

作業環境原料與空氣中二氧化矽 濃度相關性暴露研究

A Study of Occupational Exposure and Correlation between Crystalline Silica Contents in Raw Materials and Those in Airborne Dusts at Workplaces

ILOSH



勞動部勞動及職業安全衛生研究所

INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR

作業環境原料與空氣中二氧化矽濃度相
關性暴露研究

**A Study of Occupational Exposure and
Correlation between Crystalline Silica
Contents in Raw Materials and Those in
Airborne Dusts at Workplaces**

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

作業環境原料與空氣中二氧化矽濃度相關性暴露研究

A Study of Occupational Exposure and Correlation between Crystalline Silica Contents in Raw Materials and Those in Airborne Dusts at Workplaces

研究主持人：鐘順輝、錢葉忠

計畫主辦單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

研究期間：中華民國 109 年 1 月 1 日至 109 年 12 月 31 日

本研究報告公開予各單位參考
惟不代表勞動部政策立場

勞動部勞動及職業安全衛生研究所
中華民國 110 年 6 月

摘 要

本研究係針對原料與空氣中二氧化矽濃度之相關性進行暴露調查，並且調查我國作業場所符合容許暴露標準比率分布實況，以作為我國修訂容許濃度標準及作業環境監測規劃之參考依據。

本研究收集 5 種行業 14 個原料相關樣品，分析結果發現，鑄造業(鑄模砂)、陶瓷業使用之加工生產用砂(多種原料混合)、玻璃業使用之原料矽砂中結晶型游離二氧化矽(石英)之比例平均值 \pm 標準差分別為 $44.41\pm 9.41\%$ 、 $14.99\pm 5.91\%$ 與 $56.95\pm 17.48\%$ ；石材與玻璃加工取得之製程廢砂，其含結晶型游離二氧化矽(石英)之比例較低，分別為 6.98% 及 0.79% 。

對鑄造業、陶瓷業及玻璃製造業各 4 廠進行作業環境監測，共採集現場樣品 186 個，分析其結晶型游離二氧化矽及粉塵濃度，其結果顯示，鑄造業之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵之平均濃度分別為 0.909 ± 0.695 、 0.679 ± 0.646 及 $2.463\pm 2.080\text{mg}/\text{m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.108 ± 0.077 、 0.110 ± 0.180 及 $0.528\pm 0.513\text{mg}/\text{m}^3$ 。其中以脫模區有最高的粉塵及結晶型游離二氧化矽濃度，而原料區次之；陶瓷業之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵之平均濃度分別為 0.354 ± 0.655 、 0.383 ± 1.103 及 $0.605\pm 0.465\text{mg}/\text{m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.124 ± 0.198 、 0.195 ± 0.554 及 $0.326\pm 0.263\text{mg}/\text{m}^3$ 。其中以製胚區所測得之平均粉塵及結晶型游離二氧化矽之濃度最高，其次為釉區與燒成區；玻璃製造業之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵之平均濃度分別為 0.134 ± 0.006 、 0.099 ± 0.080 及 $0.794\pm 1.440\text{mg}/\text{m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.055 ± 0.021 、 0.048 ± 0.027 及 $0.283\pm 0.697\text{mg}/\text{m}^3$ 。其中以原料區濃度較高。

各廠現場收集之原料中結晶型二氧化矽比例與其作業場所空氣粉塵含結晶型二氧化矽比例之間，發現無統計上顯著之相關性，因此，無法以原料之結晶型二氧化矽(石英)比例來推估現場空氣粉塵含二氧化矽暴露濃度。

在環境監測結果與容許濃度比較上，鑄造業、陶瓷業及玻璃製造業等三行業有部

分廠區的區域樣品濃度偏高，超過我國結晶型游離二氧化矽容許暴露標準值，而個人採樣結果，鑄造業有 8 人超過我國容許暴露標準，陶瓷業則有 1 人。但如以較為嚴格之美國 OSHA 現行 PEL (8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$) 為判斷依據，則鑄造業、陶瓷業、玻璃製造業之勞工個人暴露不合格率分別由 53.33% 提高至 73.33% (=11/15)、由 16.67% 提高至 33.33% (=2/6) 及由 0% 提高至 50% (=1/2)；但如改用國際上常用之暴露標準(8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$) 進行判斷，不合格率分別減至 40.00% (=6/15)、16.67% (=1/6) 及 0%，這些增減變化，可做為我國未來修訂結晶型游離二氧化矽容許暴露標準值時之參考。

關鍵詞：結晶型二氧化矽、石英、鑄造業、陶瓷業、玻璃製造業

Abstract

This study's objective is to examine the correlation between the crystalline silica contents in raw materials and those in airborne dusts and to investigate the compliance of worker exposures to permissible levels. These findings are used as a basis for re-evaluating the current permissible exposure level and environmental monitoring strategies for crystalline silica.

Fourteen samples of raw material from five industries were collected during field survey, and results analyzed for crystalline silica contents. The results indicated that the mean \pm standard deviation percentages of crystalline silica (quartz) were $44.41 \pm 9.41\%$, $14.99 \pm 5.91\%$ and $56.95 \pm 17.48\%$ in the moulding silica sand of foundry process, process sand (mixed) for ceramic tile and silica sand for glass, respectively. Conversely, the percentages of crystalline silica (quartz) were 6.98% and 0.79% in the samples collected from residual (waste) sand of stone and glass processing, respectively.

Environmental monitoring was performed on foundry, ceramics and glass manufacturing factories (n=4 for each) and a total of 186 samples were collected. For the foundry, the mean (\pm standard deviation) personal respirable dust, area respirable dust and area total dust concentrations were 0.909 ± 0.695 , 0.679 ± 0.646 and 2.463 ± 2.080 mg/m³, respectively, while the mean personal respirable crystalline silica, area respirable crystalline silica and area total crystalline silica concentrations were 0.108 ± 0.077 , 0.110 ± 0.180 and 0.528 ± 0.513 mg/m³, respectively. De-moulding zone had the highest airborne dust and crystalline silica concentrations, followed by material mixing zone. For ceramics, the mean \pm standard deviation personal respirable dust, area respirable dust and area total dust concentrations were 0.354 ± 0.655 , 0.383 ± 1.103 and 0.605 ± 0.465 mg/m³, respectively, while the mean personal respirable crystalline silica, area respirable crystalline silica and area total crystalline silica concentrations were 0.124 ± 0.198 , 0.195 ± 0.554 and 0.326 ± 0.263 mg/m³, respectively. Initial forming zone had the highest airborne dust and crystalline silica concentrations, followed by glaze-applying and firing zones. For glass manufacturing, the mean personal respirable dust, area respirable dust and area total dust concentrations were 0.134 ± 0.06 , 0.99 ± 0.080 and 0.794 ± 1.440 mg/m³, respectively, while the mean personal respirable crystalline silica, area respirable crystalline silica and area total crystalline silica concentrations were 0.055 ± 0.021 , 0.048 ± 0.027 and 0.283 ± 0.697 mg/m³, respectively.

Material mixing zone had the highest airborne dust and crystalline silica concentrations.

No statistical correlation was found between the crystalline silica contents in raw material samples and crystalline silica concentrations or percentages in the respective air samples. Thus, the crystalline silica contents in raw material are not good indicator of worker exposure levels.

The crystalline silica concentrations in numerous area samples across the three industries, eight personal samples from foundry industry and one personal sample from ceramics factory exceeded the current Taiwan permissible exposure limits for crystalline silica. Nonetheless, the non-compliance rate increases from 53.33% to 73.33% (=11/15), from 16.67% to 33.33% (=2/6), and from 0% to 50% (=1/2) for foundry, ceramics and glass manufacturing industries, respectively, if the PEL of US OSHA (0.05mg/m³ for 8-h TWA respirable quartz) is compared. Furthermore, such non-compliance rate reduces to 40.00% (=6/15), 16.67% (=1/6) and 0% for foundry, ceramics and glass manufacturing industries, respectively, if a more commonly used PEL (0.10mg/m³ for 8-h TWA respirable quartz) is compared. The impacts of such non-compliance rates should be addressed when PEL is reviewed for modification.

Key Words: Crystalline silica, Quartz, Foundry, Ceramics, Glass manufacturing

目次

摘 要.....	i
Abstract	iii
目次.....	v
圖目次.....	vi
表目次.....	vii
第一章 計畫概述.....	1
第一節 背景.....	1
第二節 目的.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
第一節 危害特性.....	4
第二節 職業暴露調查.....	6
第三節 危害評估及管制.....	9
第三章 研究方法.....	14
第一節 現場訪視.....	14
第二節 原料及空氣結晶型游離二氧化矽採樣分析.....	14
第四章 研究結果與討論.....	20
第一節 我國作業場所原料所含二氧化矽成份比率調查.....	20
第二節 作業環境空氣中二氧化矽及粉塵濃度監測調查.....	26
第五章 結論與建議.....	56
第一節 結論.....	56
第二節 建議.....	57
後記.....	59
參考文獻.....	60
附錄一 鑄造業各廠之製程作業特性及採樣點規劃.....	63
附錄二 陶瓷業各廠之製程作業特性及採樣點規劃.....	67
附錄三 玻璃製造業各廠之製程作業特性及採樣點規劃.....	71

圖目次

圖 1 二氧化矽相圖	4
圖 2 粉塵含結晶型二氧化矽重量與強度	18
圖 3 原料中結晶型二氧化矽重量與強度	19
圖 4 同步採集之區域總粉塵及區域可呼吸性粉塵石英佔比相關性	54

表目次

表 1 常見之結晶型游離二氧化矽理化特性	5
表 2 國內針對使用結晶型游離二氧化矽的行業暴露調查彙整	8
表 3 結晶型游離二氧化矽分析方法之比較	10
表 4 常見之原料含結晶型游離二氧化矽百分比	11
表 5 各國結晶型游離二氧化矽容許暴露標準	12
表 6 空氣樣品品管樣品誤差百分比	18
表 7 原料樣品品管樣品誤差百分比	19
表 8 原料樣品之分析變異分析	19
表 9 本研究訪視之事業單位特性及安衛執行現況	20
表 10 本研究中不同行業各廠原料中結晶型游離二氧化矽(石英)比例	25
表 11 鑄造 A 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	28
表 12 鑄造 B 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	29
表 13 鑄造 C 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	30
表 14 鑄造 D 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	31
表 15 鑄造業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	32
表 16 鑄造業作業環境(造模區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	33
表 17 鑄造業作業環境(噴砂區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	34
表 18 鑄造業作業環境(脫模區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	35
表 19 鑄造業作業環境(研磨區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	36
表 20 陶瓷 G 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	38
表 21 陶瓷 H 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	39

表 22 陶瓷 I 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果.....	40
表 23 陶瓷 J 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	41
表 24 陶瓷業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	42
表 25 陶瓷業作業環境(製胚區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	43
表 26 陶瓷業作業環境(釉區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	44
表 27 陶瓷業作業環境(燒成區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	44
表 28 陶瓷業作業環境(其他區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	45
表 29 玻璃製造 K 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	47
表 30 玻璃製造 L 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果.....	47
表 31 玻璃製造 M 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	48
表 32 玻璃製造 N 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果	48
表 33 玻璃製造業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	49
表 34 玻璃製造業作業環境(熔解區)粉塵暴露濃度監測結果彙整	50
表 35 玻璃製造業作業環境(加工區)粉塵暴露濃度監測結果彙	50
表 36 三種不同行業作業環境粉塵暴露濃度中石英佔比統計檢定結果	52
表 37 三種不同行業作業環境粉塵暴露濃度中石英佔比文獻彙整結果	53
表 38 本研究三種行業作業環境石英粉塵符合我國第一種粉塵之比例	55
表 39 本研究三種行業作業環境石英粉塵濃度超過暴露標準統計	55

第一章 計畫概述

第一節 背景

二氧化矽之化學結構式為 SiO_2 ，是由矽與氧原子組成之四面體，由於彼此鍵結力強，可再與其他相同的結構層層堆砌結合，因此不易破壞。在自然界或工業製程中，可因溫度與壓力等外界因素導致矽氧鍵的破裂，重新排列而互相轉換。若結構僅含矽與氧原子，不含其他元素之二氧化矽，則稱之為游離二氧化矽 (Free Silica)。游離二氧化矽包括三種型態：

- 一、結晶型 (Crystalline)：指矽及氧原子於三維空間具一定之排列規則，且原子間具固定距離，因此可形成特定之結晶面。代表物為石英 (Quartz)、方矽石 (Cristobalite)、鱗矽石 (Tridymite) 及硅藻石 (Tripoli)，其中又以石英最常見含量亦最高。
- 二、非結晶型 (Amorphous)：原子間也無固定距離，分子之間亦無一定之排列方式，代表物為蛋白石 (Opal)。
- 三、隱晶型 (Cryptocrystalline)：隱晶型則介於二者之間，代表物為石髓 (Chalcedony) [1-3]。

