industry.", *Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health*, p.23, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [104] Mohlmann C, (2005), "Occurrence of ultrafine aerosols a diverse workplaces.", *Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health*, p.33, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [105] Peters TM, Heitbrink WA, Evans DE, Slavin TJ, Maynard AD, (2006), "The Mapping of Fine and Ultrafine Particle Concentrations in an Engine Machining and Assembly Facility.", *Ann. Occup. Hyg.*, 50: 249-257.
- [106] D'Arcy JB, Dasch JM, Johnson J, Sutherland J, Carlson D, (2005), "Fine and ultrafine particle emissions from current manufacturing technologies.", *Proceeding of 2nd International Symposium on Nanotechnology and Occupational Health*, p.31, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [107] 蔡春進, 2006, 工作場所奈米微粒採樣方法研究, 行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告報告, IOSH95-A504。
- [108] Hsu LY and Chein HM, (2007), "Evaluation of nanoparticle emission for TiO<sub>2</sub> nanopowder coating materials.", *J. Nanoparticle Res.*, 9: 157-163.
- [109] Oberdörster G, (2001), "Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles.", *Int Arch Occup Environ Health*, 74: 1-8.
- [110] Donaldson K, Brown D, Clouter A, (2002), "The pulmonary toxicology of ultrafine particles.", *J Aerosol Med*, 15: 213-220.
- [111] Gilmour PS, Ziesenis A, Morrison ER, (2004), "Pulmonary and systemic effects of short-term inhalation exposure to ultrafine carbon black particles.", *Toxicol Appl Pharmacol*, 195: 35.
- [112] Oberdörster G, Finkelstein J, Ferin J, (1996), "Ultrafine particles as a potential environmental health hazard.", *Studies with model particles, Chest*; 109 (Suppl. 3): 68-69.
- [113] Peters A, Wichmann HE, Tuch T, Heinrich J, and Heyder J, (1997), "Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles.", *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 155: 376-383
- [114] Donaldson K, Stone V, Gilmour PS, (2000), "Ultrafine particles: mechanisms of lung injury.", *The Royal Society*, 358: 2741-2749.
- [115] Thornburg J, Leith D, (2000), "Mist generation during metal machining.", *Trans ASME*, 122: 544-549.
- [116] Portela JR, Lopez J, Nebot E, and Martinez de la Ossa E, (2001), "Elimination of cutting oil wastes by promoted hydrothermal oxidation.", *J. Haz. Mater.*, 88: 95-106.
- [117] Ross AS, Teschke K, Brauer M, (2004), "Determinants of exposure to metalworking fluid aerosol in small machine shops.", *Ann Occup Hyg.*, 48: 383-391
- [118] Heitbrink WA, Evans DE, Peters TM, Slavin TJ, (2008), "Characterization and Mapping of Very Fine Particles in an Engine Machining and Assembly Facility.", *J. Occup. Environ. Hyg.*, 4: 341-351.
- [119] Fujitani Y, Kobayashi T, Arashidani K, Kunugita N, (2008), "Suemura K,

- Measurement of the Physical Properties of Aerosols in a Fullerene Factory for Inhalation Exposure Assessment.’, *J. Occup. Environ. Hyg.*, 5: 380-389
- [120] Willeke K, Qian Y, Donnelly J, Grinshpun S, and Ulevicius V, (1996), “Penetration of airborne microorganisms through a surgical mask and a dust/mist respirator.”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 57: 348-355.
- [121] Huang C, Willeke K, Qian Y, Grinshpun S, and Ulevicius V, (1998), “Method for measuring the spatial variability of aerosol penetration through respirator filters.”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 59: 461-465.
- [122] Mark D, (2004), “NANOMATERIALS – a risk to health at work?”, Report of Presentations at Plenary and Workshop Sessions and Summary of Conclusions, Derbyshire, UK.
- [123] 陳春萬，2001，防塵口罩防護效能探討，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫，IOSH89-H308。
- [124] Martin SB, and Moyer ES, (2000), “Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects.”, *Appl Occup Environ Hyg.*, 15: 609-617.
- [125] NIOSH, 42 CFR Part 84, Respiratory Protective Devices, <http://www.cdc.gov/niosh/pt84abs2.html>
- [126] BS EN 149, (2001), “Respiratory protective devices. Filtering half masks to protect against particles.”
- [127] 中華民國國家標準, CNS 14755 Z2125, 拋棄式防塵口罩。
- [128] 葉文裕，2001，呼吸防護具過濾性能測試系統之安裝與測試，行政院勞工安全衛生研究所計畫，IOSH90-H312。
- [129] 簡弘民，2005，推動負責任的奈米科技研發及生產環境計畫，環保署期末報告，EPA-94-U1U1-01-101.
- [130] 葉文裕，2002，奈米微粒對帶電濾材之過濾特性研究，行政院勞工安全衛生研究所計畫，IOSH91-H307。
- [131] 陳春萬，2006，呼吸防護具使用管理問題探討—奈米微粒洩漏問題及儲存環境之影響研究，行政院勞工安全衛生研究所計畫，IOSH94-H308。
- [132] Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgorski A, Zimmer A, Grinshpun SA, (2006), “Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticles.”, *Ann. Occup. Hyg.*, 50: 259-269.
- [133] NIOSH, Safety and Health Topic: Control Banding <http://www.cdc.gov/niosh/topics/ctrlbanding/>
- [134] BSI, (2007b), ISO/TR 27628, Workplace atmospheres-Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols-Inhalation exposure characterization and assessment.
- [135] TSI, (2003), Model 3433 Small-Scale Powder Dispenser Instruction Manual.
- [136] 呂銘龍，2008，利用一修正採樣系統之旋轉腔試驗機進行細粉體與奈米粉體之揚塵測試，國立交通大學環境工程研究所碩士論文。
- [137] 行政院勞工委員會，粉塵危害預防標準，民國 92 年-1。
- [138] 行政院勞工委員會，勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準，民國 92 年-2。
- [139] 日本厚生勞動省，2008，日本奈米物質製造及處理作業環境現場暴露預防策略，平成 20(2008)年 2 月。
- [140] 日本勞動災害防止協會，2007，研究、製造現場奈米科技之確切管理手段之指引，平成 19(2007)年 3 月。



