

奈米粉體製程環境微粒監測與口罩濾材過濾效率評估

簡弘民 黃俊超 陳姿名 陳光宇 徐禮業 陳聖遠

工業技術研究院能源與環境研究所

摘要

本研究針對小型量產的「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」與「微波電漿反應製造奈米粉體製程」進行奈米微粒之作業環境暴露評估，針對製程機台在停機與運轉的狀態下監測其奈米微粒之情況，發現運轉時兩製程環境奈米微粒平均數目濃度分別為 25255 ± 4705 與 22774 ± 3672 $\#/cm^3$ ，而停機時則分別為 14071 ± 995 與 9918 ± 1546 $\#/cm^3$ 左右。同時也對「工研院環境奈米實驗室」與「大氣環境」的奈米微粒進行監測，其平均數目濃度分別為 11966 ± 2332 與 22756 ± 3642 $\#/cm^3$ 。研究中亦針對市售口罩隨機採樣並進行防護效率的測試，測試結果為 R95、N95、P100 以及 Gas filter & P100 四種濾材對於奈米微粒的削減有很大的功效。以吸入體內之濃度來看，若使用 Gas Filter、Surgical Mask 及 Active Carbon Mask 這三種濾材，操作人員每分鐘仍可吸入總數高達 8×10^7 ~ 1.59×10^8 $\#/min$ 的微粒，如使用 R95、N95、P100 以及 Gas filter & P100 四種濾材，則吸入之總濃度則可下將至 5.09×10^6 ~ 1.15×10^7 $\#/min$ 。針對這兩個製程之操作人員建議以 N95 或 R95 以上等級的拋棄式口罩作為個人防護具。

關鍵詞：電漿製程、奈米微粒、作業環境、暴露評估

緒言

奈米技術與奈米產品可能為全球帶來科技長足進步的“光明面”，一直是奈米科技推動者或研究人員所強調的；然而，對其可能為環境或人體健康所帶來的“黑暗面”，卻仍處於未知、不確定的狀態。對於奈米微粒的健康危害評估，研究學者使用生物實驗方法來研究 10~500 nm 的相同材質微粒對人體健康效應的變化，發現越細小的微粒對生物體造成的毒性越強。例如 Oberdörster et al.[1, 2] 與 Donaldson et al.[3] 利用動物實驗，針對鐵氟龍（Teflon）以及二氧化鈦（ TiO_2 ）奈米微粒的健康危害進行研究，結果顯示在相同的質量濃度下，50

nm 的微粒造成組織發炎（inflammatory）的現象顯著地較 500 nm 的微粒還嚴重。Donaldson et al.[4] 研究比較三種材質的奈米粉體，黑碳（carbon black, CB）、二氧化鈦（ TiO_2 ）及聚酯乳膠（latex）的健康危害效應。結果顯示三種材質的超細微粒所造成的發炎現象遠高於細微粒。Oberdörster 指出，超細微粒所造成的發炎現象遠高於細微粒的主要原因是微粒的接觸表面積顯著增加的關係。Oberdörster[5] 更進一步發現，剛生成的奈米微粒（Teflon fume, 15nm, $50\mu g/m^3$ ）毒性遠遠高於已生成一段時間的奈米微粒 [6]。根據劑量關係（dose-response）的研究成果，Lison et al.[7] 指出不可溶的二氧化錳（ MnO_2 ）微粒之毒性與生物體表面接觸面

民國 94 年 2 月 17 日收稿，94 年 10 月 26 日修訂，94 年 10 月 14 日接受

通訊作者：簡弘民，工業技術研究院能源與環境研究所，310 新竹縣竹東鎮中興路 4 段 195 號 32 館。

e-mail: hmchein@itri.org.tw

積 (particle surface area) 有直接相關，顯示表面化學反應在毒性引發作用中，扮演關鍵性角色。這樣的研究結果，對於奈米材料製程的從業人員，具有相當重要的啟示意義，對於作業環境與員工個人保護，不可不慎 [8]。

美國國家職業衛生安全研究所 (NIOSH) 表示，由於奈米材料製造業為一全新的產業，對於健康影響的研究文獻資料十分短缺，雖然相關研究迄今認為奈米材料會有一些影響，但科學家們現在才正在設法明白這些影響的程度。美國職業安全衛生署 (OSHA) 則尚未公佈相關的具體準則來提供給有關奈米技術產業之雇主作為工作場所之規範。OSHA 的相關單位開始正視這些問題，並且設法找出相關的研究資訊，以便幫助作業人員去遵循相關工作場所之衛生安全計畫。雇主們目前應該暫時依循 OSHA 現有的作業場所的健康與安全維護規範，因為這些規範可以適用於大部分的產業中，在更新的規範研擬出來以前能使作業人員的傷害降到最低。美國陸軍對 TiO₂ 煙霧毒性進行全面性檢視結果發現，顯著的毒性效應伴隨著吸入超細 TiO₂ 煙霧而產生，但不會發生在較大顆粒的 TiO₂ 中。他們建議 TiO₂ 奈米微粒的安全暴露限值 (safe exposure limits) 至少應低於常態 TiO₂ 微粒暴露限值的八分之一 [9]。

國內目前針對懸浮微粒的健康危害管制都是基於質量濃度 (mg/m³) 來管制的。如勞委會公告的作業環境容許濃度標準針對了四類粉塵進行管制，分別為含游離二氧化矽 10% 以上之礦物性粉塵、未滿 10% 游離二氧化矽之礦物性粉塵、石棉纖維與厭惡性粉塵四大類，此類別之厭惡性粉塵的 PEL 為 5 mg/m³ 或是總粉塵量

為 10 mg/m³，環保署則對於一般大氣中懸浮微粒 (PM₁₀) 訂定標準為 125 μg/m³ (24 小時值)。目前台灣主要使用質量濃度來管制作業環境之可呼吸性粉塵，但是根據 Vincent[10] 研究結果顯示，奈米微粒必須以數目濃度 (#/cm³) 來管制才是適當的。因為超細微粒所造成的發炎現象與微粒的接觸表面積有直接正比的關係，而目前尚無表面積即時監測的方法，所以本研究採用數目濃度的監測值來間接代表表面積的大小。