結晶型游離二氧化矽 (Crystalline Silica) 之化學特性穩定，且溶解度低，進入肺部後便不易排出，而沈積在肺組織內，長期吸入可造成持續進行性的肺纖維化症，即為矽肺症 [4]。短時間內高濃度暴露於可發生急性矽肺症。一般暴露數週至 4-5 年後，可在幾個月至兩年內就發病，發病很快，且不可逆。除此，結晶型游離二氧化矽粉塵沈積在肺組織內後，可造成表皮細胞的損傷以及持續性的炎症。此種炎症反應釋出的物質隨後因氧化反應，最終會產生自由基，而多元不飽和脂肪酸受到自由基的攻擊後，會發生脂質過氧化反應，即可能造成肺間質的基因傷害，導致癌化病變。因此國際癌症研究總署 (IARC) 已證實結晶型游離二氧化矽之致癌性，並在 1997 年將其致癌分級由 Group 2A 改為 Group 1 (確定人類致癌物) [5]。

具潛在性暴露於結晶型游離二氧化矽之職業及作業包括採礦業、採石業、隧道工程、陶瓷、磚窯、耐火磚業、玻璃製造、鑄造噴砂、研磨業、填充劑製造業、石材切割加工及過濾材矽藻土相關作業等。國內相關調查發現，使用結晶型游離二氧化矽的作業場所，職業衛生狀況普遍不佳，因此勞工結晶型游離二氧化矽導致的危害，成為職業衛生上的

重要議題。結晶型游離二氧化矽可引發嚴重的健康效應，且涉及的產業/作業廣泛，故相關作業勞工之暴露狀況，也普遍受到關注。國內曾針對原料砂供應業、耐火磚業、鑄造、窯爐維修/焚化爐拆爐作業、石材切割加工等行業進行勞工粉塵及結晶型游離二氧化矽暴露調查。結果發現，鑄造業、焚化爐拆爐作業及修爐業(煉鐵)出現較高的結晶型游離二氧化矽濃度，而粉塵暴露亦有部分樣本超過容許暴露標準，值得關注。

目前結晶型游離二氧化矽的採樣分析方法主要利用紫外光(UV/Vis)、紅外線(FTIR)及 X 光繞射(XRD)三種檢測原理。其中 XRD 法為 NIOSH 7500 採用之分析原理，而日本 JISA 1481 及我國 CLA4003、4004 方法亦採用 XRD，但使用 25 mm 直徑之濾紙匣與旋風分離器，以及不同濾紙材質（聚四氟乙烯濾紙裱敷玻璃纖維濾紙）。由於現行使用 X 光繞射法之分析方法較不普及，故進行作業環境監測時有時僅採集總粉塵，再藉原物料中之結晶型游離二氧化矽比例(或假設為 100%)進行推估，故可能產生誤差。例如，針對常用工業矽砂中結晶型游離二氧化矽比例之調查中發現，產品標示含結晶型游離二氧化矽之比例均有高估情形[1]。而原物料中結晶型游離二氧化矽所佔之比例與作業環境空氣中粉塵中二氧化矽之比例是否具有相關性，目前並無相關研究，值得探討。

在容許暴露標準的制訂上，國際上多採用定值方式，僅有我國與日本採變動模式，即暴露標準隨結晶型游離二氧化矽的含量比例而降低；美國 OSHA 已於 2019 年將原來採用之變動模式，改為定值(石英、方矽石、磷矽石及硅藻石之可呼吸性粉塵，8 小時日時量平均訂為 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$)。部分國家 (如紐西蘭、瑞典、芬蘭等) 考慮方矽石與磷矽石之毒性較強，而設定較石英嚴格之管制標準 (多為石英的 1/2)。惟先前研究發現，依照我國現行暴露標準，第二種粉塵 (結晶型游離二氧化矽的含量 $<10\%$) 若考慮混合物相加效應，其暴露危害比值總和隨結晶型游離二氧化矽含量增加而增大，亦即當二氧化矽含量超過 8%時，暴露危害比值總和將超過 1(視為超過暴露準)，呈現不合理現象[28]。

第二節 目的

本研究係針對我國作業場所使用原料與空氣中二氧化矽濃度之相關性進行職業暴露調查，並且調查我國作業場所使用含結晶型游離二氧化矽原料符合我國勞工作業場所容許暴露標準粉塵標準比率分布實況，作為我國勞動檢查政策及業界作業環境改善參考依據。

第二章 文獻回顧

本研究針對國際上關於結晶型游離二氧化矽之特性、職業暴露標準及管制作法相關文獻進行收集分析。國內部分以勞動部勞動及職業安全衛生研究所之研究報告、學術期刊及碩博士論文關於結晶型游離二氧化矽之相關研究為主；國際文獻以 Medline 學術資料庫及網路公開資料為文獻資料主要來源，並以關鍵詞 “Free Silica”、“Crystalline silica”、“Quartz”、“Cristobalite”、“Tridymite”、“Tripoli” 等進行檢索，蒐集近 10 年發表之相關文獻進行分析探討。

第一節 危害特性

二氧化矽之化學結構式為 SiO_2 ，是由矽與氧原子組成之四面體，由於彼此鍵結力強，可再與其他相同的結構層層堆砌結合，因此不易破壞。在自然界或工業製程中，可因溫度與壓力等外界因素導致矽氧鍵的破裂，重新排列而互相轉換，於一大氣壓狀態時， α -石英（低溫石英）轉型為 β -石英（高溫石英）的溫度為 573°C ；石英轉變為磷矽石的溫度為 867°C ；磷矽石轉變為方矽石的溫度為 $1,470^\circ\text{C}$ [7]，由此得知，工業製程對游離二氧化矽之暴露型態亦有著相當的影響。常見之游離二氧化矽其轉化關係如圖 1。

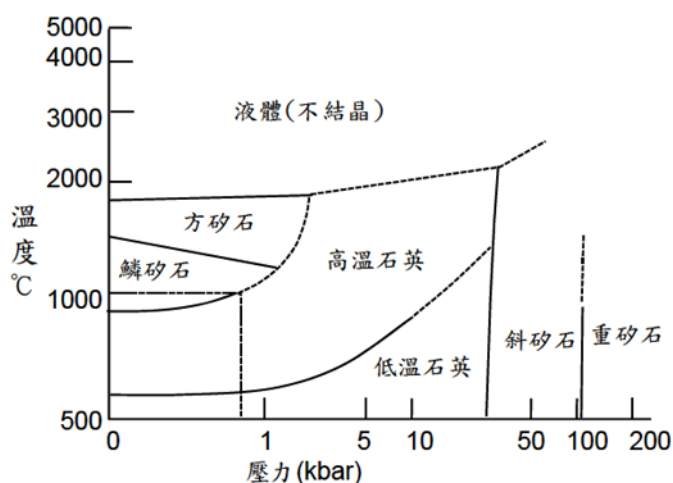


圖 1 二氧化矽相圖

若其組成結構僅含矽與氧原子，為不含其他元素之二氧化矽，則稱之為游離二氧化矽 (Free Silica)。游離二氧化矽包括三種型態(表 1) [8]：

1.結晶型 (Crystalline)：指矽及氧原子於三維空間具一定之排列規則，且原子間具固定

距離，因此可形成特定之結晶面。代表物為石英（Quartz）、方矽石（Cristobalite）、鱗矽石（Tridymite）及硅藻石(Tripoli)，其中又以石英最常見含量亦最高。而較不常見者包括正方矽石（Keatite）、斜矽石（Coesite）及重矽石（Stishovite）。

2.非結晶型（Amorphous）：原子間也無固定距離，分子之間亦無一定之排列方式，代表物為蛋白石（Opal）。

3.隱晶型（Cryptocrystalline）：隱晶型則介於二者之間，代表物為石髓（Chalcedony）[1-3]。

表 1 常見之結晶型游離二氧化矽理化特性

特性	石英	方矽石	鱗矽石
化學文摘編號	CAS# 4808-60-7	CAS # 14464-46-1	CAS # 15468-32-3
分子量	60.09	60.09	60.09
物理特性	透明、淡白色、淡黑色、淡綠色固體	淡白色、淡黃色固體	淡白色固體
結晶型態	六方體或其他型塊狀	常見為八面體，正體較為罕見	為板狀或其他型塊狀
密度	2.65	2.33	2.26
莫式硬度	7.0	6.5	7.0
酸溶解性	只溶於氫氟酸	只溶於氫氟酸	只溶於氫氟酸
有機溶劑溶解性	不溶	不溶	不溶
水溶解性	幾乎不溶	幾乎不溶	幾乎不溶

結晶型二氧化矽之化學特性穩定，且溶解度低，進入肺部後便不易排出，而沈積在肺組織內，長期吸入可造成持續進行性的肺纖維化症，即為矽肺症。短時間內高濃度暴露於可發生急性矽肺症[9]。一般暴露數週至 4-5 年後，可在幾個月至兩年內就發病，發病很快，且不可逆。除此，結晶型游離二氧化矽粉塵沈積在肺組織內後，可造成表皮細胞的損傷以及持續性的炎症。此種炎症反應釋出的物質隨後因氧化反應，最終會產生自由基，而多元不飽和脂肪酸受到自由基的攻擊後，會發生脂質過氧化反應，即可能造成肺間質的基因傷害，導致癌化病變。因此國際癌症研究總署（IARC）已證實結晶型游離二氧化矽之致癌性，並在 1997 年將其致癌分級由 Group2A 改為 Group 1 (確定人類致癌物)[10]。

第二節 職業暴露調查

具潛在性暴露於結晶型游離二氧化矽之職業及作業包括[11-23]: 1.採礦業、採石業；2.隧道工程；3.陶瓷、磚窯、耐火磚業；4.玻璃製造；5.鑄造噴砂；6.研磨業；7.填充劑製造業；8.石材切割加工；9.過濾材矽藻土相關作業。

國內相關調查發現，使用結晶型游離二氧化矽的作業場所，職業衛生狀況普遍不佳，因此勞工結晶型游離二氧化矽導致的危害，成為職業衛生上的重要議題。例如，石材切割加工業因大量使用花崗石，負責切割加工的勞工容易吸入結晶型游離二氧化矽的粉塵；採礦業工作場所中的各種粉塵亦以結晶型游離二氧化矽危害最大，以過去金瓜石金礦為例，二氧化矽的含量達 70-80%，而在煤礦中，岩石掘進工接觸的粉塵也含有較高的二氧化矽；玻璃製造業是將研磨成不同粒徑的矽砂和依不同玻璃產品或顏色需求添加的其它原料、金屬或金屬氧化物混合後，生產玻璃製品，其中矽砂含量約 60-85%；鑄造業在砂模製造、清砂以及磨毛邊等不同作業型態，會產生粒徑大小不一的粉塵，其中亦可能含有游離二氧化矽；陶瓷業所用的原料土有黏土、高嶺土、矽石、長石等，釉料方面，早期使用中、低溫釉，如鉛釉、玻璃釉、灰釉等；耐火磚業依不同產品主要成分有二氧化矽、氧化鋁、氧化鉻、氧化鎂、氧化鐵、氧化鈣、碳化矽等；矽藻土亦含有二氧化矽的成分，其中工業用矽藻土常被應用作為過濾的用途。這些產業若缺乏適當防護作業，勞工均可能暴露於結晶型游離二氧化矽的危害下。幾種高危害行業之作業特性分述如下：

一、鑄造業

鑄造為將熔融的金屬液倒入具特定形狀之鑄模中，待金屬液冷卻凝固後取出其成品(鑄件)，此過程稱為鑄造。常被鑄物質多為銅、鐵、鋁、錫、鉛等金屬物質，而鑄模的材料可為鑄砂、金屬等，因不同要求，其使用的工法也會不同，如砂模鑄造法、金屬模鑄造法與脫蠟法等。

- 1.砂模鑄造法：在模砂中添加黏結劑與硬化劑等，用以製作鑄造所需的模型，而模砂的種類大致可分為天然砂與人工砂兩類，不論是哪一種，其成分皆以結晶型游離二氧化矽為主，因此參與砂模鑄造法的勞工，極有可能暴露於含結晶型游離二氧化矽粉塵的作業環境中。
- 2.金屬模鑄造法：利用熔點較原料高的金屬製作永久模，使用之金屬必須能耐高溫，適用

於大量生產的中小型鑄件，但受制於鑄模的熔點，可被鑄造的金屬也有限制。

- 3.脫蠟法：適用於製造形狀複雜、紋路精細、難以切削加工的零件。先製作出蠟模後，再將耐高溫的耐火材料包模，待包模材料硬化後將模型材料熔出，留下精密的鑄模，而後將熔化的金屬液鑄入鑄模，使其冷卻後將其包模敲碎，取得精密鑄件。