- [141] COSHH essentials, Working Group on Action to Control Chemicals, [www.hse.gov.uk/aboutus/hsc/iacs/acts/watch/100604/p07.pdf](http://www.hse.gov.uk/aboutus/hsc/iacs/acts/watch/100604/p07.pdf)
- [142] HSE, Health and Safety Executive, (2003), HSG53: A guide to the selection and use of respirators.
- [143] HSE, Health and Safety Executive, 2003, OC 282/28: Fit testing of respiratory protective equipment, <http://www.hse.gov.uk/pubns/fittesting.pdf>
- [144] Warheit DB, Webb TR, Sayes CM, Colvin VL, and Reed KL, 2006, "Pulmonary instillation studies with nanoscale TiO<sub>2</sub> rods and dots in rats: Toxicity is not dependent upon particle size and surface area.", *Toxicol. Sci.*, 92: 174-185.
- [145] Sayes CM, Wahi R, Kurian PA, Liu Y, West JL, Ausman, K. D, Warheit DB, and Colvin VL, (2006), "Correlating nanoscale titania structure with toxicity: A cytotoxicity and inflammatory response study with human dermal fibroblasts and human lung epithelial cells.", *Toxicol. Sci.*, 92: 174-185.
- [146] Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forest G, Alexander A, (2006), "Carbon nanotubes: A review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety.", *Toxicol. Sci.*, 92: 5-22.
- [147] ASTM, 1993, F1461, Standard Practice for Chemical Protective Clothing Program.
- [148] COSHH Essentials web page, <http://www.coshh-essentials.org.uk/>
- [149] Brooke, I. M., A UK scheme to help small firms control health risks from chemicals: Toxicological considerations, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 42, 1998, pp. 377-390

# 附錄一、COSHH Essentials 網頁畫面及輸入化學品及作業情況後得到的控制方法：

[www.coshh-essentials.org.uk](http://www.coshh-essentials.org.uk)

The screenshot shows the COSHH Essentials website interface. At the top left is the HSE logo with the text 'Health & Safety Executive Reducing risks, protecting people'. To the right is the 'COSHH ESSENTIALS' logo. Below the logo is a navigation bar with 'Easy steps to control health risks from chemicals', 'hsedirect', and 'Help'. On the left side, there is a vertical menu of buttons: 'Home', 'About COSHH Essentials', 'Help', 'Worked Example', 'HSE', 'hsedirect', 'DTI Small Business Service', and 'Environment Agencies'. The main content area features a circular 'COSHH ESSENTIALS' seal, the title 'COSHH ESSENTIALS', and the subtitle 'Easy steps to control health risks from chemicals'. Below this, there are three bullet points with checkmarks: 1. 'COSHH Essentials provides advice on controlling the use of chemicals for a range of common tasks, eg mixing, or drying. Click [here](#) for an example of the type of advice you will receive.' 2. 'For most tasks this website will take you through a number of steps and ask for information about your tasks and chemicals. This assessment will take several minutes to complete.' 3. 'But for some processes, tasks or services you can now get direct advice. Click [here](#) for an example of the type of advice you will receive.' At the bottom of the main content area is a button that says 'Click here to get started'.

This is a duplicate of the screenshot above, showing the COSHH Essentials website interface with the same layout and content.



# Mixing liquids with other liquids or solids

Engineering control

217



This guidance sheet is aimed at employers to help them comply with the requirements of

the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (COSHH) by controlling exposure to chemicals and protecting workers' health.

The sheet is part of the HSE guidance pack *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. It can be used where the guide recommends control approach 2 (engineering control) as the suitable approach for your chemical(s) and task(s).

This sheet provides good practice advice on mixing medium and large quantities of liquids with other liquids or solids. It describes the key points you need to follow to help reduce exposure to an adequate level.

It is important that all the points are followed.

Some chemicals can also be flammable or corrosive. Where they are, your controls must be suitable for those hazards too. Look at the safety data sheet for more information.