方法

本研究中使用掃描式電移動微粒分析儀 (Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS)，SMPS 是由靜電分離器 (Electrostatic Classifier, TSI 3080L) 與超細微粒核凝計數器 (Ultrafine Condensation Particle Counter, UCPC, TSI 3025A) 組合而成。Electrostatic Classifier 主要元件為差分電移動度分析儀 (Differential Mobility Analyzer, DMA) 主要原理是利用高度擴散離子帶電 (diffusion ion charging) 以及微粒電移動特性 (electrical mobility) 篩選微粒，並且結合 UCPC 來量測懸浮於氣體中的微粒數目濃度，最後得到多徑分佈之數目濃度，本研究之量測範圍在 15 至 661 nm 之間，儀器反應時間需 135 秒 [11]，整套監測系統之裝置圖如圖 1 所示。採樣地點與可能之污染源暴露位置之距離小於 1 公尺。

研究中所評估的兩個小型量產奈米粉體製程，為「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」 (Direct-Current Plasma Nanopowder Manufacture

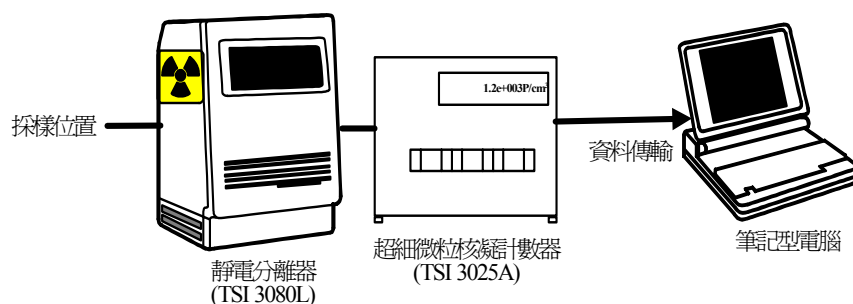


圖 1 SMPS 監測系統設置圖

Process) 與「微波電漿反應製造奈米粉體製程」(Microwave Plasma Reaction Nanopowders Manufacture Process)。「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」是以直流電漿提供合成過程反應所需的能源，反應器之最高淨輸出功率為 150 KW，最高反應溫度可達 10000 °C，電漿在反應區內形成電漿射流，其速度依電漿功率、電漿氣體種類、流速等控制，將先驅物噴入電漿中反應，使其產生化學反應，在奈米級生成物以同質成核 (Homogenous nucleation) 方式形成後，隨即用大量的空氣快速冷卻 (進一步氧化) 奈米氧化物粒子，以控制其成長速率，整個反應約在 10^{-2} ~ 10^{-1} 秒內完成，本技術之流程簡圖如圖 2 所示，在適當的條件下，可獲得各種結構之奈米氧化物粉體，最大產量可達 2 kg/hr。而製程所產生之廢氣先經過旋風集塵器粗篩後，再經過濾袋屋截取奈米粉體成品，最後經過水洗塔處理後排出 [12]。

「微波電漿反應製造奈米粉體製程」是利用微波電漿作為粉體合成能量之來源，其功率可達五千瓦，微波的頻率是 2450 MHz。可使用液體或粉體進料，而粉體進料最合適的粒徑大約在 1~10 μm 左右，製得的粉體大小介於 10~100 nm 之間。本製程有三個特點，第一為反應溫度可達 3000 °C，此高溫反應可提高產量並使前驅物 (precursor) 有更多的選擇。其次這個製程的工作壓力在常壓下，對於 100 nm 左右的粉體產量約可達 100 g/hr，第三個特點為產生的奈米粉體粒徑分佈較窄。操作時依據不同的電漿溫度、濃度、時間、成核速率與晶粒成長速率，可合成不同粒徑之奈米粉體。其製程後端再以特殊設計的濾袋屋收集奈米粉體，其製程廢氣經由水洗滌塔處理後排出，本技術之流程簡圖如圖 3 所示 [12]。

為了解這些製程作業環境是否能符合勞委會所公告的作業環境粉塵標準，研究中針對「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」使用行政院勞委會勞工安全衛生研究所採樣分析參考方法 RM017A，針對作業環境之總粉塵進行採樣分析 [13]，同時使用「可呼吸性個人粉塵採樣器」進行採樣分析，本採樣器經由理論及實驗驗證，採樣流量在 1.7 L/min 時能針對 4 μm (截取直徑) 以下的可呼吸性粉塵進行收集 [14,

15]。

研究中也收集了市售常見的口罩，並根據 NIOSH 42 CRF part 84[16] 及 CNS14755 Z2125[17] 測試方法評估拋棄式防塵口罩濾材之防護效率，測試之條件如表 1 所示，測試系統之設置如圖 4 所示。待測濾材必須事先置於恆溼恆溫箱 (相對溼度 $85 \pm 5\%$ 、溫度 38 ± 2.5 °C) 中，約 25 ± 1 小時後取出，並於 10 小時內測試完畢。濾材取出後剪成 Respirator Holder 的大小，然後放置在 holder 中測試，測試時必須維持濾材表面之流速在 8.5cm/sec，也就是氣體流量維持在 85 lpm 左右 [16, 17]。