綜合以上鑄造法，得知鑄造業其主要流程包括有：模砂之準備與調配、鑄模製造、熔化金屬、澆鑄至鑄模、拆除鑄模、表面處理(噴砂)。

在鑄造業的製程中，進行澆鑄作業時，溫度高達 1500℃ 以上，理論上，用於砂模中之石英，可能轉變成方矽石或磷矽石，而在先前研究中發現，確實有該物質存在，但其比例最高約為 3%，相對於鑄造業原料砂所含石英多超過 70%而言，比例偏低[6]。

二、陶瓷業

國內的陶瓷工業相當發達，各類陶瓷產品應用於建築、裝潢、日用品，如壁磚、地磚、浴缸、馬桶、瓷器等，依使用功能不同可分為日用陶瓷、藝術陶瓷、建築陶瓷、衛生陶瓷、工業用陶瓷等。而在陶瓷製造業中所使用的原料土有黏土、高嶺土、矽石、長石等，釉料方面，有早期使用的中、低溫釉料，如灰釉，亦有 1,200℃ 以上的中溫及 1,320℃ 以上高溫釉。在此作業場所作業的勞工，若缺乏適當防護具，將可能暴露於含二氧化矽粉塵或其他危害(釉料中的金屬化合物)。陶瓷主要生產流程包括：原料放置、原料粉碎、噴霧乾燥造粉、粉體成型、施釉印刷、燒成、後處理等，其中主要暴露含結晶型游離二氧化矽之作業場所為粉體成型之前段處理流程[25]。

三、玻璃製造業

玻璃製造是將研磨成不同粒徑的矽砂和依不同玻璃產品或顏色需求添加的其它原料（例如：長石、白雲石、石灰石等）、金屬或金屬氧化物（例如： Na_2CO_3 、 K_2CO_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 、 Mn 、 Co 等）混合後，生產液晶螢幕玻璃基板、平板玻璃、玻璃瓶、光纖等玻璃產品，其中矽砂含量約 60~85%。玻璃產品之製造是將矽砂與其它原料混合後，送入熔爐或窯爐中加熱至約 1500℃ 溶解，以抽拉玻璃熔漿或將玻璃熔漿注入模具中製作不同的玻璃產品。生產流程主要包括：(1)原料砂運送；(2)原料存放；(3)進料；(4)原料混合；(5)熔爐或窯爐進料溶解；(6)玻璃熔漿抽拉或壓製成形；(7)退火與冷卻；(8)裁切；(9)包裝存放[26]。

結晶型游離二氧化矽可引發嚴重的健康效應，且涉及的產業/作業廣泛，故相關作業勞工之暴露狀況，也普遍受到關注。國內曾針對原料砂供應業、耐火磚業、鑄造、窯爐維修/焚化爐拆爐作業、石材切割加工、陶瓷、玻璃等行業進行勞工粉塵及結晶型游離二氧化矽暴露調查(表 2)。結果發現，鑄造業、焚化爐拆爐作業及修爐業(煉鐵)出現較高的結晶型游離二氧化矽濃度，而粉塵暴露亦有部分樣本超過容許暴露標準，值得關注。

表 2 國內針對使用結晶型游離二氧化矽的行業暴露調查彙整

行業	粉塵暴露濃度(mg/m ³)	二氧化矽濃度(mg/m ³)	粉塵超過容許暴露濃度比例(超標樣本數/總樣本數)	文獻
	平均值(範圍)	平均值(範圍)		
焚化爐拆爐作業	2.222(0.502-32.198)	0.116(0.020-33.179)	50.98%(26/51)	[2]
清潔靜電集塵	2.807(0.873-3.80)	0.250(0.061-0.512)	75.0%(3/4)	
搭架	1.281(0.628-2.322)	0.116(0.041-0.202)	83.33%(5/6)	
堆砌與修補	1.902(0.848-4.542)	0.247(0.080-0.712)	88.89%(8/9)	
鑄造業 (個人採樣)	3.331(0.05-14.43)	--	熔爐區 28.6%,翻砂區 16.7%, 其他區 57.1%	[3]
鑄造業 (區域採樣)	2.568(0.05-12.61)	--		
呔喃造模	0.508(0.317-17.50)	0.200(0.081-1.289)	100%	[5]
水玻璃造模	1.024(0.613-7.85)	0.521(0.366-2.730)	100%	
石作(個人採樣)	18.566(0.00-187.24)	--	31.82%(7/22)	[7]
石作(區域採樣)	20.606(0.00-183.28)	--	27.27%(6/22)	
耐火磚業 (個人採樣)	0.685(0.073-5.30)	0.070(<0.02-0.370)	24.53%(13/53)	[13]
耐火磚業 (區域採樣)	0.605(0.099-2.25)	0.076(<0.03-0.722)	21.95%(18/82)	
修爐業(煉鐵)	0.837(0.212-15.701)	0.285(0.035-7.193)	部分	[15]
修爐業(煉鋼)	0.488(0.253-1.825)	0.026(0.022-0.032)	0%	
原料砂供應業 A	0.454(0.071-2.640)	0.129(?-0.969)	6.00%作業場所 (12/75),其中: 14.75%區域採樣(9/61); 21.43%個人採樣(3/14)	[18]
原料砂供應業 B	0.628(0.033-9.030)	0.189(?-0.905)		
原料砂供應業 C	0.119(0.033-0.254)	0.028(?-0.090)		
原料砂供應業 D	0.243(0.033-0.885)	0.085(?-0.426)		
耐火磚業	13.292(0.030-113.67)	--	8.70%(6/69)	[26]

第三節 危害評估及管制

目前結晶型游離二氧化矽的採樣分析方法主要利用 UV/Vis、FTIR 及 XRD 三種檢測原理，依其分析的特性各有其優缺點 (表 3) [20]。如要進行 UV/Vis 分析，樣本需要先經過消化作用，過程繁瑣耗時，因此，導致誤差之因素大，且無法區分石英、方矽石或磷矽石；紅外線 FTIR 為 NIOSH 7602 分析方法之依據，此方法需要將附有二氧化矽粉塵的濾紙焚化後，再與溴化鉀粉末壓製成片，最後才上機分析；XRD 為 NIOSH 7500 採用之分析原理，此方法使用 PVC 濾紙採樣，但分析時須使用銀膜濾紙，因銀膜濾紙成本高且變異性大，並需經過灰化作用才可上機分析，且分析結果易受到濕度的影響。另外，日本 JISA 1481 及我國 CLA4003、4004 方法亦應用 XRD 原理，但使用不同直徑(25 mm)之濾紙匣與旋風分離器，以及不同濾紙材質（聚四氟乙烯濾紙裱敷玻璃纖維濾紙，以玻璃纖維做為捕集面）。

由於現行公告應用 X 光繞射之分析方法較不普及，故進行作業環境監測時，事業單位有時僅採集總粉塵，再藉原物料中之結晶型游離二氧化矽比例(或假設為 100%)進行推估，故可能產生誤差。例如，針對常用工業矽砂中結晶型游離二氧化矽比例之調查中發現，產品標示含結晶型游離二氧化矽之比例均有高估情形[28]。因此，若實施環測時以原料中二氧化矽的含量做為評估標準時，可能會影響後續之判定結果(表 4) [28]。

在容許暴露標準的制訂上(表 5) [29-30]，國際上多採用定值方式，僅有我國與日本採變動模式，即暴露標準值隨結晶型游離二氧化矽的含量比例增加而降低。美國 OSHA 原採變動模式，但已於 2019 年修改為定值方式，將四種結晶型游離二氧化矽(石英/方矽石/磷矽石/硅藻石)之可呼吸性粉塵的八小時日時量平均暴露標準均訂為 0.05 mg/m^3 。部分國家 (紐西蘭、瑞典、芬蘭等) 考慮方矽石與磷矽石之毒性較強，而設定較石英嚴格之管制標準 (多為石英的 1/2)。惟先前研究發現，依照我國現行暴露標準，第二種粉塵 (結晶型游離二氧化矽的含量<10%) 若考慮混合物相加效應，其暴露危害比值總和隨結晶型游離二氧化矽含量增加而增大，亦即當二氧化矽含量超過 8%時，暴露危害比值總和將超過 1(視為超過暴露準)，呈現不合理現象[6]。

表 3 結晶型游離二氧化矽分析方法之比較

標準分析方法	分光光度法	紅外線光譜法	X 光繞射法 (原有)	X 光繞射法 (改良)
	NIOSH 7601	NIOSH 7602	NIOSH 7500	JISA 1481 CLA4003，4004
採樣濾紙	37 mm PVC or MCE membrane	37 mm PVC or MCE membrane	37 mm 5 μ m PVC membrane (分析時需用 銀膜濾紙)	25mm T60A20 membrane (聚四氟乙烯濾紙 裱敷玻璃纖維濾 紙)
前處理	繁雜	簡易	繁雜	簡易
所需時間	約兩天	約三小時	約四小時	約一小時
不純物干擾	是，可利用溶 劑加以去除， 但部分不純物 不易清除	是，可利用溶 劑加以去除， 但部分不純物 不易清除	是，可利用電 腦程式修正	是，可利用電腦 程式修正
精確度	較紅外線光譜 法及 X 光繞射 法差	較 X 光繞射法 差	最佳	最佳
準確度	較紅外線光譜 法及 X 光繞射 法差	較 X 光繞射法 差	最佳	最佳
同素異構物分析	否	可	可	可
硬體費用	便宜	較昂貴	較昂貴	較昂貴

表 4 常見之原料含結晶型游離二氧化矽百分比

樣品名稱	石英含量(wt%)	使用之行業
霞石正長石	1.98	陶瓷、地磚
美耐粉	2.13	油漆、塗料
水洗高嶺土	12.56	橡膠、油漆、農藥
水洗白土	9.93	油墨、陶瓷、塑膠
長石	9.38	衛浴、地板材、餐具用品
鉀長石	20.91	焊條、漆料
矽砂	88.58	採自某工廠
鉀長石粉	6.53	陶瓷、地磚
荷耐火泥	14.19	橡膠、漆料、陶瓷
蛙目土	13.3	橡膠、油漆、化學
鉻鐵礦	7.89	煉鋼、化學
釜戶長石	2.53	煉鋼
硅石粉	94.08	塑鋼、塑膠、橡膠
石英	71.04	油漆填料
瓷土	7.52	陶瓷、衛浴
高嶺土	5.83	橡膠、油漆
正長石粉	6.8	陶瓷、玻璃、地磚

表 5 各國結晶型游離二氧化矽容許暴露標準

國家/機構	結晶型游離二氧化矽暴露標準			
	暴露標準	種類	類型	容許濃度標準 (mg/m ³)
我國	PEL (Permissible Exposure Limit)	含結晶型游離二氧化矽 10%以上粉塵	可呼吸性	10/(%SiO ₂ +2)
			總粉塵	30/(%SiO ₂ +2)
		含結晶型游離二氧化矽未滿 10%粉塵	可呼吸性	1
			總粉塵	4
美國 ACGIH	TLV (Threshold Limit Value)	石英/方矽石	可呼吸性	0.025
美國 NIOSH	REL (Recommended Exposure Limit)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
美國 OSHA	PEL (Permissible Exposure Limit)	石英/方矽石/磷矽石/硅藻石	可呼吸性	0.05
日本產業衛生協會	OEL-C (Occupational Exposure Limit Ceiling)	結晶型游離二氧化矽	可呼吸性	0.03
	OEL (Occupational Exposure Limit)	含小於 10%結晶型游離二氧化矽粉塵	可呼吸性	1.00
			總粉塵	4.00
日本厚生勞動省	administrative level	含結晶型游離二氧化矽粉塵	可呼吸性	3/(1.19*%SiO ₂ +1)
澳洲	Exposure Standard	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.1
紐西蘭	Workplace Exposure Standard	石英	可呼吸性	0.2
		方矽石/磷矽石		0.1
英國	OEL (Occupational Exposure Limit)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.1
義大利	TLV (Threshold Limit Value)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
葡萄牙	TLV (Threshold Limit Value)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
比利時	VLEP (Valeurs LimitedExposition Professionnelle)	石英	可呼吸性	0.1
		方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
奧地利	MAK (Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.15

阿根廷	CMP (Concentración Máxima Permissible)	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
法國	Ministry in Charge of Labour-Occupational Exposure Limits Values	α -石英	可呼吸性	0.1
		方矽石		0.05
		磷矽石		0.05
瑞典	Yrkeshygieniska Gränsvärden	石英	可呼吸性	0.1
		方矽石/磷矽石		0.05
芬蘭	Occupational Exposure Standard	石英	可呼吸性	0.2
		方矽石/磷矽石		0.1
墨西哥	OEL (Occupational Exposure Limit)	石英	可呼吸性	0.1
		方矽石//磷矽石		0.05
保加利亞	Concentration limit	石英/方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.07
挪威	OEL (Occupational Exposure Limit)	α 石英	可呼吸性	0.1
			總粉塵	0.3
		方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
			總粉塵	0.15
加拿大 (魁北克省)	VEMP (Valeur d'Exposition Moyenne Pondérée)	石英	可呼吸性	0.1
		方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
加拿大 (亞伯達省)	OEL (Occupational Exposure Limit)	石英	可呼吸性	0.1
			總粉塵	0.3
		方矽石/磷矽石	可呼吸性	0.05
			總粉塵	0.15
加拿大 (不列顛哥倫比亞省)	OEL (Occupational Exposure Limit)	石英/方矽石	可呼吸性	0.025
智利	LPP (Limite Permissible Ponderado)	石英	可呼吸性	0.08
		方矽石/磷矽石		0.04
希臘	OEL (Occupational Exposure Limit)	石英	可呼吸性	0.1
		方矽石/磷矽石		0.05