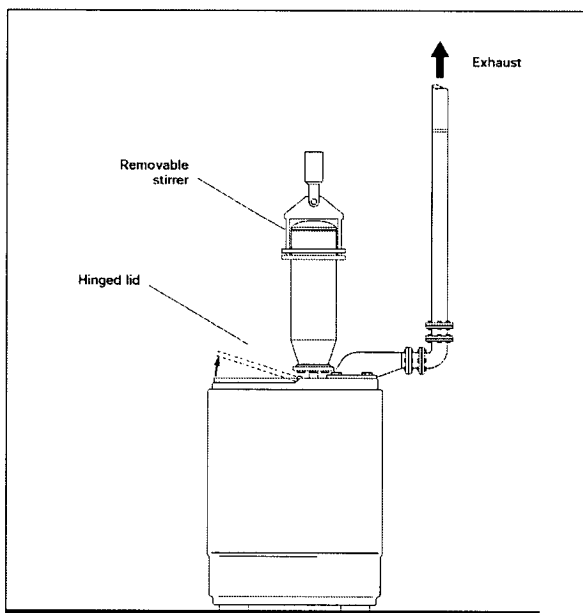
Depending on the scale of work, releases into the atmosphere may be regulated within the pollution prevention and control (PPC) framework. You should consult your local authority or the Environment Agency. In Scotland, consult the Scottish Environment Protection Agency (SEPA). They will advise you if PPC legislation applies to your company, and about air cleaning and discharging emissions into the air. Otherwise, minimise emissions into the air.

## Access

- ✓ Restrict access to the work area to authorised staff only.

## Design and equipment

- ✓ Position the local exhaust ventilation (LEV) hood as near to the source of the vapour as possible.
- ✓ Enclose the top of the mixer as much as possible.
- ✓ Airflow across the whole mixer top towards the LEV should be at least 0.5 metres per second. If solids are mixed, it may be necessary to increase the airflow to 1 metre per second.
- ✓ Where possible, site the work area away from doors, windows and walkways to stop draughts interfering with the ventilation and spreading vapours.
- ✓ Provide an air supply to the workroom to replace extracted air.
- ✓ Keep ducts short and simple, and avoid long sections of flexible duct.
- ✓ Provide an easy way of checking the control is working, eg a manometer, pressure gauge or tell-tale.
- ✓ Discharge extracted air to a safe place away from doors, windows and air inlets.
- ✗ With vapours, air re-circulation is not recommended.



## Maintenance

- ✓ Maintain the equipment as advised by the supplier/installer in effective and efficient working order.

## Examination and testing

- ✓ Get information on the design performance of the ventilation equipment from the supplier. Keep this information to compare with future test results.
- ✓ Visually check ventilation equipment at least once a week for signs of damage.
- ✓ Ensure the ventilation equipment is examined and tested against its performance standard. This is generally at least every 14 months (see HSE publication HSG54).
- ✓ Keep records of all examinations and tests for at least five years.

## Cleaning and housekeeping

- ✓ Clean work equipment and the work area daily. Clean other equipment and the workroom regularly - once a week is recommended.
- ✓ Deal with spills immediately.
- ✓ Store containers in a safe place and dispose of empty containers safely (see CGS 101).
- ✓ Put lids on containers immediately after use.

## Personal protective equipment (PPE)

- ✓ Chemicals in **hazard group S** can damage the skin and eyes, or enter the body through the skin and cause harm. See CGS S100 and S101 for more specific advice. Check the safety data sheets to see what personal protective equipment is necessary.
- ✓ Ask your safety clothing supplier to help you select suitable protective equipment.
- ✓ Respiratory protective equipment should not be necessary for routine operations. It may be necessary for some cleaning and maintenance activities, eg cleaning up spills.
- ✓ Keep PPE clean, and replace it at recommended intervals.

## Training

- ✓ Give your workers information on the harmful nature of the substance.
- ✓ Provide them with training on: handling chemicals safely; checking controls are working and using them; when and how to use any PPE you provide; and what to do if something goes wrong.

## Supervision

- ✓ Have a system to check that control measures are in place and being followed.

## Further information

- Safety data sheets
- *Maintenance, examination and testing of local exhaust ventilation* HSG54 (second edition) HSE Books 1998 ISBN 0 7176 1485 9
- *An introduction to local exhaust ventilation* HSG37 (second edition) HSE Books 1993 ISBN 0 7176 1001 2
- Control guidance sheets 101, S100 and S101

## Employee checklist for making the best use of the controls

- Make sure the ventilation system is switched on and is working.
- Make sure it is running properly; check the manometer, pressure gauge or tell-tale.
- Make sure the air movement is across or away from your face.
- Look for signs of damage, wear or poor operation of any equipment used. If you find any problems, tell your supervisor. Do not carry on working if you think there is a problem.
- Make sure that paper bags and other waste material aren't drawn into the ventilation duct.
- Wash your hands before and after eating, drinking or using the lavatory.
- Do not use solvents to clean your skin.
- Clear up spills immediately. Contain or absorb liquids with granules or mats. Dispose of spills safely.
- Use, maintain and store any PPE provided in accordance with instructions.



COSHH essentials:  
easy steps to control chemicals  
October 2003

Printed and published by  
the Health and Safety Executive



This guidance sheet is for **employers including the self-employed and franchisees** to help them comply with the requirements of the Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (COSHH) by controlling exposure to chemicals and protecting workers' health.