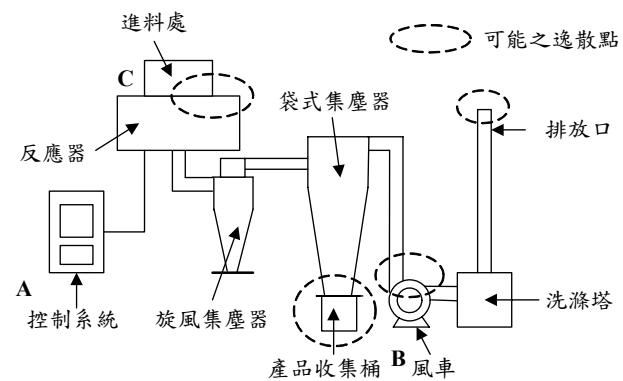


圖 2 直流電漿熱反應製造奈米粉體流程圖

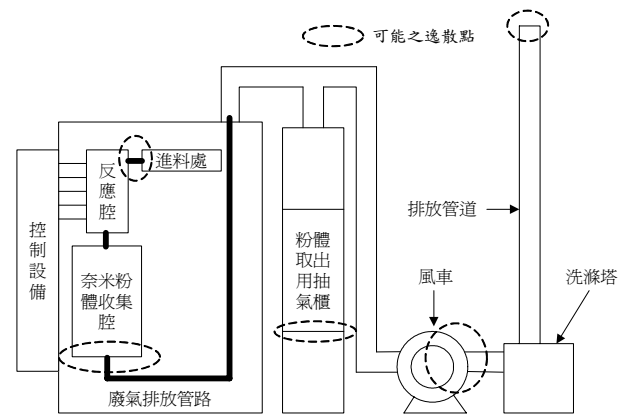


圖 3 微波電漿反應製造奈米粉體製程流程圖

表 1 濾材防護效率測試之條件

項 目	條 件
氯化鈉微粒標準	中位數 (count median diameter, CMD) : $0.075 \pm 0.02 \mu\text{m}$ 幾何標準差 (geometric standard deviation, GSD) : <1.86
微粒帶電特性 (Charged property)	波茲曼平衡 (Boltzmann equilibrium state)
氣體溫度	$25 \pm 5^\circ\text{C}$
氣體濕度	$30 \pm 10\%$
氣體流量	$85 \pm 4 \text{ lpm}$

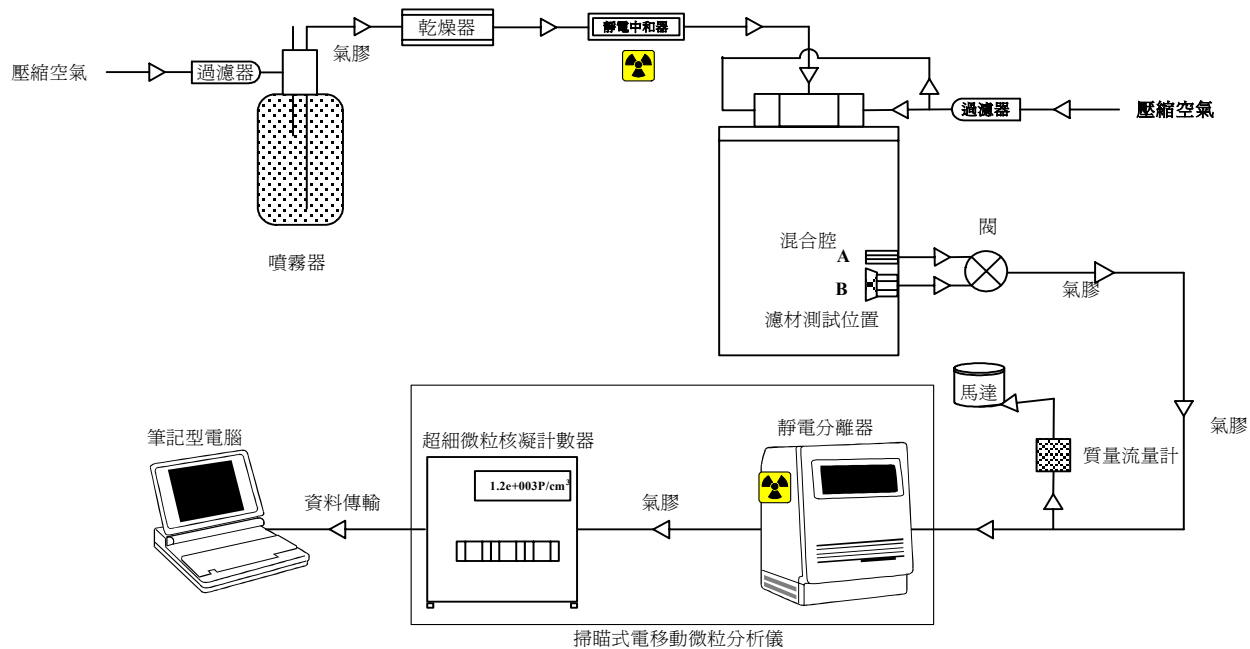


圖 4 口罩測試之實驗設置圖 [11]

結果與討論

本研究針對四個不同地點進行奈米微粒濃度的評估，分別為「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境」、「微波電漿反應製造奈米粉體製程作業環境」、「工研院環境奈米實驗室」與「大氣環境」進行採樣評估。

針對「大氣環境」背景值的採樣中，採樣設備放置在工研院內一塊長 140 公尺、寬 100 公尺的草皮中央，草皮外側即為馬路，四周建築物高度約在 15 公尺左右，從早上 10:30 連

續監測至下午 3:30，共 5 個小時，採樣當日天氣十分晴朗，能見度不錯。大氣環境中奈米微粒 ($< 100 \text{ nm}$) 平均數目濃度約為 $22756 \pm 3642 \text{ \#/cm}^3$ ，由圖 5 發現，從早上 10:30 分時起，奈米微粒 ($< 100 \text{ nm}$) 的數目濃度在 15000 \#/cm^3 以下，當中午 12:00 氣溫由 32°C 提升至 38°C 時，奈米微粒的數目濃度則升高至 30000 \#/cm^3 左右，增加了將近一倍，接近下午 3:00 以後，隨著溫度的下降奈米微粒的數目濃度也隨之下降，由圖 6 中顯示，在中午時大於 100 nm 微粒只增加了 3000 \#/cm^3 左右，而且大於

100 nm 微粒的分佈十分穩定，但奈米微粒分佈則明顯受到空氣中某些污染物因太陽光照射所產生的光化學反應的影響，造成環境中奈米微粒數目濃度上昇較為劇烈。

對於「環境奈米實驗室」的連續監測，目的在了解普通實驗室中奈米微粒的分佈情形，圖 7 是從早上 9:00 至下午 15:20 的監測結果，奈米微粒平均數目濃度為 $11966 \pm 2332 \text{ \#/cm}^3$ ，此作業環境並沒有奈米粉體的製程，僅有極少量奈米微粒的產生與其它相關的實驗，故其奈米微粒最高之數目濃度約為 17000 \#/cm^3 左右。