第三章 研究方法

第一節 現場訪視

本研究探討原料與空氣中二氧化矽濃度之相關性，因此，希望針對原料矽砂含量較穩定之行業進行，初步選定鑄造業、陶瓷業、石材加工業及玻璃業作為標的行業，依據地區分布及產業群聚特性，每行業選取 2-4 家進行訪評。

各行業特性簡述如下：

- 1.鑄造業：結晶型游離二氧化矽因有耐高溫的特殊物理特性，因此廣泛的被使用於鑄造業使用的原料砂中。鑄造流程一般分為鑄砂準備、砂模製造、澆鑄、拆模及鑄件處理等流程。先前研究發現，本行業在砂模製造、清砂以及磨毛邊等作業型態，會產生較高的粉塵暴露。
- 2.陶瓷業：陶瓷未燒成前的胚乃各種原料研磨混合而成，於噴霧乾燥製程中，雖皆由管線運輸，但於接口處，易有粉塵逸散的狀況發生，使得作業區週遭處於暴露粉塵危害環境中。
- 3.石材加工業：石材加工切割花崗岩、大理石，其原料本身含有二氧化矽，於切割時，雖皆採濕式作業，但若廠區通風效果不佳，勞工仍有粉塵暴露的可能。
- 4.玻璃業：玻璃業可分為玻璃加工業及玻璃製造業。玻璃加工業中多數廠商之玻璃並非自行製造，僅直接購買玻璃成品進行裁切、研磨或其他加工。玻璃加工雖採濕式作業，但切割區仍目測有微量粉塵之產生。而玻璃製造業是將矽砂與其他礦物原料(或部分廢玻璃)混合後，用於生產各類玻璃製品。訪視時發現，在進行投料作業及成型區，會有較大粉塵逸散的情形發生。

第二節 原料及空氣結晶型游離二氧化矽採樣分析

一、採樣對象

依據前述現場訪評發現，選定鑄造業、陶瓷業及玻璃製造業共 12 廠作為評估標的。陶瓷廠(4 廠)因產業聚集均位於北部，玻璃製造廠(4 廠)集中於中部，而鑄造廠(4 廠)則以中南部為主。

二、採樣策略

本研究目的為評估原料與空氣中結晶型游離二氧化矽濃度之相關性，因此，須同步進行採集。針對上述各行業之高暴露區域，進行勞工粉塵及結晶型游離二氧化矽暴露調查，並收集對應之原料樣本進行分析。空氣採集時以區域採樣(總粉塵及可呼吸性粉塵同步成對採集)為主，勞工個人採樣(採集可呼吸性粉塵)為輔，採樣均以全日日時量平均方式進行。

三、採樣分析步驟

(一) 原料樣品

- 1.標準品製備: 精稱石英標準品，充分磨勻後加入 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，使樣品總重達 0.9g。混合均勻後，再加入 0.1g KCl，充份混合均勻後放入 XRD 之 sample holder 中測試。其中 KCl 為內標準品，其繞射峰 $\theta = 28.49^\circ$ 。以 26.69/28.49 之相對強度對 SiO_2 之 wt% 作圖即得，以此製作檢量線 (5 點以上)。
- 2.樣品分析: 精稱 0.9g 樣品，充份磨勻後加入 0.1g KCl，充份混合均勻後，放入 XRD 之 sample holder，並使用玻片將多餘的粉末刮除壓平後進行分析。測試時取 26.69/28.49 之相對強度配合檢量線的斜率，即可換算出樣品中 SiO_2 之 wt %。

(二) 空氣樣品

本研究依照 CLA 4003 與 CLA 4004 方法對可呼吸性結晶型游離二氧化矽與總粉塵進行採樣分析。

1.設備

- (1)捕集設備：濾紙匣附旋風分離器，內裝 25 mm 聚四氟乙烯濾紙裱敷玻璃纖維 (T60A20 或同級品)，以玻璃纖維做為捕集面。
- (2)旋風分離器：鋁製旋風分離器；GS-3 旋風分離器。
- (3)個人採樣泵，流速：A.可呼吸性粉塵：鋁製旋風分離器流速為 2.5 L/min，GS-3 旋風分離器流速為 2.75 L/min。B.總粉塵：2-3 L/min。
- (4)精密微量天平可精確至 0.01 mg。
- (5)XRD： χ -ray 射管，石墨單光器，偵測器。
- (6)鑷子，不鏽鋼材質，扁平鑷嘴。

(7)電子乾燥箱，溫度控制變動在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以內，相對濕度控制變動在 10%以內。

2.採樣：

- (1)每批樣品採樣前需將空白濾紙以 XRD 測定空白濾紙鉛板強度。
- (2)每批樣品採樣前需準備樣本數的 10%，至少 2 個以上之空白介質作為現場空白樣本。
- (3)將濾紙置於電子乾燥箱過夜。
- (4)將濾紙以精密微量天平秤重，並記錄欲採樣前濾紙所秤的重量 W_1 ，空白樣品濾紙所秤重量平均值為 B_1 ：A.天平每次稱重前都要歸零。B. 以鑷子夾取濾紙。C. 連續兩次稱重讀值，其差值若小於 0.03 mg，取其平均值，否則稱取第三次重量，以其中較接近的兩次且差值小於 0.03 mg 者取平均值。(註：對於電子乾燥箱與天平置放室的溫度與相對濕度控制變動分別在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以內與在 $\pm 10\%$ 以內。)
- (5)將濾紙放入濾紙匣中並加以蓋緊，用塞子將濾紙匣兩端小孔塞住，並以纖維素製的收縮帶包緊濾紙匣，收縮帶乾燥後標註辨識號碼。
- (6)採樣器材組裝及採樣流速鋁製旋風分離器為 2.5 L/min，GS-3 旋風分離器流速為 2.75 L/min，建議採樣體積為 400 至 1000 L，採集粉塵量不要超過濾紙之最大負荷量。

3.樣品：

- (1)若採樣完成之濾紙匣外表有積塵，可以用濕紙巾擦拭濾紙匣之表面灰塵，以降低樣品處理過程之污染。
- (2)將濾紙匣之兩端塞子移去後，置於電子乾燥箱過夜，並保持濾紙採集面朝上。
- (3)除去濾紙匣之收縮帶，並打開濾紙匣，取出濾紙秤重。(註：取濾紙時，需很小心地以鑷子夾濾紙邊緣，以免濾紙上之粉塵掉失，如果濾紙黏在濾紙匣上，需非常小心地以適當工具將濾紙推起，否則易將濾紙弄破。)
- (4)將每一個樣品秤重，包括現場空白樣品，並記錄採樣後重量，另外濾紙有明顯缺失如粉塵負載過重、洩漏、破損、潮濕等亦要記錄。

4.檢量線：

- (1)檢量線製作：用粉塵標準品以粉塵再發法建製檢量線。將標準品填充於發生源，再產生適量的粉塵於暴露腔，幫浦流速搭配其採樣器進而採取所需之量，以建

製 0.03~1.59 mg/sample 在濾紙上之檢量線(五個濃度以上)。

(2)檢量線品管：以粉塵再發法建製品管樣品，進行 XRD 測定。

(3)以 XRD 測定採集後濾紙與鋁板強度。

(4)使用基底標準吸收校正法得知樣本強度，以建立檢量線。

5.濃度計算：

(1)依據社團法人日本作業環境測定協會方法 1002 結晶型游離二氧化矽分析方法之 χ -ray 繞射分析法進行基底標準吸收校正法計算濃度值(mg/m³)如下：

$$W = \frac{\hat{I}_x \cdot K_f - b}{m}, \text{ mg}$$

$$C_1 = \frac{W}{V}, \text{ mg / m}^3$$

W=空氣中結晶型游離二氧化矽含量，mg

C₁=空氣中有害物濃度，mg/m³

\hat{I}_x =樣品波峰強度

b=截距

m=斜率，counts/mg

K_f=吸收校正因子

V=採樣體積，m³

$$Q = \frac{W}{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}, \%$$

Q=空氣中結晶型游離二氧化矽含量百分比，%

W₁=採樣前濾紙重量，mg

W₂=採樣後(含樣品)濾紙重量，mg

B₁=採樣前現場空白濾紙平均重量，mg

B₂=採樣後現場空白濾紙平均重量，mg

(2)將空氣中結晶型游離二氧化矽含量(mg)除以樣品淨重(mg)，得到結晶型游離二氧化矽含量百分比，代入我國勞工作業環境空氣中含結晶型游離二氧化矽粉塵容許濃度標準。

6.分析品保品管

(1)空氣樣品

檢量線配製使用石英標準品(α -quartz, NIST-SRM 1878b, $96.73 \pm 0.40\%$)以粉塵再發法進行。先將標準品填充於發生源，再以吹球將粉塵吹入暴露腔，並以幫浦搭配採樣器以不同採樣時間採取所需之粉塵量。以此法所得之檢量線為 $Y=95.564X-1.7443$ ， $r^2=0.9997$ (圖 2)。品管樣品最大誤差為-6.57%(表 6)。

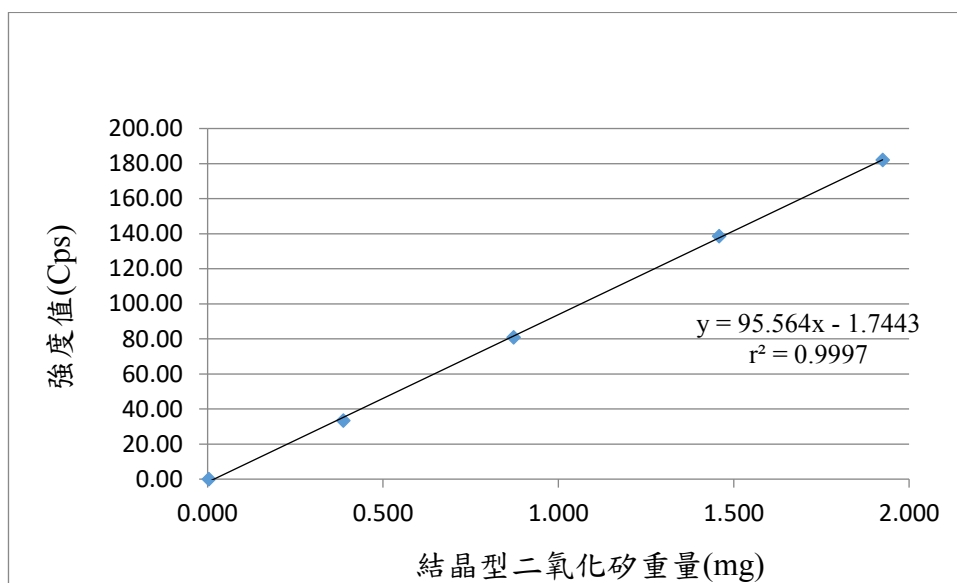


圖 2 粉塵含結晶型二氧化矽重量與強度

表 6 空氣樣品品管樣品誤差百分比

品管樣品編號	成分	配置值(mg)	計算值(mg)	誤差百分比%
A	α -quartz	0.412	0.387	-6.07%
B	α -quartz	1.464	1.543	+5.40%
C	α -quartz	0.868	0.811	-6.57%
D	α -quartz	1.202	1.260	+4.83%
E	α -quartz	0.873	0.865	-0.92%

(2)原料樣品

檢量線配製時先精秤石英標準品，再加入 $Mg(OH)_2$ ，使樣品總重達 0.9g，將其混合均勻後，再添加 0.1g KCl，充分混合均勻後，從中取 600mg 放入 XRD 進行測試。文獻中[28]之分析方法是以 KCl 作為內標準品，但本研究在分析時，發現 SiO_2

與 KCl 之相對強度比值對 SiO₂ 之 wt%間並無明顯的線性關係，故改以 SiO₂ 之強度對添加之標準品重量直接製作檢量線，依此所得之檢量線為 $Y=2.7376X+5.8208$ ， $r^2=0.996$ (圖 3)，而品管樣品最大誤差為-6.29%(表 7)。在分析變異分析中，以兩個現場原料樣品配製 3 倍量後進行三重複分析(表 8)。