The sheet is part of HSE guidance *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. It describes the key points you need to follow to help reduce exposure to an adequate level. It is important to follow all the points, or use equally effective measures.

Get safety data sheets from your product supplier. Use these to identify the more dangerous chemicals, and less dangerous substitutes. Also check for flammability.

Disinfectants are biocidal products. Authorised products are safe for use so long as you follow the instructions on the label.

Manual cleaning (scrubbing, brushing, mopping, wiping, immersing, etc) can lead to skin contact. Vigorous scrubbing can create mists that can be breathed in.

General ventilation is the recommended approach.

# Manual cleaning and disinfecting surfaces

## General ventilation

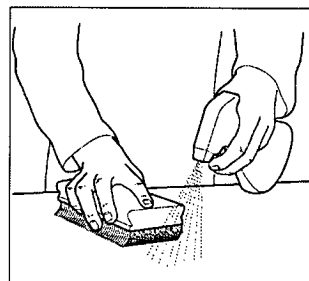
# SR04

### Workplace and access

- Surface cleaning and disinfection is a common activity in: the tourist industry (hotels and other accommodation); food shops and outlets; childcare facilities; and by cleansing services, etc.
- Mark any pedestrian routes that can become slippery when wet.

### Design and equipment

- Remove heavy dirt deposits first.
- Never decant concentrate into an unlabelled container.
- Never re-use a concentrate container. Dispose of it safely or return it to your supplier.
- Don't store more than 50 litres of flammable liquid indoors. Use a flammables store.
- You need washing facilities for decontamination after handling products.



### Procedures

- Store products containing chemicals securely in a cool, dry, dark place, capable of keeping in spills. Don't store far more than you need.
- Read the instructions on labels carefully - follow the instructions for use.
- Keep chemicals off your skin - wash off any splashes immediately.
- Make up only as much solution as you will need for immediate use.
- Avoid contact with surfaces until they are dry.
- Put the cap back on the container immediately.

### Special care

- Contact with many chemicals can lead to skin soreness, itching, rashes, and blistering (dermatitis). Some can also damage the eyes.
- Some products may cause asthma - check the safety data sheet.
- Try to avoid disinfectants that contain formaldehyde or glutaraldehyde. Or use them at the lowest possible concentration. You need respiratory protective equipment (RPE) when using these chemicals - seek advice from a protective equipment supplier.
- Take special care using caustic soda (sodium hydroxide). This can erupt when mixed with water. Splashes in the eye can cause blindness.
- Never add any other chemical to concentrates that contain bleach (sodium hypochlorite solution). This can cause a dangerous gas (chlorine) to be given off.

### Maintenance

- ✓ Wash out the equipment after use. Dispose of this waste liquid safely.

### Cleaning and housekeeping

- ✓ Clean up spills promptly - practise how to do this.

### Personal protective equipment (PPE)

- ✓ Follow the instructions on product labels.
- ✓ Ask your safety-clothing supplier to help you get the right PPE.
- ✓ Wear protective gloves - single-use nitrile gloves are acceptable. If you must use latex gloves, use only 'low-protein, powder-free' gloves.
- ✓ Throw away single-use gloves every time you take them off.
- ✓ Wear waterproof, slip-resistant footwear.
- ✓ Skin creams are important for skin protection and help in washing contamination from the skin. These are not 'barrier creams'. After work creams help to replace skin oils.

### Health advice

- ✓ Ask your workers to check their skin for dryness or soreness every six months. If these effects appear, check the proper use of skin creams and PPE.
- ✓ If you use a product labelled 'may cause sensitisation by skin contact' or 'may cause sensitisation by inhalation', seek specialist advice. See Further information.

### Training

- ✓ Show your workers this sheet and check that they understand it.
- ✓ Tell them about the risks of using the product - see product labels or Section 15 of the safety data sheet from your product supplier.
- ✓ Make sure everyone knows how to clear up spills promptly and safely.

### Supervision

- ✓ Check the procedures for cleaning are being followed.
- ✓ Get safety data sheets from your suppliers and identify the more dangerous chemicals. Consider substitution.

### Further information

- *Assessing and managing risks at work from skin exposure to chemical agents: Guidance for employers and health and safety specialists* HSG205 HSE Books 2001 ISBN 0 7176 1826 9
- *Preventing dermatitis at work: Advice for employers and employees* Leaflet INDG233 HSE Books 1996 (single copy free or priced packs of 15 ISBN 0 7176 1246 5)
- Health and safety consultants: the BOHS Faculty of Occupational Hygiene keeps lists of qualified hygienists who can help you. Contact BOHS on 0133 229 8087 or at [www.bohs.org/](http://www.bohs.org/)
- Occupational health professionals: details of doctors and nurses can be found in the Yellow Pages under 'Health and safety consultants' and 'Health authorities and services'. Also visit the NHS website at [www.nhsplus.nhs.uk](http://www.nhsplus.nhs.uk)

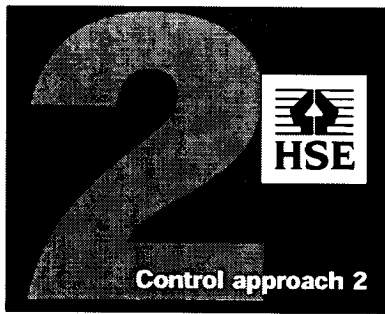
### Employee checklist

- Look for signs of leaks, wear and damage.
- If you find any problems, tell your supervisor. Don't just carry on working.
- Wash your hands after use, and before and after eating, drinking, smoking and using the lavatory.
- Never clean your hands with concentrated cleaning products or solvents.
- Clear up chemical spills promptly. Absorb liquid spills in granules and dispose of them safely.
- Use and store your protective equipment according to instructions.
- Throw away single-use gloves every time you take them off.
- Check your skin regularly for dryness or soreness - tell your supervisor if these symptoms appear.
- Use skin creams provided as instructed.