圖 8 是針對「微波電漿反應製造奈米粉體製程作業環境」所進行的評估，在上午 9:00 至 9:30 之間作業環境中除採樣人員的走動外，無其它作業人員與製程的運轉，這個期間奈米微粒平均數目濃度為 14071 \#/cm^3 ，上午 9:30 以後作業人員陸續進入工作場所開始進行製程的運轉，製程持續運轉至上午 11:00 左右，所有製程結束工作人員陸續離開此場所，製程運轉期間奈米微粒平均數目濃度為 $25255 \pm 4705 \text{ \#/cm}^3$ ，比製程未運轉前增加 11000 \#/cm^3 左右。比較製程未運轉與運轉時微粒分佈的狀況，則發現運轉時奈米微粒數目濃度的最高峰粒徑在 49.6 nm，其濃度比製程未運轉時高出 2.5 倍，而未運轉時奈米微粒數目濃度的最高峰粒徑則在 59.4 nm，如圖 9 所示。顯示本製程的運轉的確有較多小粒徑之奈米微粒產生而造成最高峰粒徑的移動。

對於「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境」的評估中，當作業環境中僅有操作人員在進行一些例行性的工作時，由上午 9:00 至 12:00 連續監測三個小時如圖 10 所示，奈米微粒平均數目濃度為 $9918 \pm 1546 \text{ \#/cm}^3$ ，圖 11 則表示製程運轉時濃度的分佈，製程在下午 1:30 開始運轉，顯示作業環境中的奈米微粒會隨著製程持續運轉而逐漸增加，到下午 3:15 時製程停止運轉之後作業環境中的奈米微粒數目濃度也慢慢的下降，製程運轉時奈米微粒平均數目濃度為 $22774 \pm 3672 \text{ \#/cm}^3$ ，比製程未運轉前增加 13000 \#/cm^3 左右。若比較製程未運轉與運轉時微粒分佈的狀況，在超過 150 nm 以上的微粒在未運轉與運轉時幾乎相同，但製程