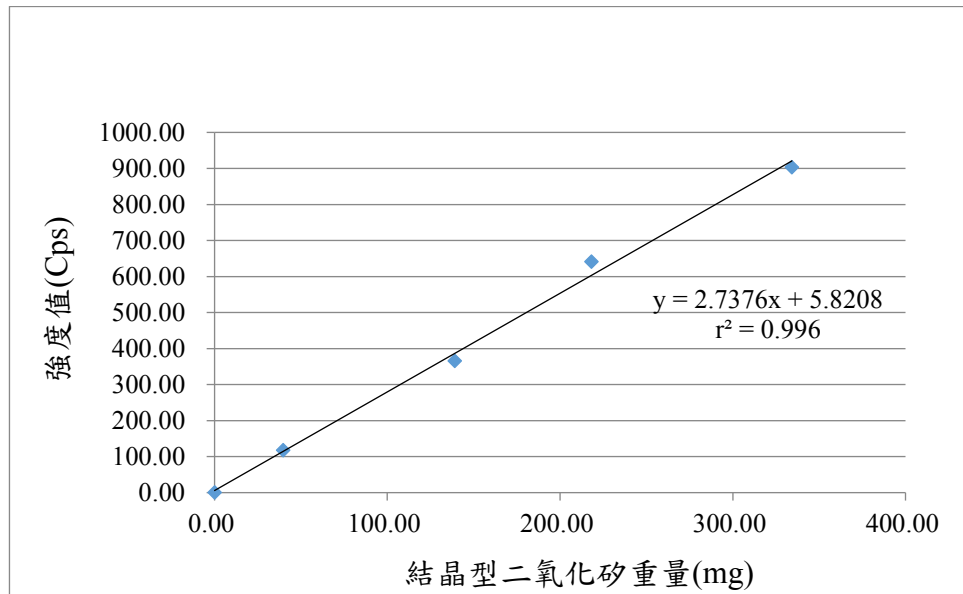


圖 3 原料中結晶型二氧化矽重量與強度

表 7 原料樣品品管樣品誤差百分比

品管樣品編號	成分	配置值(mg)	計算值(mg)	誤差百分比%
A	α -quartz	350.00	327.97	-6.29%
B	α -quartz	140.00	131.69	-5.94%
C	α -quartz	220.00	232.26	+5.57%
D	α -quartz	40.00	40.98	+2.45%

表 8 原料樣品之分析變異分析

樣品編號	石英強度(Cps)	平均值	標準差	CV 值
A1	583	584.0	3.606	0.62%
A2	581			
A3	588			
B1	670	722.7	50.639	7.01%
B2	771			
B3	727			

第四章 研究結果與討論

第一節 我國作業場所原料所含二氧化矽成份比率調查

一、現場訪視評估

本研究藉現場訪視、作業觀察及人員訪談等方式，調查記錄勞工作業相關之參數，例如每日工作時間及製程特性與拿取原料砂等，並搭配後續之環境調查監測，以貼切作業環境現場危害及暴露特性。本研究於 109 年 7-10 月間，針對北中南部 4 種行業共 14 家不同規模，且可能接觸含結晶型游離二氧化矽之原料的工廠(鑄造業 4 廠；陶瓷業 4 廠；玻璃業 5 廠及石材業 1 廠)進行現場訪視，瞭解該工廠之生產流程與作業環境實況，並調查工作人員之工作及暴露特性，各廠之作業特性及現場安衛執行現況，則彙整如表 9 所示。

表 9 本研究訪視之事業單位特性及安衛執行現況

廠商	行業	原料	主要產品	總勞工人數	工作時間(h)	現場潛在健康危害因子	職業安全衛生管理執行概況			其他
							是否有專責勞安管理組織/人員	防護具使用(包括防護具種類及更換情形)	粉塵危害控制設備	
A	鑄造	六號砂	水溝蓋、人孔蓋、中小型鑄件	100	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口罩、棉質手套	個人加工(集塵設備)	使用風扇
B	鑄造	二號半砂	製模、中大型鑄件	140	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口罩、棉質手套	局部抽氣裝置	使用風扇

C	鑄造	四號砂	中小型鑄件 (農機、汽車)	80	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞、護目 鏡、安全 帽	局部抽 氣裝置	使用 風扇
D	鑄造	三號 砂、五號 砂	小型 鑄件	15	8	粉塵 噪音 高溫	無/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞、護目 鏡	無	使用 風扇
E	石材 加工	花崗 岩、大理 石	大樓 帷幕牆石 材	80	8	粉塵 噪音	有/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞	排氣 扇、石 材切割 濕式作 業、個 人加工 (集塵 設備)	
F	玻璃 加工	玻璃	強化 玻 璃、 膠合 玻璃	90	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞、護目 鏡、安全 帽	集塵設 備、玻 璃切割 濕式作 業	使用 風扇
G	陶瓷	6種 (長 石、 金屬 氧化 物...)	外牆 磚	80	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞	集塵設 備	三班 制使 用 風扇
H	陶瓷	依配 方變 更	地 磚、 壁磚	80	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口 罩、棉質 手套、耳 塞	集塵設 備	三班 制 使用 風扇
I	陶瓷	長石 與其	外牆 磚、	100	8	粉塵 噪音	有/有	活性碳口 罩、棉質	集塵設 備	三班

		他輔助原料	地磚、壁磚			高溫		手套、耳塞		制使用風扇
J	陶瓷	依配方變更	地磚、壁磚	100	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	活性碳口罩、棉質手套、耳塞	集塵設備、打磨(濕式作業)	三班制 使用風扇
K	玻璃製造	矽砂與其他礦物	平板玻璃	120	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	防塵口罩、棉質手套、耳塞、護目鏡、安全帽、防護服	集塵設備	三班制 使用風扇
L	玻璃製造	矽砂與其他礦物	光學玻璃	60	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	防塵口罩、工作鞋、護目鏡、耳塞、防護衣	集塵設備	三班制 使用風扇
M	玻璃製造	矽砂與其他礦物	玻璃	360	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	防塵口罩、耳塞、安全帽、安全鞋	集塵設備	三班制 使用風扇
N	玻璃製造	矽砂與其他礦物	PCB玻璃纖維布	1300	8	粉塵 噪音 高溫	有/有	防塵口罩、耳塞、安全帽、安全鞋	集塵設備	三班制 使用風扇

二、製程概況與危害特性

本研究訪視之鑄造業皆採用砂模鑄造法，其製程大同小異，主要差異為使用之原料砂不同以及回收砂使用的比例。製程依序可分為混砂、造砂模、澆鑄、拆模、噴砂及研磨等步驟。在本訪視期間，於廠區皆可見粉塵飄揚之情形，此外也需注意噪音與高溫作

業的問題。

陶瓷業的製程依序為投料、原料混合粉碎(成泥漿狀)、噴霧乾燥(成為乾燥粉體)、壓製成型(胚)、塗釉印刷、燒成(1000℃以上)、冷卻降溫及後處理等。粉塵暴露危害主要於投料至壓製成型間。訪視發現，其製程皆為 24 小時三班制，主要因為窯爐須倚賴燃燒瓦斯（部分工廠會使用電熱）產生的熱源維持於高溫狀態，連續作業較符合經濟效益。而原料之粉碎藉由球磨機進行，因其耗電量較高，因此該製程均利用夜班工業用電減價時段進行。粉碎產出的泥漿則會儲存於地下儲槽，待打入噴霧乾燥機成為乾燥之粉體後，才會用來製作成胚。

玻璃業可分為玻璃加工業及玻璃製造業。玻璃加工業中多數廠商之玻璃並非自行製造，僅直接購買玻璃成品進行裁切、研磨或其他加工。玻璃加工雖採濕式作業，但切割區仍目測有微量粉塵之產生。而玻璃製造業是將矽砂與其他礦物原料(或部分廢玻璃)混合後，用於生產各類玻璃製品。訪視時發現，在進行投料作業及成型區，會有較大粉塵逸散的情形發生。

石材加工業可分為石材切割(研磨)及碎石作業。石材(特別是各類花崗岩)中含有二氧化矽，切割研磨時產生之粉塵即為二氧化矽暴露來源，各廠加工時雖皆採濕式作業，以增加潤滑及降溫，但製程廢水未經妥善處理，乾燥後，仍有粉塵飄揚情形，導致勞工粉塵暴露。

三、原料所含二氧化矽成份比例

本研究於臨廠訪視時，依據作業特性及可行性，收集相關原料樣品，包括鑄造業取得之鑄模砂、陶瓷業於壓製成形(胚)機台取得多種原料混合後之生產用砂、玻璃(製造)業取得之原料矽砂、石材(加工)業於製程廢水中及工作區表面沉著取得之粉粒砂，與玻璃(加工)業於製程廢水中產生之粉粒砂等。樣品先經初步研磨並以 100mesh (~149 μ m)篩網過篩後，再依據前述分析方法，進行結晶型游離二氧化矽比例分析，樣品初步篩選均未發現方矽石及鱗矽石之特徵角度強度，故以分析石英為主。由於文獻中發現樣品之粒徑大小可能會影響分析之結果[31][32]，因此，本研究亦將樣品進一步研磨，使其粒徑分布中位數（D50）與標準品相當後（約為 $3\pm 1 \mu$ m），再進行分析，以確認其影響。

以 100mesh 篩網過篩之樣品分析結果發現(表 10)，鑄造業(n=4)使用之生產用砂中結晶型游離二氧化矽(石英)之比例介於 32.60~55.51%，平均值為 44.41% (標準差 9.41%)；

陶瓷業(n=4)使用之加工生產用砂(多種原料混合)中結晶型游離二氧化矽(石英)之比例介於 8.27~21.22%，平均值為 14.99% (標準差 5.91%)；玻璃製造業(n=3)使用之原料矽砂(未混和)中結晶型游離二氧化矽(石英)之比例介於 40.05~74.95%，平均值為 56.95% (標準差 17.48%)；石材與玻璃加工取得之製程廢砂，其含結晶型游離二氧化矽(石英)之比例較低，分別為 6.98%及 0.79%。如將樣品進一步研磨使其粒徑中位數與分析標準品相當(D50 ~ 3 μ m)，則各行業之石英百分比平均值均下降，但個別數據則增減互見，經相依樣品檢定後，顯示研磨(粒徑)對本次之樣品分析結果無顯著影響(p=0.328)。

本研究分析所得之鑄造及玻璃原料矽砂中結晶型游離二氧化矽(石英)比例，較低於部分文獻之結果[27]，除了分析上之差異外，原料之來源及特性(例如可能含有其他型式的結晶型游離二氧化矽)也可能影響結果。另外，先前針對常用工業矽砂中結晶型游離二氧化矽比例之調查中發現，產品標示含結晶型游離二氧化矽之比例均有高估情形。常用工業原料中，含二氧化矽成分較高者有矽砂、瓷土與黏土等，部分原料標示二氧化矽成分達 60%-80%，但分析發現結晶型游離二氧化矽成份實際僅佔 2%，標示上顯有誤差[28]。一般矽砂及原料供應業者分析原料中的總 SiO₂，採用酸化分析法使原料中之總 SiO₂ 轉化為揮發性之 SiF₄，再藉稱重法分析，因此，可能高估原料中結晶型 SiO₂ 的量。

表 10 本研究中不同行業各廠原料中結晶型游離二氧化矽(石英)比例

廠商 代號	行業	原料種類	原料粒徑 ⁴ D ₅₀ (μm)	原料粒徑 ⁵ D ₅₀ (μm)	原料中石英比例(%)	
					100 mesh ⁴	D ₅₀ ~ 3 μm ⁵
A	鑄造	原料矽砂 ¹	177.3	3.213	32.60	27.08
B	鑄造	原料矽砂 ¹	557.6	2.602	45.98	37.04
C	鑄造	原料矽砂 ¹	NA*	3.140	55.51	61.85
D	鑄造	原料矽砂 ¹	NA*	2.482	43.56	38.10
					44.41±9.41	41.02±14.75
E	石材 加工	製程廢砂	NA	NA	6.98	NA ⁶
F	玻璃 加工	製程廢砂	NA	NA	0.79	NA
G	陶瓷	加工用砂 ²	12.84	3.130	18.45	15.53
H	陶瓷	加工用砂 ²	14.39	3.276	12.00	12.64
I	陶瓷	加工用砂 ²	11.19	2.945	8.27	13.78
J	陶瓷	加工用砂 ²	7.95	3.130	21.22	10.87
					14.99±5.91	13.21±1.96
K	玻璃 製造	原料矽砂 ³	30.15	3.027	NA	35.72
L	玻璃 製造	原料矽砂 ³	34.29	3.283	40.05	66.56
M	玻璃 製造	原料矽砂 ³	368.1	2.810	55.84	42.07
N	玻璃 製造	原料矽砂 ³	446.2	3.193	74.95	52.40
					56.95±17.48	49.19±13.47