COSHH essentials:  
easy steps to control chemicals  
October 2003

Printed and published by  
the Health and Safety Executive



# Local exhaust ventilation

## Engineering control

200



This guidance sheet is aimed at employers to help them comply with the requirements of the

Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (COSHH) by controlling exposure to chemicals and protecting workers' health.

The sheet is part of the HSE guidance pack *COSHH essentials: easy steps to control chemicals*. It can be used where the guide recommends control approach 2 (engineering control) as the suitable approach for your chemical(s) and task(s).

This sheet provides good practice advice on using local exhaust ventilation which is the commonest form of engineering control. It can be applied to a range of tasks involving small, medium and large scale use of solids or liquids. It describes the key points you need to follow to help reduce exposure to an adequate level.

It is important that all the points are followed.

Some chemicals can also be flammable or corrosive. Where they are, your controls must be suitable for those hazards too. Look at the safety data sheet for more information.

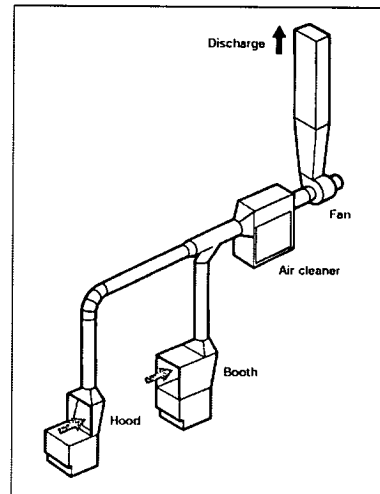
Depending on the scale of work, releases into the atmosphere may be regulated within the pollution prevention and control (PPC) framework. You should consult your local authority or the Environment Agency. In Scotland, consult the Scottish Environment Protection Agency (SEPA). They will advise you if PPC legislation applies to your company, and about air cleaning and discharging emissions into the air. Otherwise, minimise emissions into the air.

### Access

- ✓ Restrict access to the working area to authorised staff only.

### Design and equipment

- ✓ Apply local exhaust ventilation (LEV) at the source of exposure to capture the dust or vapour.
- ✓ Enclose the source of dust or vapour as much as possible to help stop it spreading.
- ✓ Don't allow the worker to get between the source of exposure and the LEV, otherwise they'll be directly in the path of the contaminated airflow.
- ✓ Where possible, site the work area away from doors, windows and walkways, to stop draughts interfering with the LEV and spreading the dust or vapour.
- ✓ Have an air supply coming into the workroom to replace extracted air.
- ✓ Keep ducts short and simple, and avoid long sections of flexible duct.
- ✓ Provide an easy way of checking the LEV is working, eg manometer, pressure gauge or tell-tale.
- ✓ Discharge extracted air to a safe place away from doors, windows and air inlets.
- ✓ With exposure to dusts, you can re-circulate clean, filtered air into the workroom.
- ✗ With exposure to vapours, re-circulation is not recommended.



### Maintenance

- ✓ Maintain the LEV as advised by the supplier, in effective and efficient working order.

### Examination and testing

- ✓ Get information on the design performance of the LEV from the supplier. If this isn't possible, get a competent engineer to give you information on the system's optimum performance as part of a thorough examination and test of the system. Keep this information to compare with future test results.
- ✓ Check the LEV and visible ducting at least once a week for signs of damage.
- ✓ Have the LEV examined and tested against its performance standard - generally at least every 14 months (see HSE publication HSG54).
- ✓ Keep records of all examinations and tests for at least five years.

### Cleaning and housekeeping

- ✓ Clean equipment and the work area daily. Clean other equipment and the workroom regularly - once a week is recommended.
- ✓ Deal with spills immediately.
- ✓ Store containers in a safe place and dispose of empty containers safely (see CGS 101).
- ✓ Put lids on containers immediately after use.
- ✗ Don't clean up with a dry brush or compressed air. Vacuum or wet clean.

### Personal protective equipment (PPE)

- ✓ Chemicals in **hazard group S** can damage the skin and eyes, or enter the body through the skin and cause harm. See CGS S100 and S101 for more specific advice. Check the safety data sheets to see what personal protective equipment is necessary.
- ✓ Ask your safety clothing supplier to help you select suitable protective equipment.
- ✓ Respiratory protective equipment shouldn't be needed for routine tasks. It may be needed for some cleaning and maintenance activities, eg dealing with spills.
- ✓ Keep any PPE clean, and replace at recommended intervals.

### Training

- ✓ Give workers information on the harmful nature of the substance.
- ✓ Provide them with training on handling chemicals safely; checking controls are working and using them; when and how to use any PPE you provide; and what to do if something goes wrong.