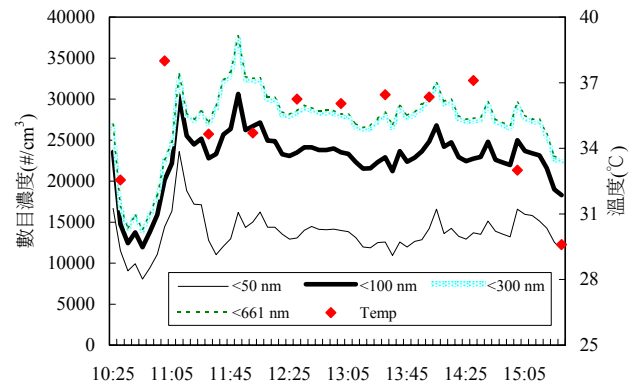


圖 5 「大氣環境」微粒數目濃度與溫度關係圖

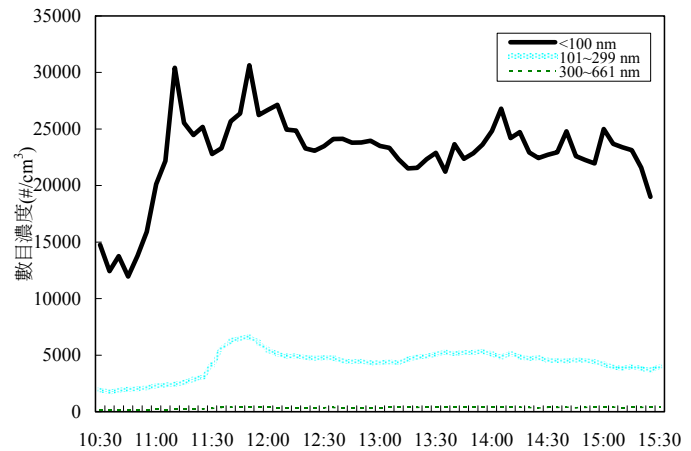


圖 6 「大氣環境」微粒數目濃度分徑圖

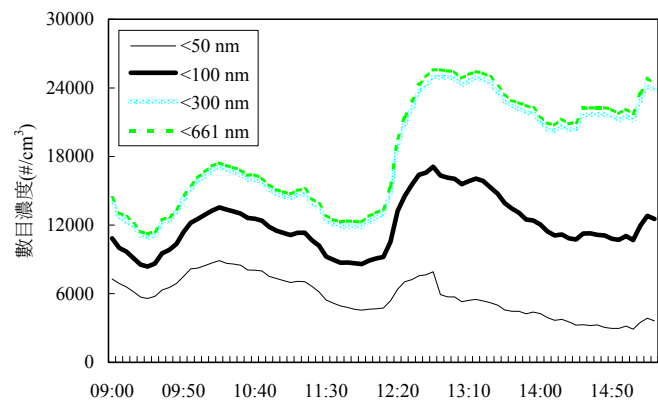


圖 7 「環境奈米實驗室」微粒數目濃度分佈圖

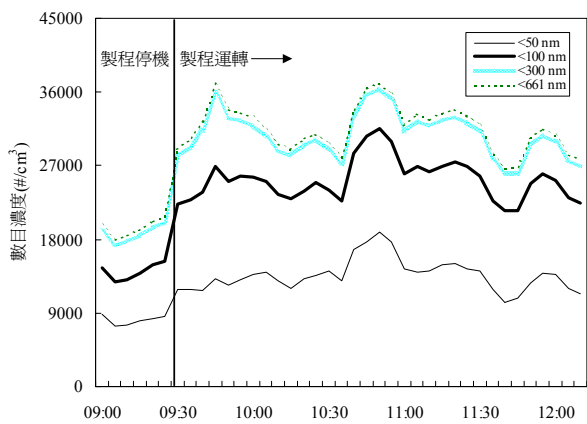


圖 8 「微波電漿反應製造奈米粉體製程作業環境」微粒數目濃度分佈圖

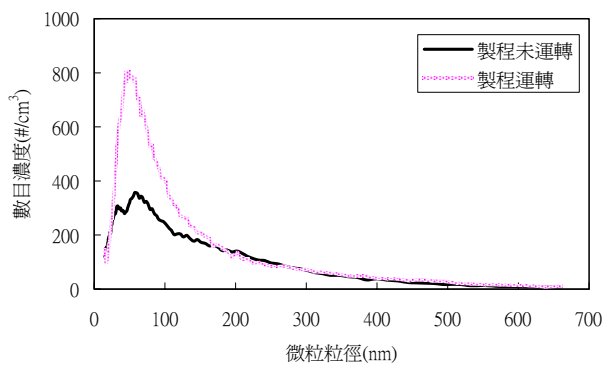


圖 9 「微波電漿反應製造奈米粉體製程」未運轉與運轉期間微粒數目濃度分佈圖

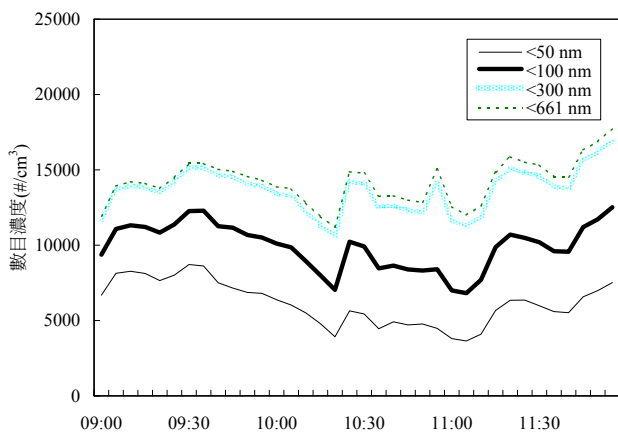


圖 10 「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境」製程未運轉時微粒數目濃度分佈圖

運轉時在奈米微粒的部分則明顯比未運轉時高出數倍之多，未運轉時微粒粒徑在 30 至 70 nm 的數目濃度幾乎相同，製程運轉後微粒的最高數目濃度落在粒徑為 38.5 nm 的地方，如圖 12 所示。顯示本製程所產生的奈米微粒明顯影響到作業環境的數目濃度分佈，由 SMPS 監測不同地點的微粒數目濃度如表 2 所示。研究中也針對製程環境中的操作控制處 (A)、粉體收集與風車運轉處 (B) 與機台處 (C) 三地點同時做總粉塵與可呼吸性粉塵的採樣，結果顯示 A、B、C 三點的總粉塵濃度分別為 0.603 mg/m³、

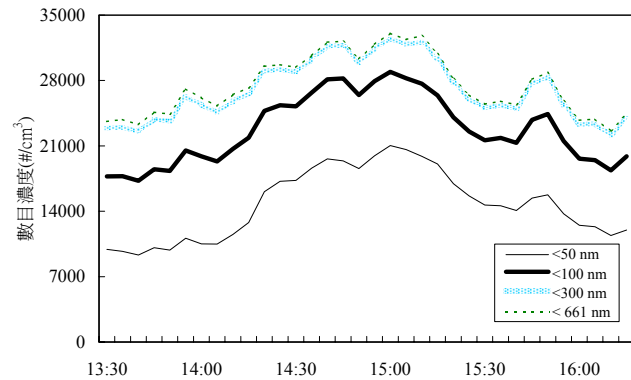


圖 11 「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境」製程運轉時微粒數目濃度分佈圖

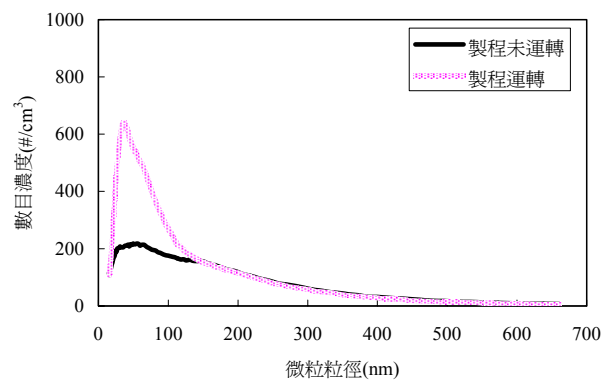


圖 12 「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」未運轉與運轉期間微粒數目濃度分佈圖

0.481 mg/m³、1.84 mg/m³，可呼吸性粉塵則分別為 0.44 mg/m³、0.373 mg/m³、0.351 mg/m³，顯示在機台處 C 的總粉塵濃度為三個採樣點中最高，可呼吸性粉塵在 A、B、C 三個地點的差距不大，濃度最高與最低僅差 0.089 mg/m³，且上述之濃度皆符合目前行政院勞委會所制訂的作業環境總粉塵 (< 10 mg/m³) 與可呼吸性粉塵 (< 5 mg/m³) 的標準。

研究中依據在市面上隨機買進的口罩濾材進行測試，共七種類型的濾材，分別為：

- 平面手術用口罩 (Surgical mask)。

- 平面活性炭口罩 (Active carbon mask)。
- R95 口罩 (內含活性炭，對於微粒去除效率需達 95 % 以上)。
- N95 口罩 (對於微粒去除效率需達 95 % 以上)。
- P100 濾罐 (對於微粒去除效率需達 99.97 % 以上)。
- Gas filter 濾罐 (去除有機氣體)。
- Gas filter & P100 濾罐 (結合 Gas filter 與 P100)。

測試結果如圖 13 所示，所有濾材中效率最

表 2 SMPS 所監測之各個環境微粒平均數目濃度表

粒徑 (nm)	大氣環境 (#/cm ³)	環境奈米實驗室 (#/cm ³)	微波電漿反應製造奈米粉體製程作業環境製程未運轉時 (#/cm ³)	微波電漿反應製造奈米粉體製程作業環境製程運轉時 (#/cm ³)	直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境製程未運轉時 (#/cm ³)	直流電漿熱反應製造奈米粉體製程作業環境製程運轉時 (#/cm ³)
≤ 50	13766 ± 2401	5734 ± 1742	8117 ± 575	13607 ± 2704	6157 ± 1453	14755 ± 3736
< 100	22756 ± 3642	11966 ± 2332	14071 ± 995	25255 ± 4705	9918 ± 1546	22774 ± 3672
< 300	27040 ± 4490	18033 ± 4689	18699 ± 1073	30772 ± 5115	13649 ± 1444	26964 ± 3244
< 661	27379 ± 4541	18511 ± 4791	19391 ± 1071	31585 ± 5163	14209 ± 1450	27518 ± 3198