¹取自製砂模時使用之原料矽砂（未混和）。

²取自壓製成形（胚）機台之加工用砂（原料矽砂及其他原料之混合）。

³取自原料矽砂（未混和。）

⁴原料樣品以 100 mesh 濾網過篩（以粒徑分析儀（Horiba LA-950V2）測定）。

⁵原料樣品以珠磨機濕式研磨至粒徑分布中位數與標準品相當（D₅₀接近 3 μm ）。

⁶NA 未分析。

第二節 作業環境空氣中二氧化矽及粉塵濃度監測調查

一、評估對象與採樣策略

依據文獻及現場訪查過程中發現，在鑄造業部分，各廠其作業流程大致相同，依序為混砂、造模、澆鑄、拆模、噴砂、研磨。在這些製程中，皆會暴露於粉塵危害中；在陶瓷業的部分，其主要粉塵暴露製程於混料、原料粉碎、噴霧乾燥製作陶瓷原料粉體以及壓製成型區域；而玻璃製造業其粉塵暴露作業區域主要為原料存放區、進料區與混合區，因此本研究依據以上主要粉塵暴露作業區域進行採樣規劃，以掌握該行業重要暴露情境，並用來比對與原料成分比例間之差異。

本研究採樣以日班為主，均自開始工作時開始採樣，下午下工前停止，採樣時間均大於 6 小時，於各主要工作區域進行個人採樣(可呼吸性粉塵)與區域採樣（同步採集總粉塵與可呼吸性粉塵）藉此分析鑄造、陶瓷、玻璃製造此三種行業之粉塵暴露實態。總粉塵與可呼吸性粉塵採樣分析，採用 CLA4003 與 CLA4004 方法建議之開放式濾紙匣，搭配 25mm 聚四氟乙烯濾紙裱敷玻璃纖維(T60A20)濾紙進行採樣，採樣流速設定為總粉塵約 2000cc/min，可呼吸性粉塵 2500cc/min。採樣後之濾紙以標準秤重流程秤量採集之粉塵重量，再使用 XRD 進行結晶型游離二氧化矽分析，並求得採集粉塵中含結晶型游離二氧化矽的比例。

二、鑄造業勞工作業環境粉塵暴露評估結果

本研究於 109 年 7-8 月間，針對鑄造業 4 家不同規模及不同產品類型之工廠進行現場勞工暴露調查。其中 A 廠以水溝蓋與人孔蓋等中小型鑄件為主；B 廠以模具與大型鑄件為主；C 廠以農機、汽車等中小鑄件為主；D 廠以小型鑄件為主。各廠之作業特性、採樣規劃及現場採樣位置圖如附錄一。

本研究針對鑄造業四廠次(A~D 廠)之粉塵暴露調查，共採集現場樣品 81 個，包括個人樣品 15 個、區域樣品 58 個及現場空白樣品 8 個(每廠次 2 個)。現場空白樣品測得之平均重量為 0.002mg，石英之特徵角度強度約為 1Cps，因此其對現場樣品之影響忽略不計。針對結晶型游離二氧化矽之檢測，樣品初步篩選均未發現方矽石及鱗矽石之特徵角度強度，故以分析石英為主，詳細分析結果如表 11~14。

分析結果發現，在粉塵上，A、B、C 及 D 廠之平均個人(可呼吸性粉塵)、區域(可呼吸性粉塵)及區域(總粉塵)分別為(1.010 ± 0.160 、 1.020 ± 0.462 及 4.100 ± 1.805 mg/m^3)、(1.063 ± 0.268 、 1.167 ± 0.779 及 3.747 ± 1.960 mg/m^3)、(0.992 ± 1.359 、 0.256 ± 0.128 及 1.282 ± 0.957 mg/m^3)與 (0.459 ± 0.278 、 0.181 ± 0.148 及 0.576 ± 0.490 mg/m^3)；在結晶型游離二氧化矽(石英)濃度上，A、B、C 及 D 廠之平均個人(可呼吸性)、區域(可呼吸性)及區域(總粉塵)分別為 (0.094 ± 0.037 、 0.144 ± 0.147 及 0.939 ± 0.431 mg/m^3)、(0.180 ± 0.096 、 0.190 ± 0.298 及 0.872 ± 0.508 mg/m^3)、(0.088 ± 0.078 、 0.043 ± 0.005 及 0.145 ± 0.047 mg/m^3) 與 (0.059 ± 0.033 、 0.049 ± 0.024 及 0.108 ± 0.070 mg/m^3)。四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.909 ± 0.695 、 0.679 ± 0.646 及 2.463 ± 2.080 mg/m^3 ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度及區域總結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度分別為 0.108 ± 0.077 、 0.110 ± 0.180 及 0.528 ± 0.513 mg/m^3 。

A 廠(以生產水溝蓋與人孔蓋等中小型鑄件為主)及 B 廠(以生產中大型鑄件為主)在粉塵及結晶型游離二氧化矽(石英)濃度上，包括個人(可呼吸性粉塵)、區域(可呼吸性粉塵及總粉塵)，均較 C (生產農機及汽車零件之中小型鑄件)及 D 廠(以小型鑄件為主)為高，現場訪視時發現，A 及 B 廠採人工製模方式，且利用風扇降溫，導致粉塵飄散；C 廠採自動製模，而 D 廠雖為人工製模，但壓實機台旁設有集塵裝置，兩廠之危害控制較佳，導致現場濃度相對較低。

A 廠及 B 廠分別有 72.2%(=13/18)及 75.0%(=15/20)的樣品(包括個人及區域)超過我國含結晶型游離二氧化矽暴露標準，C 及 D 廠則有 5.6%(=1/18)與 11.8%(2/17)。

如依據鑄造廠不同作業區之暴露調查結果進行彙整比較發現 (表 15~19)，脫模區(表 18) 有最高的平均粉塵及結晶型游離二氧化矽濃度，區域樣品濃度超過我國第一種粉塵或第二種粉塵容許濃度標準的比例亦最高 (87.50%)，而噴砂區(噴砂、洗砂等作業)超過的比例次之(43.75%)，最低區域則為原料區與研磨區(33.33%)。A 及 B 廠主要生產中型鑄件，在脫模震砂時一次產生之粉塵量多，儘管有集塵設備，仍無法完全捕集，而有粉塵飄散，甚至 B 廠生產之大型鑄件，無相對應之震砂機台，而是使用天車吊掛，使鑄件撞擊硬物，讓砂脫落。

本研究針對 5 種不同作業區採集之樣品進行統計檢定發現，不同作業區採集之粉塵

(包括區域總粉塵、區域可呼吸性粉塵與個人可呼吸性粉塵)中的粉塵濃度、二氧化矽(石英)濃度及粉塵中二氧化矽百分比並無統計上顯著差異(Kruskall-Wallis Test, $p>0.05$)。

表 11 鑄造 A 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或可呼吸性粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離二氧化矽濃度 (mg/m ³)	含結晶型游離二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
脫模區	個人	可呼吸性	1.155	0.121	10.453	第一種	0.803
脫模區	區域	總粉塵	4.879*	1.474	30.219	第一種	0.931
脫模區	區域	可呼吸性	1.760	0.442	25.110	第一種	0.369
脫模區	區域	總粉塵	5.819*	1.481	25.445	第一種	1.093
脫模區	區域	總粉塵	3.386*	0.664	19.612	第一種	1.388
噴砂區(大鑄件)	個人	可呼吸性	1.051	0.067	6.377	第二種	1.000
噴砂區(大鑄件)	區域	總粉塵	3.198*	0.632	19.761	第一種	1.379
噴砂區(大鑄件)	區域	可呼吸性	0.891	0.077	8.658	第二種	1.000
噴砂(中小鑄件)研磨區	個人	可呼吸性	0.781	0.057	7.305	第二種	1.000
噴砂(中小鑄件)研磨區	區域	總粉塵	1.341	0.270	20.107	第一種	1.357
噴砂(中小鑄件)研磨區	區域	可呼吸性	0.684	0.060	8.719	第二種	1.000
造砂模區	個人	可呼吸性	1.052	0.130	12.389	第一種	0.695
造砂模區	區域	總粉塵	4.439*	0.772	17.390	第一種	1.547
造砂模區	區域	可呼吸性	1.100	0.095	8.616	第二種	1.000
造砂模區	區域	總粉塵	6.992*	1.194	17.073	第一種	1.573
造砂模區	區域	可呼吸性	1.242	0.113	9.105	第二種	1.000
砂回收區	區域	總粉塵	2.749*	1.028	37.383	第一種	0.762
砂回收區	區域	可呼吸性	0.441	0.078	17.700	第一種	0.508
個人(可呼吸性粉塵) **			1.010 ± 0.160	0.094 ± 0.037	9.131 ± 2.786	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			1.020 ± 0.462	0.144 ± 0.147	12.985 ± 6.933	-	-
區域(總粉塵)			4.100 ± 1.805	0.939 ± 0.431	23.374 ± 7.179	-	-

*濾紙粉塵重>2mg；**平均值±標準差

表 12 鑄造 B 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或可呼吸性粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離二氧化矽濃度 (mg/m ³)	含結晶型游離二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
原料投料區	個人	可呼吸性	1.077	0.245	22.749	第一種	0.404
混砂區	個人	可呼吸性	0.725	0.082	11.254	第一種	0.755
混砂區	區域	總粉塵	2.827*	0.107	3.783	第二種	4.000
混砂區	區域	可呼吸性	2.267*	0.925	40.803	第一種	0.234
混砂區	區域	總粉塵	3.095*	0.827	26.732	第一種	1.044
混砂區	區域	可呼吸性	0.852	0.092	10.775	第一種	0.783
原料放置區	區域	總粉塵	2.400	0.831	34.604	第一種	0.820
原料放置區	區域	可呼吸性	0.758	0.078	10.354	第一種	0.809
砂回收處理區	區域	總粉塵	4.000*	1.274	31.859	第一種	0.886
砂回收處理區	區域	可呼吸性	1.185	0.100	8.438	第二種	1.000
噴砂區	個人	可呼吸性	1.381	0.115	8.348	第二種	1.000
噴砂區	區域	總粉塵	5.618*	1.732	30.838	第一種	0.914
噴砂區	區域	可呼吸性	0.978	0.111	11.320	第一種	0.751
噴砂區	區域	總粉塵	6.927*	0.799	11.530	第一種	2.217
噴砂區	區域	可呼吸性	2.393*	0.091	3.783	第二種	1.000
脫模區	個人	可呼吸性	1.068	0.279	26.172	第一種	0.355
脫模區	區域	總粉塵	4.465*	1.059	23.724	第一種	1.166
脫模區	區域	可呼吸性	0.770	0.080	10.395	第一種	0.807
個人加工區	區域	總粉塵	0.645	0.348	53.912	第一種	0.537
個人加工區	區域	可呼吸性	0.129	0.043	33.324	第一種	0.283
個人(可呼吸性粉塵) **			1.063±0.268	0.180±0.096	17.131±8.660	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			1.167±0.779	0.190±0.298	16.149±13.278	-	-
區域(總粉塵)			3.747±1.960	0.872±0.508	27.123±15.163	-	-

*濾紙粉塵重>2mg；**平均值±標準差

表 13 鑄造 C 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品 類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
R 線造模區	個人	可呼吸性	0.131	0.038	29.061	第一種	0.322
R 線造模區	區域	總粉塵	0.283	0.080	28.387	第一種	0.987
R 線造模區	區域	可呼吸性	0.062	0.038	60.531	第一種	0.160
S 線造模區	個人	可呼吸性	0.249	0.040	16.194	第一種	0.550
S 線造模區	區域	總粉塵	1.070	0.177	16.545	第一種	1.618
S 線造模區	區域	可呼吸性	0.237	0.038	16.115	第一種	0.552
洗砂+打折區	個人	可呼吸性	0.577	0.071	12.216	第一種	0.703
洗砂+打折區	區域	總粉塵	1.905	0.193	10.148	第一種	2.470
洗砂+打折區	區域	可呼吸性	0.416	0.049	11.860	第一種	0.722
洗砂+打折區	區域	總粉塵	0.595	0.162	27.187	第一種	1.028
洗砂+打折區	區域	可呼吸性	0.164	0.040	24.482	第一種	0.378
砂回收處理區	區域	總粉塵	0.915	0.101	11.042	第一種	2.300
砂回收處理區	區域	可呼吸性	0.243	0.042	17.279	第一種	0.519
個人研磨區	個人	可呼吸性	3.010*	0.203	6.730	第二種	1.000
個人研磨區	區域	總粉塵	3.131*	0.191	6.112	第二種	4.000
個人研磨區	區域	可呼吸性	0.417	0.051	12.255	第一種	0.702
原料放置區	區域	總粉塵	1.076	0.112	10.411	第一種	2.417
原料放置區	區域	可呼吸性	0.254	0.042	16.565	第一種	0.539
個人(可呼吸性粉塵) **			0.992±1.359	0.088±0.078	16.050±9.502	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.256±0.128	0.043±0.005	22.727±17.182	-	-
區域(總粉塵)			1.282±0.957	0.145±0.047	15.690±8.813	-	-