### Supervision

- ✓ Have a system to check that control measures are in place and being followed.

### Further information

- Safety data sheets
- *Maintenance, examination and testing of local exhaust ventilation* HSG54 (second edition) HSE Books 1998 ISBN 0 7176 1485 9
- *An introduction to local exhaust ventilation* HSG37 (second edition) HSE Books 1993 ISBN 0 7176 1001 2
- *Controlling airborne contaminants in the workplace* Technical guide no 7 British Occupational Hygiene Society 1987 ISBN 0 9059 2742 7
- Control guidance sheets 101, 204, S100 and S101

### Employee checklist for making the best use of the controls

- Make sure the LEV is switched on and is working.
- Make sure it is working properly; check the manometer, pressure gauge or tell-tale.
- Make sure the air movement is across or away from your face.
- Look for signs of damage, wear or poor operation of any equipment used. If you find any problems, tell your supervisor. Do not carry on working if you think there is a problem.
- Make sure that paper bags and other waste aren't drawn into the LEV.
- Wash your hands before and after eating, drinking or using the lavatory.
- Don't use solvents to clean your skin.
- Clear up spills immediately. For liquids, contain or absorb spills with granules or mats. For solids, use vacuum cleaning or wet mopping. Dispose of spills safely.
- Use, maintain and store any PPE provided in accordance with instructions.



COSHH essentials:  
easy steps to control chemicals  
October 2003

Printed and published by  
the Health and Safety Executive



## 附錄二、評選會議委員意見回覆

(1) 本案需求非常的多，包括資料收集比較整理、現場評估、實驗室測定、技術指引草案研擬等，研究團隊所提計畫書可符合此需求，為獲得更好之結果，建議專注於特定議題與方向，補充整個研究流程、順序與架構。

回覆：工作項目 1. 收集整理奈米微粒作業環境控制技術相關文獻與各國相關建議策略 2. 整體評估奈米微粒之控制技術，包括通風與隔離等控制方式之性能，生產過程逸散與沉積再揚起之可能性 5. 研擬奈米微粒作業控制策略指引草案等三項主要為文獻回顧及資料收集整理；工作項目 3. 測量作業環境空氣中奈米微粒之暴露濃度，及其受作業方式及控制設備之影響，4. 設計適當實驗，以評估奈米微粒控制技術之性能，為現場及實驗室的實驗工作，在計畫書中已針對研究方法及流程作了說明。

(2) 控制技術之範圍非常廣泛，包括暴露評估、分級、火災爆炸、健康檢查等，仍有許多待釐清議題，研擬技術指引時除參考文獻整理外，建議諮詢相關領域專家。對於實際進行現場評估與實驗室測定，應該選定特定議題，並且適當說明選擇原因。建議於實驗室測定時，若經費允許可評估圍封下之控制效果。

回覆：工作項目 3. 測量作業環境空氣中奈米微粒之暴露濃度，及其受作業方式及控制設備之影響--已選定二氧化鈦廠等奈米粉體廠進行實測研究，工作項目 4. 設計適當實驗，以評估奈米微粒控制技術之性能--已說明高效率 HEPA 真空吸塵器為廣為國外奈米粉體廠作業

場所使用之奈米微粒吸除及控制的設備，另外不同的揚塵測試方法會產生不同的奈米微粒逸散特性，因此我們擬針對粉體揚塵特性的量測方法及高效率 HEPA 真空吸塵器進行研究。

(3) 由於奈米微粒之暴露評估、風險等都仍在研究中，未來參考之危害分級方式，應該有參考文獻、架構、適用範圍等說明。

回覆：將參考 BSI, ASTM 及 NIOSH 等文獻進行分級控制策略之研擬。

(4) 建議計畫規劃單位，未來應諮詢專家意見，設定適當之控制技術指引範圍。建議執行單位實際撰寫指引時，除參考先進國家措施外，建議整理章節內容與定義，並適當之諮詢專家意見。

回覆：將遵照此意見進行指引撰寫。

(5) 所探討之控制技術應該是奈米科技所提之工業製造之奈米微粒 (engineering nanoparticles)，對此之控制技術，應該可參考過去工業衛生中因製程中所產生之奈米微粒(如焊接煙)之控制經驗。

回覆：文獻上或本國法規或報告中有類似之控制技術或經驗時會加以參考。

(6) 對於現場測定與實驗室評估所預計收集之數據(如數目濃度、表面積濃度、質量濃度等)，特別是預計二種不同之奈米作業環境，奈米微粒性質可能也會不同，建議應該就其應用性適當規劃說明，使其明確化。

回覆：不同的奈米微粒的量測單位(metric)轉換需有相當的理論基礎，我們將使用 SMPS, MOUDI 的監測數據作比較以研究各種奈米微粒濃度間的關係。

(7) 評估吸塵器濾袋之效果時，建議考慮不同風速之比較級不同濾袋等級(如 HEPA, ULPA, super-ULPA 等)，對於真空濾袋之流量定義，流量控制器與管路等微粒損失問題，應該有所說明。