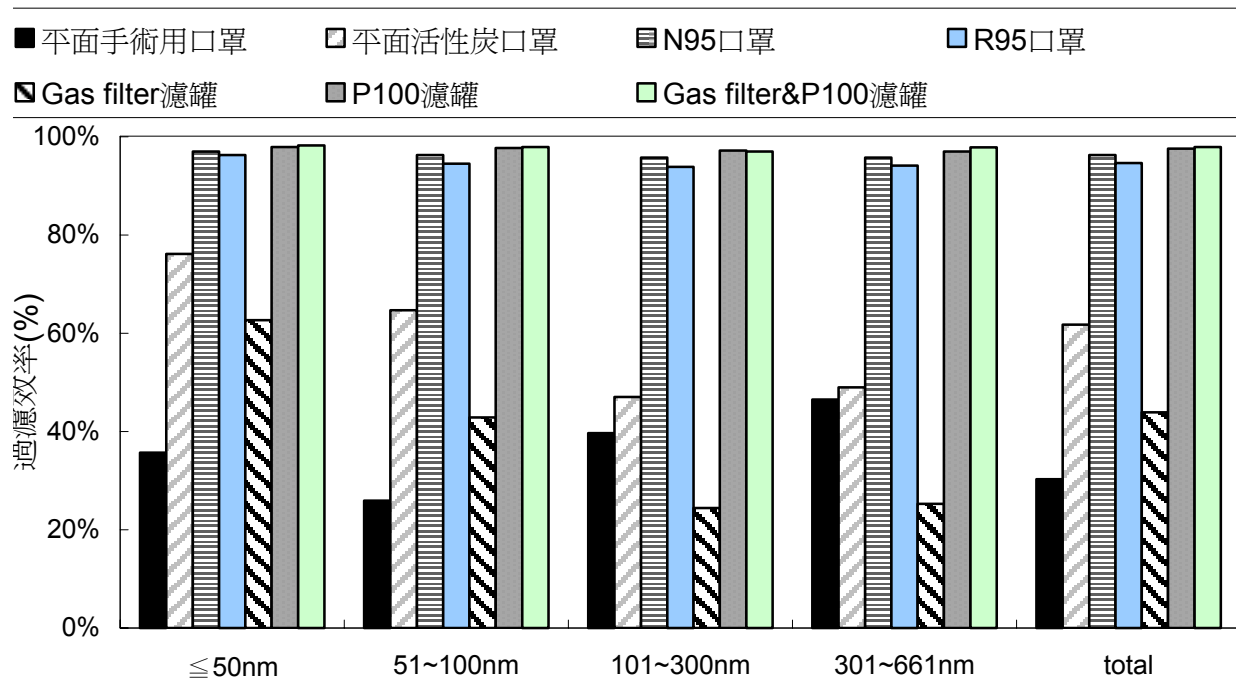


圖 13 濾材微粒過濾效率測試結果分析圖

差者為平面手術用口罩濾材，它在粒徑小於 100 nm 的微粒過濾效率只有 28.8 %，整體之總過濾效率亦只有 30.3 % 左右。而活性碳口罩濾材在粒徑小於 50 nm 時，其防護效率最高，可達 76.1 %，但整體效率只有 61.7 %。95 等級的口罩濾材，以 N95 口罩濾材效率較佳，不論在大微粒（粒徑 100 nm 以上）或小微粒（粒徑 100 nm 以下）其效率皆可達 95 % 以上，整體效率則達 96.3 %。R95 口罩濾材之效率則較 N95 口罩濾材稍差，其中在粒徑小於 50 nm 時的效率最好可達 96.3 %，而在粒徑介於 101~300 nm 間之效率最差只有 93.8 %，總體效率則達 94.7 %，與 95 % 的效率相差 0.3 %。在濾罐濾材方面，臭味氣體濾罐濾材對氣懸微粒的總防護效率只有 43.9 %，但在小微粒時其效率則較高，在 50 nm 以下時效率可達 62.7 %。而 P100 濾罐濾材在理論上其過濾效率應達 99.97 %，但測試之結果其總過濾效率只有 97.6 %。而當 Gas filter 及 P100 兩個濾罐濾材串聯使用時，其防護效率也只較 P100 稍稍提高到 97.9 % 而已。本研究針對奈米微粒防護效率測試結果的分析，如純粹以粒徑大小來看而不考慮濃度時，N95 口罩、R95 口罩或 P100 濾罐之濾材使用在奈米粉體製程時，不論其粒徑大小其防護效率均可達 94 % 以上，是較適合作為製造奈米粉體製程防護器具濾材之用。而平面手術用口罩及活性碳口罩之濾材則因為防護效率偏低，較不適合。

根據 NIOSH 42 CRF part 84 及 CNS14755 Z21255 之測試方法分析及製程環境奈米微粒濃度監測之結果，我們可以推估出在上述 Direct-Current Plasma Reaction process and Microwave Plasma Reaction process 中，如操作人員使用測試的濾材後，其可能吸入體內之奈米粉體的濃度，推估之結果如表 3 所示，表中所推估出來的結果係假設口罩之密合度為 100%。表中 $\#/cm^3$ 為微粒在空氣中之體積數目濃度，而 $\#/min$ 則為操作人員每分鐘吸入的微粒數目（根據呼吸模擬器一般呼吸型態之設定：潮氣容積為 500 ml，頻率為 15 次 /min，故每分鐘之呼吸量為 7500 ml 換算而來）。以吸入的微粒數目濃度來看，即使使用 Gas filter 濾罐、平面手術用口罩及平面活性碳口罩這三種濾材，操作人員每分鐘仍可吸入總數高達 $8 \times 10^7 \sim 1.59 \times 10^8$