*濾紙粉塵重>2mg；**平均值±標準差

表 14 鑄造 D 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品 類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
原料、廢鐵放置區	區域	總粉塵	0.248	0.048	19.228	第一種	1.413
原料、廢鐵放置區	區域	可呼吸性	0.097	0.036	37.252	第一種	0.255
造砂模區(個人)	個人	可呼吸性	0.143	0.037	26.110	第一種	0.356
造砂模區	區域	總粉塵	0.567	0.118	20.913	第一種	1.309
造砂模區	區域	可呼吸性	0.091	0.040	44.083	第一種	0.217
造砂模區	區域	總粉塵	0.509	0.152	29.854	第一種	0.942
造砂模區	區域	可呼吸性	0.128	0.047	37.215	第一種	0.255
混砂區	區域	總粉塵	0.137	0.048	35.348	第一種	0.803
洗砂+研磨區(個人)	個人	可呼吸性	0.668	0.043	6.476	第二種	1.000
洗砂+研磨區(個人)	個人	可呼吸性	0.566	0.097	17.176	第一種	0.521
洗砂+研磨區	區域	總粉塵	1.526	0.250	16.414	第一種	1.629
洗砂+研磨區	區域	可呼吸性	0.474	0.098	20.585	第一種	0.443
洗砂+研磨區	區域	總粉塵	1.060	0.121	11.426	第一種	2.234
洗砂+研磨區	區域	可呼吸性	0.188	0.036	19.007	第一種	0.476
個人加工區	區域	總粉塵	0.098	0.049	49.927	第一種	0.578
回收砂存放區	區域	總粉塵	0.462	0.080	17.259	第一種	1.558
回收砂存放區	區域	可呼吸性	0.108	0.039	35.744	第一種	0.265
個人(可呼吸性粉塵) *			0.459±0.278	0.059±0.033	16.587±9.830	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.181±0.148	0.049±0.024	32.314±10.132	-	-
區域(總粉塵)			0.576±0.490	0.108±0.070	25.046±12.649	-	-

表 15 鑄造業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型 游離二氧化 矽%	粉塵種 類	我國容許濃度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
A	區域(總粉塵)	2.749	1.028	37.383	第一種	0.762	Y
A	區域(可呼吸性)	0.441	0.078	17.700	第一種	0.508	N
B	個人(可呼吸性)	1.077	0.245	22.749	第一種	0.404	Y
B	區域(總粉塵)	2.400	0.831	34.604	第一種	0.820	Y
B	區域(可呼吸性)	0.758	0.078	10.354	第一種	0.809	N
B	區域(總粉塵)	4.000	1.274	31.859	第一種	0.886	Y
B	區域(可呼吸性)	1.185	0.100	8.438	第一種	1.000	Y
C	區域(總粉塵)	0.915	0.101	11.042	第一種	2.300	N
C	區域(可呼吸性)	0.243	0.042	17.279	第一種	0.519	N
C	區域(總粉塵)	1.076	0.112	10.411	第一種	2.417	N
C	區域(可呼吸性)	0.254	0.042	16.565	第一種	0.539	N
D	區域(總粉塵)	0.248	0.048	19.228	第一種	1.413	N
D	區域(可呼吸性)	0.097	0.036	37.252	第一種	0.255	N
D	區域(總粉塵)	0.462	0.080	17.259	第一種	1.558	N
D	區域(可呼吸性)	0.108	0.039	35.744	第一種	0.265	N
個人(可呼吸性粉塵)**		1.077	0.245	22.749		超過暴露標準	33.33%
區域(可呼吸性粉塵)		0.441±0.399	0.059±0.026	20.476±11.512			
區域(總粉塵)		1.693±1.386	0.496±0.529	23.112±11.318			

*原料區=原料放置、回收砂處理、原料投料；**平均值±標準差

表 16 鑄造業作業環境(造模區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游 離二氧化矽 %	粉塵 種類	我國容許濃 度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
A	個人(可呼吸性)	1.052	0.130	12.389	第一種	0.695	Y
A	區域(總粉塵)	4.439	0.772	17.390	第一種	1.547	Y
A	區域(可呼吸性)	1.100	0.095	8.616	第二種	1.000	Y
A	區域(總粉塵)	6.992	1.194	17.073	第一種	1.573	Y
A	區域(可呼吸性)	1.242	0.113	9.105	第二種	1.000	Y
B	個人(可呼吸性)	0.725	0.082	11.254	第一種	0.755	N
B	區域(總粉塵)	2.827	0.107	3.783	第二種	4.000	N
B	區域(可呼吸性)	2.267	0.925	40.803	第一種	0.234	Y
B	區域(總粉塵)	3.095	0.827	26.732	第一種	1.044	Y
B	區域(可呼吸性)	0.852	0.092	10.775	第一種	0.783	Y
C	個人(可呼吸性)	0.131	0.038	29.061	第一種	0.322	N
C	個人(可呼吸性)	0.249	0.040	16.194	第一種	0.550	N
C	區域(總粉塵)	0.283	0.080	28.387	第一種	0.987	N
C	區域(可呼吸性)	0.062	0.038	60.531	第一種	0.160	N
C	區域(總粉塵)	1.070	0.177	16.545	第一種	1.618	N
C	區域(可呼吸性)	0.237	0.038	16.115	第一種	0.552	N
D	個人(可呼吸性)	0.143	0.037	26.110	第一種	0.356	N
D	區域(總粉塵)	0.567	0.118	20.913	第一種	1.309	N
D	區域(可呼吸性)	0.091	0.040	44.083	第一種	0.217	N
D	區域(總粉塵)	0.509	0.152	29.854	第一種	0.942	N
D	區域(可呼吸性)	0.128	0.047	37.215	第一種	0.255	N
D	區域(總粉塵)	0.137	0.048	35.348	第一種	0.803	N
個人(可呼吸性 粉塵)**		0.460±0.41 0	0.065±0.04 1	19.000±8.1 14		超過暴露標準	36.36%
區域(可呼吸性粉塵)		0.747±0.77 8	0.174±0.30 5	28.405±19. 767			
區域(總粉塵)		2.213±2.34 3	0.386±0.42 6	21.781±9.4 27			

*造模區=混砂及造砂模；**平均值±標準差

表 17 鑄造業作業環境(噴砂區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵 種類	我國容 許濃度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
A	個人(可呼吸性)	1.051	0.067	6.377	第二種	1.000	Y
A	區域(總粉塵)	3.198	0.632	19.761	第一種	1.379	Y
A	區域(可呼吸性)	0.891	0.077	8.658	第二種	1.000	N
A	個人(可呼吸性)	0.781	0.057	7.305	第二種	1.000	N
A	區域(總粉塵)	1.341	0.270	20.107	第一種	1.357	N
A	區域(可呼吸性)	0.684	0.060	8.719	第二種	1.000	N
B	個人(可呼吸性)	1.381	0.115	8.348	第二種	1.000	Y
B	區域(總粉塵)	5.618	1.732	30.838	第一種	0.914	Y
B	區域(可呼吸性)	0.978	0.111	11.320	第一種	0.751	Y
B	區域(總粉塵)	6.927	0.799	11.530	第一種	2.217	Y
B	區域(可呼吸性)	2.393	0.091	3.783	第二種	1.000	Y
C	個人(可呼吸性)	0.577	0.071	12.216	第一種	0.703	N
C	區域(總粉塵)	1.905	0.193	10.148	第一種	2.470	N
C	區域(可呼吸性)	0.416	0.049	11.860	第一種	0.722	N
C	區域(總粉塵)	0.595	0.162	27.187	第一種	1.028	N
C	區域(可呼吸性)	0.164	0.040	24.482	第一種	0.378	N
個人(可呼吸性粉塵)**		0.948±0.348	0.078±0.026	8.562±2.566	超過暴露標準		43.75%
區域(可呼吸性粉塵)		0.921±0.782	0.071±0.027	11.470±6.986			
區域(總粉塵)		3.264±2.515	0.631±0.597	19.929±8.221			

表 18 鑄造業作業環境(脫模區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵 種類	我國容 許濃度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
A	個人(可呼吸性)	1.155	0.121	10.453	第一種	0.803	Y
A	區域(總粉塵)	4.879	1.474	30.219	第一種	0.931	Y
A	區域(可呼吸性)	1.760	0.442	25.110	第一種	0.369	Y
A	區域(總粉塵)	5.819	1.481	25.445	第一種	1.093	Y
A	區域(總粉塵)	3.386	0.664	19.612	第一種	1.388	Y
B	個人(可呼吸性)	1.068	0.279	26.172	第一種	0.355	Y
B	區域(總粉塵)	4.465	1.059	23.724	第一種	1.166	Y
B	區域(可呼吸性)	0.770	0.080	10.395	第一種	0.807	N
個人(可呼吸性粉塵)*		1.112±0.062	0.200±0.112	18.313±11.115		超過暴露標準	87.50%
區域(可呼吸性粉塵)		1.265±0.700	0.261±0.256	17.753±10.405			
區域(總粉塵)		4.637±1.008	1.170±0.391	24.750±4.391			

*平均值±標準差

表 19 鑄造業作業環境(研磨區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵 種類	我國容 許濃度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
B	區域(總粉塵)	0.645	0.348	53.912	第一種	0.537	Y
B	區域(可呼吸性)	0.129	0.043	33.324	第一種	0.283	N
C	個人(可呼吸性)	3.010	0.203	6.730	第二種	1.000	Y
C	區域(總粉塵)	3.131	0.191	6.112	第二種	4.000	N
C	區域(可呼吸性)	0.417	0.051	12.255	第一種	0.702	N
D	個人(可呼吸性)	0.668	0.043	6.476	第二種	1.000	N
D	個人(可呼吸性)	0.566	0.097	17.176	第一種	0.521	Y
D	區域(總粉塵)	1.526	0.250	16.414	第一種	1.629	N
D	區域(可呼吸性)	0.474	0.098	20.585	第一種	0.443	Y
D	區域(總粉塵)	1.060	0.121	11.426	第一種	2.234	N
D	區域(可呼吸性)	0.188	0.036	19.007	第一種	0.476	N
D	區域(總粉塵)	0.098	0.049	49.927	第一種	0.578	N
個人(可呼吸性粉塵)**		1.415±1.383	0.114±0.081	10.127±6.106		超過暴露標準	33.33%
區域(可呼吸性粉塵)		0.302±0.169	0.057±0.028	21.293±8.797			
區域(總粉塵)		1.292±1.155	0.192±0.115	27.558±22.579			

*研磨區=個人加工、研磨、磨毛邊；**平均值±標準差

三、陶瓷業勞工作業環境粉塵暴露評估結果

本研究於 109 年 10 月間，針對陶瓷業 4 家不同規模之工廠進行現場勞工暴露調查。其中 G 廠以生產外牆磚為主，H 與 J 廠以地磚及壁磚為主，而 I 廠則是外牆磚、地磚、壁磚皆有生產。各廠之作業特性、採樣規劃及現場採樣位置圖如附錄二。

本研究針對陶瓷業四廠次(G、H、I、J 廠)之粉塵暴露調查，共採集現場樣品 63 個，包括個人樣品 7 個、區域樣品 48 個及現場空白樣品 8 個 (每廠次 2 個)。詳細調查結果如表 20~23 所示。

分析結果發現，在粉塵暴露上，G、H、I 及 J 廠之平均個人(可呼吸性粉塵)、區域(可呼吸性粉塵)及區域(總粉塵)分別為(0.085、0.049±0.003 及 0.455±0.363 mg/m³)、(NA、0.126±0.074 及 0.690±0.515 mg/m³)、(0.908±1.107、0.085±0.032 及 0.551±0.556 mg/m³)與

(0.075 ± 0.016 、 0.902 ± 1.851 及 0.746 ± 0.481 mg/m^3)；在結晶型游離二氧化矽(石英)濃度上，G、H、I 及 J 廠之平均個人(可呼吸性)、區域(可呼吸性)及區域(總粉塵)分別為 (0.046 、 0.041 ± 0.001 及 0.299 ± 0.280 mg/m^3)、(NA、 0.055 ± 0.022 及 0.417 ± 0.323 mg/m^3)、(0.289 ± 0.338 、 0.047 ± 0.006 及 0.231 ± 0.207 mg/m^3) 與 (0.040 ± 0.002 、 0.456 ± 0.930 及 0.363 ± 0.265 mg/m^3)。四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.354 ± 0.655 、 0.383 ± 1.103 及 0.605 ± 0.465 mg/m^3 ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度及區域總結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度分別為 0.124 ± 0.198 、 0.195 ± 0.554 及 0.326 ± 0.263 mg/m^3 。