回覆：風速影響過濾之效率很大，將為我們考慮的重點測試參數之一，對於流量控制我們將以中型層流流量計(laminar flow element)監測。

(8) 現場評估時，若能收集作業環境之相關環境資料，如 ACH 等，可提供更多關於奈米微粒揚塵、累積、移除等影響因素。

回覆：空氣換氣率(ACH)將以適當的 SF<sub>6</sub> 偵測設備量測後再進行奈米微粒的測量。

### 附錄三、期中審查委員意見回覆

- (1) 本計畫之範圍很廣，執行內容也很豐富，也有很好之結果，但內容太多無法明確呈現具體結果，希望未來能專注於特定議題，例如控制策略指引草案之研擬。對於技術開發研究事項，請執行單位在招標規範原則下，適當釐清後，提出控制技術之技術或知識落差及研究需求，供未來規劃參考，搭配後續研究可讓控制策略指引更完善。

回覆：同意此看法，已完成草案研擬。並提出建議，供未來參考。

- (2) 對於招標規範第 5 項之指引草案，研究已回顧很多文獻，建議先擬定大綱與撰稿人員，再邀請專家討論。對於管理分級問題，在缺乏毒性評估等資料之情形下，或許可考慮僅做原則性之說明，餘細節可在未來研究逐步釐清，例如考慮奈米物質之危害，其沉積於人體狀況及影響機制，不同粒徑微粒的影響情形，這些都須進一步釐清，才能更明確分級，選定適當控制策略

回覆：同意此看法，已對管理分級問題做說明。

- (3) 依據規範 4「奈米微粒控制技術」性能評估是否除了針對 HEPA 性能評估外，也能對整體作業環境之通風、隔離（規範 2）等控制技術進行評估，建議適當說明。

回覆：已對國內外的 HEPA 性能進行評估，結果顯示國外 HEPA 性能較國內 HEPA 佳。在評估整體作業環境之通風、隔離上不易執行，因可能會對工廠的生產流程或製程造成影響。

- (4) 奈米粉體揚塵逸散之量測方法，應會與奈米微粒之狀況有很大之差別，是否須對不同奈米粉體狀況，而有所不同之量測方法之規劃？對於未來建立「揚塵測試方法」，建請參考現階段測試結果，說明規範之參數範圍與項目，以俾未來應用之參考。

回覆：

由奈米粉體揚塵逸散的結果顯示，奈米粉體確實會有聚集的狀況，且不同的奈米粉體其聚集的狀況皆會有所差異，若是依照奈米粉體聚集的情況設計不同的量測方法的話，各自量測後得到的結果會不容易相互比較，因此會傾向於將待測試的奈米粉體以相同的方法進行逸散實驗之後，再將得到的結果互相比較。而逸散方法的選擇則可參考奈米粉體的作業程序，據此來決定較適合的奈米粉體逸散方法。若是未來要建立揚塵測試方法，根據現階段實驗測試所獲得的結果，在參數範圍與項目的部份，有以下幾點建議：

1. 揚塵測試需要測定的項目：揚塵微粒的數目濃度分佈、重量濃度分佈、粉體的顯在密度、粉體的單位重量之逸散重量、粉體微粒經逸散前後的聚集型態之觀察。
  2. 揚塵測試時測定的參數範圍：微粒的數目濃度量測的範圍可由 5.6nm-10 $\mu$ m。微粒的重量濃度量測的範圍可由 10nm-100 $\mu$ m。重量濃度分佈還可依氣動直徑範圍，將之分級為可呼吸性粉塵範圍(100 $\mu$ m-10 $\mu$ m)、胸腔區粉塵範圍(10 $\mu$ m-4 $\mu$ m)和可吸入性粉塵範圍(4 $\mu$ m 以下)來分別比較。
- (5) 對於現場量測奈米微粒暴露與控制狀況，TiO<sub>2</sub> 粉體廠量測結果雙峰之為例來源為何？係奈米微粒作業造成或背景環境影響，應有適當說明。另量測儀器之適用範圍(如 FMPS 之限制等)、及廠內 ACH 之狀況、進氣及排氣之位置標示、及 P139 之結果可能與進排氣口有關，都請適當說明。

回覆：TiO<sub>2</sub> 粉體廠量測結果雙峰之為例來源為廠內柴油堆高機運作時所造成。FMPS 的微粒粒徑量測為 5.6~560 nm，CPC 3007 為 10~1000 nm，Aerosol Trak 為 10~1000 nm，這些即時量測儀器均不能在環境溫度 35°C 以上使用。P139 之結果與粉體包裝時間有關，因粉體包裝時柴油堆高機會進入粉體包裝區搬運已包裝好的粉體，而其廢氣中所含的碳煙會導致廠內微粒數目濃度上升。

- (6) 部分文辭請參考修正，以符合一般職業衛生之用法，例如 p15 「建築通風」

可改為「整體換氣」字眼較符合工業通風字眼，P20 第 6 行「氣」改為「器」，P 32 之泡「棉」是否是「綿」？P147、表 4.3.7 應為「鐵氟龍」濾紙。

回覆：遵照意見進行修改。

(7) 部分數據表示建議考慮下列處理方式，P135、136 之圖建議用折線表示，P154 之圖 152 之除塵效率可否用單一纖維理論計算其 fitting curve？是否可計算並繪出 HEPA 效率之 filter quality。