$\#/min$ 的微粒，如使用 R95 口罩、N95 口罩及 P100 濾罐三種吸入之總濃度則可下降至 $5.09 \times 10^6 \sim 1.15 \times 10^7 \#/min$ 。以濃度的觀點來看，R95 口罩、N95 口罩及 P100 濾罐對於濃度的削減有很大的作用，是較適合於奈米粉體製程的防護器具。而當評估的兩個製程在操作時，小粒徑（ $<100 \text{ nm}$ ）之微粒逸散的濃度遠高於大微粒（ $>300 \text{ nm}$ ），所以如純粹以濃度評估的結果來看 Gas filter 濾罐、平面手術用口罩及平面活性碳口罩這三種濾材是不適合於這兩個製程的。另外密合度對於防護器具在使用時真正的防護效率有一定之影響，一般來說密合度越高的防護器具對防護的效果有提升的作用。相對的一般平面之口罩之密合度較差，但舒適感較佳，而杯狀口罩之密合度則次之。在測試的濾材中以 P100 濾罐、Gas Filter 濾罐以及 Gas filter & P100 濾罐三種所用的防護面罩密合度最好，杯狀的 R95 及 N95 口罩密合度次之，密合度最差的為平面手術用口罩及平面活性碳口罩。

結 論

本研究發現「大氣環境」的奈米微粒濃度與大氣的溫度及陽光照射所形成之光化學反應可能有關。「工研院環境奈米實驗室」的奈米微粒濃度則較低也較穩定，推測是因為室內溫度起伏不如室外劇烈，奈米微粒的產生來源較少而造成的結果。

「直流電漿熱反應製造奈米粉體製程」與「微波電漿反應製造奈米粉體製程」的作業環境皆會受到製程的運轉而使奈米微粒的數目濃度明顯上升，但微粒質量濃度又低於勞委會所管制的總粉塵與可呼吸性粉塵濃度，因此在相關單位無法提供奈米微粒之數目濃度之上限標準時，操作人員在進行操作時，需建立標準化作業程序，並且設置及配戴相關防護裝備，以保護員工健康。兩製程最好能選用適合處理奈米微粒的防制設備，或是提升奈米粉體成品的收集效率，減少奈米微粒的排放。

在口罩濾材測試的結果中發現，R95 口罩、N95 口罩及 P100 濾罐濾材對於奈米微粒的削減有很大的作用，較適合作業人員於奈米粉體製程的中使用。若針對上述兩個製程中，因為

表 3 推估電漿奈米粉體製程人員使用測試濾材後仍吸入體內之奈米微粒濃度

製程狀態	粒徑 (nm)	未經口罩過濾		平面手術用口罩		平面活性碳口罩		N95 口罩	
		#/cm ³	#/min ¹	#/cm ³	#/min	#/cm ³	#/min	#/cm ³	#/min
直流電漿熱反應 製造奈米粉體製 程作業環境製程 運轉時	≤ 50	14755	1.11 × 10 ⁸	9489	7.12 × 10 ⁷	3522	2.64 × 10 ⁷	444	3.33 × 10 ⁶
	51~100	8019	6.01 × 10 ⁷	5943	4.46 × 10 ⁷	2834	2.13 × 10 ⁷	302	2.27 × 10 ⁶
	101~300	4190	3.14 × 10 ⁷	2529	1.90 × 10 ⁷	2220	1.67 × 10 ⁷	179	1.34 × 10 ⁶
	301~661	554	4.16 × 10 ⁶	296	2.22 × 10 ⁶	283	2.12 × 10 ⁶	24	1.77 × 10 ⁵
	Total	27518	2.06 × 10 ⁸	18257	1.37 × 10 ⁸	8859	6.64 × 10 ⁷	948	7.11 × 10 ⁶
微波電漿反應製 造奈米粉體製程 作業環境製程運 轉時	≤ 50	13607	1.02 × 10 ⁸	8750	6.56 × 10 ⁷	3248	2.44 × 10 ⁷	409	3.07 × 10 ⁶
	51~100	11648	8.74 × 10 ⁷	8632	6.47 × 10 ⁷	4116	3.09 × 10 ⁷	439	3.29 × 10 ⁶
	101~300	5517	4.14 × 10 ⁷	3330	2.50 × 10 ⁷	2924	2.19 × 10 ⁷	235	1.76 × 10 ⁶
	301~661	813	6.10 × 10 ⁶	435	3.26 × 10 ⁶	415	3.11 × 10 ⁶	35	2.60 × 10 ⁵
	Total	31585	2.37 × 10 ⁸	21147	1.59 × 10 ⁸	10703	8.03 × 10 ⁷	1118	8.39 × 10 ⁶

製程狀態	粒徑 (nm)	R95 口罩		Gas filter 濾罐		P100 濾罐		Gas filter & P100 濾罐	
		#/cm ³	#/min	#/cm ³	#/min	#/cm ³	#/min	#/cm ³	#/min
直流電漿熱反應 製造奈米粉體製 程作業環境製程 未運轉時	≤ 50	551	4.13 × 10 ⁶	5507	4.13 × 10 ⁷	311	2.33 × 10 ⁶	268	2.01 × 10 ⁶
	51~100	442	3.31 × 10 ⁶	4585	3.44 × 10 ⁷	187	1.40 × 10 ⁶	170	1.27 × 10 ⁶
	101~300	258	1.94 × 10 ⁶	3167	2.38 × 10 ⁷	120	8.96 × 10 ⁵	127	9.53 × 10 ⁵
	301~661	33	2.45 × 10 ⁵	414	3.11 × 10 ⁶	17	1.25 × 10 ⁵	12	9.01 × 10 ⁴
	Total	1283	9.62 × 10 ⁶	13673	1.03 × 10 ⁸	634	4.75 × 10 ⁶	577	4.32 × 10 ⁶
微波電漿反應製 造奈米粉體製程 作業環境製程未 運轉時	≤ 50	508	3.81 × 10 ⁶	5078	3.81 × 10 ⁷	287	2.15 × 10 ⁶	247	1.85 × 10 ⁶
	51~100	642	4.81 × 10 ⁶	6660	5.00 × 10 ⁷	272	2.04 × 10 ⁶	246	1.85 × 10 ⁶
	101~300	340	2.55 × 10 ⁶	4170	3.13 × 10 ⁷	157	1.18 × 10 ⁶	167	1.26 × 10 ⁶
	301~661	48	3.59 × 10 ⁵	608	4.56 × 10 ⁶	24	1.83 × 10 ⁵	18	1.32 × 10 ⁵
	Total	1537	1.15 × 10 ⁷	16516	1.24 × 10 ⁸	740	5.55 × 10 ⁶	678	5.09 × 10 ⁶