回覆：遵照意見進行修改。P154 之圖 152 之除塵效率不能用單一纖維理論計算其 fitting curve。

## 附錄四、期末審查委員意見回覆

- (1) 本報告研究設計嚴謹，資料收集完整。業已達原規畫內容完成各工作，且提具體之草案。

回覆:謝謝委員們的肯定。

- (2) 對於所研擬之控制防護指引草案，是否可以針對「奈米物質作業場所」給予較清楚定義？而設定以人造奈米物質為範圍，是否稍加討論，將來應用時量測人造奈米濃度時，如何排除與分辨傳統之製程所產生之微粒(如 mist、fume)？對於第五章第七節第貳項是否應改為雇主應收集資料告知勞工之義務。

回覆:奈米物質作業場所的定義為奈米物質之製造及處理(含修理、預防保養，及研究製造場合)有關的作業場所。人造奈米物質為製程中所生產的奈米物質，至少有一維尺寸小於 100 nm。

- (3) 關於指引草案奈米微粒的風險評估是否以數目濃度定義，可以較具直接相關？或是有其他考慮，建議適當說明，奈米物質廢棄物因可能具備「奈米毒性」，可否建議相關安定、去毒之作爲？或是應說明相關法令規範。另建議在指引草案內加入 RH 之項目，可以提高控制效果。

回覆: 奈米微粒暴露風險評估以質量濃度定義，法規也是以質量濃度作規範。在第五章第七節第柒項中已初步建議奈米物質廢棄物的相關安定、去毒之作爲。

- (4) FMPS 與 SMPS 採樣結果的比較，在實驗室小型揚塵測試與現場採樣並不相同，現場採樣結果在分佈上相似，但濃度 SMPS>FMPS，而實驗室之比較不但分佈上有差異，濃度上也是以 FMPS 較高，其可能原因，或是數據處理技巧，應該於報告說明。

回覆:實驗室小型揚塵測試為將粉體逸散至一腔體中，再利用 FMPS 及 SMPS 進行同步量測，FMPS 所量測到的數目濃度較 SMPS 高，另外在現場量測方面 FMPS 和 SMPS 並沒有同時使用過。

(5) 研究中逸散測定之數據，APS 與 SMPS 合併呈現，數據是否適當整理，較可看出整體變化趨勢。

回覆:已遵照此意見進行修正，謝謝指教。

(6) 研究中所測吸塵器濾材，應該是廠商所宣稱之 HEPA 濾材，而非實際 HEPA 濾材，根據 HEPA filter 的定義，濾材測試的結果似乎都不符合，建議於報告中適當說明。另測定儀器 SMPS 使用經驗上，若採樣時間太短，HEPA 下游濃度太低，可能會有低估濾材之效率情形，另大流量的測試系統是否有採樣代表性問題，請於報告中說明。

回覆：研究中所測試之國內吸塵器用來過濾細微粒之濾材，在報告中的敘述改為廠商宣稱可過濾大於 0.3 $\mu\text{m}$  以上微粒之空氣濾清器，且尚未搜尋到任何國內生產之 HEPA 濾罐(筒)，因此測試研究中之國內生產空氣濾清器過濾效率，期能改善本土生產之工業用真空吸塵器。大流量的測試系統的過濾濾速穩定，採樣具代表性。

(7) 研究中所測吸塵器濾材最易穿透粒徑之變化，似乎不太明顯，建議將濾材取出，先個別進行捕集效率之研究，再探討是有否有連接、密封、洩漏等吸塵器其他問題。

回覆：未來的實驗會將濾材取出做濾材效率測試。

(8) 研究中測試僅測試特定品牌，因此評論國內外吸塵器之 HEPA 濾材性能，可能需要有比較嚴謹的依據，而且僅以一家產品的結果就下結論是否妥當，應再考慮！



回覆：今年主要是測試系統架設與初步的實驗評估，未來會盡力向其他不同廠商接洽訂制濾罐式 HEPA filter，並測試其對奈米微粒之去除效率。

(9) 於 P.14 提及奈米之局排之氣櫃與氣罩，是否增加勞研所之成果。於 P.201 提及國內法規描述時，宜考慮粉塵危害預防標準與容許濃度標準，有其前題，如係考量預防塵肺症前題，如重金屬燻煙濃度問題，建議參酌修改。

回覆：已遵照此意見進行修正，謝謝指教。

(10) 報告 P.198 表 56 之微粒化學分析資料 Carbon 成分及離子成分濃度是否均用質量濃度表示較佳？另報告中濾紙的稱重，是否已使用標準濾紙(參考濾紙)，增加稱重之準確度及精密度，另於工廠之採樣測定部分，可否增加 RH.Velocity 之資料。

回覆：微粒化學分析資料 Carbon 成分及離子成分濃度已修改成質量濃度。本研究中在濾紙稱重上均有實驗室空白和現場空白和採樣濾紙進行比較採樣流程的準確性。

(11) P.15 之 HVAC 一般中文稱為「中央空調系統」，圖 150 之 Y 軸座標應該調整，圖 106 與 22 之標題與說明，建議參考修正，另最後報告整理應注意工廠隱私問題，避免造成不必要之困擾。

回覆：已遵照此意見進行修正，謝謝指教