註 1：根據呼吸模擬器一般呼吸型態之設定，潮氣容積為 500 mL，頻率為 15 次/min，故每分鐘之呼吸量為 7500 mL。#/cm³ 為微粒之數目濃度，#/min 為每 min 吸入微粒之數目。

註 2：假設口罩密合度為 100 %。

小微粒逸散數量遠高於大微粒，故操作人員較適合配戴 N95 或 R95 以上等級的杯狀口罩作防護，針對奈米粉體大量生產製程的操作人員，仍建議使用 N95 或 R95 以上等級之口罩較為適當。

誌 謝

本研究承蒙行政院環保署科技顧問室及經

濟部技術處經費贊助，謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, et al. Role of the alveolar macrophage in lung injury: studies with ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives* 1992; 97: 193-9.
- [2] Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, et al.

- Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles. *Inhalation Toxicology* 1995; 111-24.
- [3] Donaldson K, Li XY, MacNee W. Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury. *Journal of Aerosol Science* 1998; 29: 553-60.
- [4] Donaldson K, Stone V, Gilmour PS, Brown DM, MacNee W. Ultrafine particles: mechanisms of lung injury. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 2000; 358: 2741-9.
- [5] Oberdörster G. Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies. *Phil Trans R Soc Lond A* 2000; 358: 2719-40.
- [6] Chein HM. The feasibility study for monitoring and control of nanoparticles harmfulness. Hsinchu: Center for Environmental Safety & Health Technology Development, Industrial Technology Research Institute; 2002.
- [7] Lighty JS, Veranth JM, Sarofim AF. 2000 Critical review-combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health. *Journal of Air & Waste Manage. Assoc* 2000; 49: 116-24.
- [8] Chein HM, Hsu YD, Hsu LY, Chen TM, Wu HH, Hunag CC. Project report of nanotechnologies apply in the environmental protection. Hsinchu: EPA/Center for Environmental Safety & Health Technology Development, Industrial Technology Research Institute; 2003.
- [9] Commission on Life Sciences (CLS). Toxicity of Military Smokes and Obscurants. volume 2. National Academies Press; 1999.
- [10] Vincent JH editors. Health-Related Measurement of Very, Very Small Particles. Particle Size-selective Sampling for Particulate Air Contaminants, Cincinnati: ACGIH; 1998.
- [11] Chen TM, Chein HM. Nanoparticles generation and monitoring - applications of the test for efficiency of control and protection. Hsinchu: Center for Environmental Safety & Health Technology Development, Industrial Technology Research Institute; 2003.
- [12] Nanotechnology Research Center (NTRC). Taiwan Nanotechnology. Hsinchu: Industrial Technology Research Institute; 2003.
- [13] <http://www.iosh.gov.tw/index.html> , 行政院勞委會勞工安全衛生研究所。
- [14] Tsai CJ, Shiau HG, Shih TS. Effect of Deposited Particles and Particle Charge on The Penetration of Small Sampling Cyclones. *Journal of Aerosol Science* 1999; 30: 313-323.
- [15] Tsai CJ, Shiau HG, Shih TS. Field study of the accuracy of two respirable sampling cyclones. *Aerosol Science and Technology* 1999; 31: 463-72.
- [16] <http://www.cnsonline.com.tw/index.html> , 行政院經濟部標準檢驗局。
- [17] <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators>. National Institute for Occupational Safety and Health, USA.

Environmental Particle Monitoring and Respirator Filtration Efficiency Evaluation for Nanopowder Manufacturing Processes

Hung-Min Chein, Chun-Chao Huang, Tzu-Ming Chen, Eddy Kunag-Yu Chen,
Li-Yeh Hsu, Sheng-Yuan Chen

Center for Environmental, Safety & Health Technology Development, Industrial Technology Research Institute

Abstract

This research focused on the exposure evaluation of the working environment of two small-scale plasma nanopowder manufacturing processes, the Direct-Current Plasma Nanopowder Process (the direct-current process) and the Microwave Plasma Reaction Nanopowders Process (the microwave process). The average number concentration for the operating processes was 25255 ± 4705 and 22774 ± 3672 #/cm³ for the direct-current process and the microwave process, respectively. The average number concentration during shut-down periods was 14071 ± 995 and 9918 ± 1546 #/cm³ for the direct-current process and the microwave process, respectively. At the same time, the average number concentration was 11966 ± 2332 and 22756 ± 3642 #/cm³ in the environment of the Environmental Nanotechnology Research Laboratory, ITRI and the ambient environment, respectively.

This research also evaluated the particle filtration efficiencies of respirator materials randomly selected from different types. The protection efficiencies for particle exposure by using N95, R95, P100, Gas filter and P100 were quite high. An operator inhaled about 8.0×10^7 ~ 1.6×10^8 particles per minute, even when wearing a gas filter, surgical mask or active carbon mask. However, the total concentration of inhalations decreased to 5.1×10^6 ~ 1.2×10^7 #/min, if the operator wore a N95, R95, P100 or Gas filter and P100. For these two processes, it is suggested that operators put on a disposal mask such as N95, R95 or higher grade to achieve better protection.

Keywords: Plasma Manufacturing Process, Nanoparticle, Working Environment, Exposure Evaluation

Accepted 14 October, 2005

* Correspondence to: Hung-Min Chin, Energy & Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute, Bldg. 32, #195, Sec. 4, Chung Hsing Rd. Chutung, Hsinchu, Taiwan 310. e-mail: hmchein@itri.org.tw