本調查四間陶瓷廠生產的產品相似，因此其製程也相近，差異在於使用之原料配方不同，及所生產的磁磚產品應用於不同場域。在粉塵及結晶型游離二氧化矽(石英)暴露濃度上，相對於鑄造廠之暴露濃度較低，原因是本行業主要的暴露情境在於壓製成胚前的製程(混料)，而一旦上釉入窯燒成後，若磁磚無碎裂，則鮮有粉塵飄散的問題。另因廠區較大與整體通風良好，導致整體之暴露濃度較低。

陶瓷廠不同作業區(原料區、製胚區、釉區、燒成區、其他區)暴露調查結果彙整發現 (表 24~28)，在製胚區所測得之平均粉塵及結晶型游離二氧化矽之濃度最高，而超過法定容許暴露濃度標準的比例最高為原料區($42.86\% = 3/7$)，其次為製胚區 ($41.18\% = 7/17$)，再者為釉區($16.67\% = 1/6$)與燒成區($14.29\% = 1/7$)。

本研究針對不同作業區採集之樣品的粉塵濃度、二氧化矽(石英)濃度及粉塵中二氧化矽百分比進行統計檢定發現，區域總粉塵樣品中之石英濃度具有統計上顯著性差異 (Kruskall-Wallis Test, $p<0.05$)，其中製胚區之濃度(平均 0.586 ± 0.298 mg/m^3)顯著高於其他區 (平均 0.090 ± 0.026 mg/m^3)。

表 20 陶瓷 G 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容 許濃度 TWA (mg/m ³)
製胚區	個人	可呼吸性	0.085	0.046	53.997	第一種	0.179
製胚區	區域	可呼吸性	0.047	0.040	85.195	第一種	0.115
製胚區	區域	總粉塵	1.120	0.833	74.337	第一種	0.393
混砂區	個人	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
混砂區	區域	總粉塵	0.470	0.242	51.393	第一種	0.562
混砂區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
噴霧乾燥區	區域	總粉塵	0.471	0.343	72.797	第一種	0.401
噴霧乾燥區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
燒成區	區域	總粉塵	0.392	0.204	52.090	第一種	0.555
燒成區	區域	可呼吸性	0.051	0.041	79.975	第一種	0.122
製釉區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
製釉區	區域	總粉塵	0.060	0.051	84.827	第一種	0.346
包裝區	區域	總粉塵	0.216	0.122	56.230	第一種	0.515
包裝區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
個人(可呼吸性粉塵)**			0.085	0.046	53.997	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.049±0.003	0.041±0.001	82.585±3.691	-	-
區域(總粉塵)			0.455±0.363	0.299±0.280	65.279±13.924	-	-

*平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 21 陶瓷 H 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
混砂區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
混砂區	區域	總粉塵	0.206	0.085	41.249	第一種	0.694
製胚區	區域	可呼吸性	0.064	0.042	65.411	第一種	0.148
製胚區	區域	總粉塵	0.637	0.403	63.157	第一種	0.460
製胚區	區域	可呼吸性	0.099	0.044	44.701	第一種	0.214
製胚區	區域	總粉塵	1.526	0.929	60.883	第一種	0.477
施釉區	區域	可呼吸性	0.106	0.044	41.244	第一種	0.231
施釉區	區域	總粉塵	0.844	0.537	63.697	第一種	0.457
燒成區	區域	可呼吸性	0.234	0.088	37.381	第一種	0.254
燒成區	區域	總粉塵	0.826	0.490	59.283	第一種	0.490
包裝區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
包裝區	區域	總粉塵	0.102	0.059	57.711	第一種	0.502
個人(可呼吸性粉塵)*			-	-	-	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.126±0.074	0.055±0.022	47.184±12.514	-	-
區域(總粉塵)			0.690±0.515	0.417±0.323	57.663±8.355	-	-

*平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 22 陶瓷 I 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃 度 TWA (mg/m ³)
包裝區	區域	總粉塵	0.203	0.097	47.543	第一種	0.606
包裝區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
原料放置區	區域	可呼吸性	0.091	0.053	57.791	第一種	0.167
原料放置區	區域	總粉塵	0.948	0.512	53.943	第一種	0.536
製胚區	區域	總粉塵	1.499	0.480	32.059	第一種	0.881
製胚區	區域	可呼吸性	0.114	0.047	41.494	第一種	0.230
製胚區	區域	總粉塵	0.367	0.140	38.242	第一種	0.745
製胚區	區域	可呼吸性	0.050	0.042	84.309	第一種	0.116
製胚區	個人	可呼吸性	0.125	0.050	39.756	第一種	0.239
製胚區	個人	可呼吸性	1.691	0.528	31.238	第一種	0.301
燒成區	區域	總粉塵	0.098	0.069	70.122	第一種	0.416
燒成區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
施釉區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
施釉區	區域	總粉塵	0.193	0.086	44.533	第一種	0.645
個人(可呼吸性粉塵)*			0.908±1.107	0.289±0.338	35.497±6.023	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.085±0.032	0.047±0.06	61.198±21.610	-	-
區域(總粉塵)			0.551±0.556	0.231±0.207	47.740±13.311	-	-

*平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 23 陶瓷 J 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃 度 TWA (mg/m ³)
混砂區	區域	可呼吸性	0.120	0.041	33.918	第一種	0.278
混砂區	區域	總粉塵	1.372	0.544	39.617	第一種	0.721
製胚區	個人	可呼吸性	0.087	0.040	45.910	第一種	0.209
製胚區	個人	可呼吸性	0.081	0.042	51.686	第一種	0.186
製胚區	區域	總粉塵	1.111	0.729	65.618	第一種	0.444
製胚區	區域	可呼吸性	4.212*	2.120	50.339	第一種	0.191
施釉區	區域	總粉塵	0.548	0.213	38.909	第一種	0.733
施釉區	區域	可呼吸性	0.060	0.040	67.184	第一種	0.145
包裝區	區域	可呼吸性	0.064	0.040	63.080	第一種	0.154
包裝區	區域	總粉塵	0.198	0.082	41.294	第一種	0.693
研磨加工區	個人	可呼吸性	0.056	0.038	68.427	第一種	0.142
研磨加工區	區域	總粉塵	N.D.	-	-	-	-
研磨加工區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
燒成區	區域	總粉塵	0.503	0.247	48.993	第一種	0.588
燒成區	區域	可呼吸性	0.054	0.041	76.668	第一種	0.127
個人(可呼吸性粉塵)**			0.075±0.016	0.040±0.002	55.341±11.695	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.902±1.851	0.456±0.930	58.238±16.560	-	-
區域(總粉塵)			0.746±0.481	0.363±0.265	46.886±11.215	-	-

*濾紙粉塵重>2mg； **平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 24 陶瓷業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許濃 度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
G	個人(可呼吸 性)	N.D.	-	-	-	-	-
G	區域(總粉塵)	0.470	0.242	51.393	第一種	0.562	N
G	區域(可呼吸 性)	N.D.	-	-	-	-	-
G	區域(總粉塵)	0.471	0.343	72.797	第一種	0.401	Y
G	區域(可呼吸 性)	N.D.	-	-	-	-	-
H	區域(可呼吸 性)	N.D.	-	-	-	-	-
H	區域(總粉塵)	0.206	0.085	41.249	第一種	0.694	N
I	區域(可呼吸 性)	0.091	0.053	57.791	第一種	0.167	N
I	區域(總粉塵)	0.948	0.512	53.943	第一種	0.536	Y
J	區域(可呼吸 性)	0.120	0.041	33.918	第一種	0.278	N
J	區域(總粉塵)	1.372	0.544	39.617	第一種	0.721	Y
個人(可呼吸性粉 塵)**		-	-	-		超過暴露標準	42.86%
區域(可呼吸性粉 塵)		0.106±0.021	0.047±0.008	45.855±16.881			
區域(總粉塵)		0.693±0.464	0.345±0.191	51.800±13.280			

*原料區=原料放置、混砂、噴霧乾燥；**平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 25 陶瓷業作業環境(製胚區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許 濃度 TWA (mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
G	個人(可呼吸性)	0.085	0.046	53.997	第一種	0.179	N
G	區域(可呼吸性)	0.047	0.040	85.195	第一種	0.115	N
G	區域(總粉塵)	1.120	0.833	74.337	第一種	0.393	Y
H	區域(可呼吸性)	0.064	0.042	65.411	第一種	0.148	N
H	區域(總粉塵)	0.637	0.403	63.157	第一種	0.460	Y
H	區域(可呼吸性)	0.099	0.044	44.701	第一種	0.214	N
H	區域(總粉塵)	1.526	0.929	60.883	第一種	0.477	Y
I	區域(總粉塵)	1.499	0.480	32.059	第一種	0.881	Y
I	區域(可呼吸性)	0.114	0.047	41.494	第一種	0.230	N
I	區域(總粉塵)	0.367	0.140	38.242	第一種	0.745	N
I	區域(可呼吸性)	0.050	0.042	84.309	第一種	0.116	N
I	個人(可呼吸性)	0.125	0.050	39.756	第一種	0.239	N
I	個人(可呼吸性)	1.691	0.528	31.238	第一種	0.301	Y
J	個人(可呼吸性)	0.087	0.040	45.910	第一種	0.209	N
J	個人(可呼吸性)	0.081	0.042	51.686	第一種	0.186	N
J	區域(總粉塵)	1.111	0.729	65.618	第一種	0.444	Y
J	區域(可呼吸性)	4.212***	2.120	50.339	第一種	0.191	Y
個人(可呼吸性粉塵)**		0.414±0.714	0.141±0.216	44.517±9.249	超過暴露標準		41.18%
區域(可呼吸性粉塵)		0.764±1.689	0.389±0.848	61.908±19.509			
區域(總粉塵)		1.043±0.463	0.586±0.298	55.716±16.684			

*製胚區=製胚區；**平均值±標準差；***濾紙粉塵重>2mg

表 26 陶瓷業作業環境(釉區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許 濃度 TWA (mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
G	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
G	區域(總粉塵)	0.060	0.051	84.827	第一種	0.346	N
H	區域(可呼吸性)	0.106	0.044	41.244	第一種	0.231	N
H	區域(總粉塵)	0.844	0.537	63.697	第一種	0.457	Y
I	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
I	區域(總粉塵)	0.193	0.086	44.533	第一種	0.645	N
J	區域(可呼吸性)	0.060	0.040	67.184	第一種	0.145	N
J	區域(總粉塵)	0.548	0.213	38.909	第一種	0.733	N
個人(可呼吸性粉塵)**		-	-	-	超過暴露標準		16.67%
區域(可呼吸性粉塵)		0.083±0.033	0.042±0.003	54.214±18.342			
區域(總粉塵)		0.411±0.354	0.222±0.221	57.992±20.800			

*釉區=製釉、施釉；**平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 27 陶瓷業作業環境(燒成區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許 濃度 TWA (mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
G	區域(可呼吸性)	0.051	0.041	79.975	第一種	0.122	N
G	區域(總粉塵)	0.392	0.204	52.090	第一種	0.555	N
H	區域(可呼吸性)	0.234	0.088	37.381	第一種	0.254	N
H	區域(總粉塵)	0.826	0.490	59.283	第一種	0.490	Y
I	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
I	區域(總粉塵)	0.098	0.069	70.122	第一種	0.416	N
J	區域(總粉塵)	0.503	0.247	48.993	第一種	0.588	N
J	區域(可呼吸性)	0.054	0.041	76.668	第一種	0.127	N
個人(可呼吸性粉塵)**		-	-	-	超過暴露標準		14.29%
區域(可呼吸性粉塵)		0.113±0.105	0.057±0.027	64.675±23.695			
區域(總粉塵)		0.455±0.301	0.253±0.176	57.622±9.382			

*燒成區=燒成區(入窯前)；**平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

表 28 陶瓷業作業環境(其他區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵 種類	我國容 許濃度 TWA (mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
G	區域(總粉塵)	0.216	0.122	56.230	第一種	0.515	N
G	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
H	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
H	區域(總粉塵)	0.102	0.059	57.711	第一種	0.502	N
I	區域(總粉塵)	0.203	0.097	47.543	第一種	0.606	N
I	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
J	區域(可呼吸性)	0.064	0.040	63.080	第一種	0.154	N
J	區域(總粉塵)	0.198	0.082	41.294	第一種	0.693	N
J	個人(可呼吸性)	0.056	0.038	68.427	第一種	0.142	N
J	區域(總粉塵)	N.D.	-	-	-	-	-
J	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
個人(可呼吸性粉塵)**		0.056	0.038	68.427	超過暴露標準		0.00%
區域(可呼吸性粉塵)		0.064	0.040	63.080			
區域(總粉塵)		0.180±0.052	0.090±0.026	50.695±7.707			

*其他區=包裝區、加工區；**平均值±標準差；N.D.低於偵測下限

四、玻璃製造業勞工作業環境粉塵暴露評估結果

本研究於 109 年 11 月，針對玻璃製造業 4 家不同規模及不同產品類型之工廠進行現場勞工暴露調查。其中 K 廠以平板玻璃為主；L 廠以光學玻璃為主；M 廠以平板玻璃、強化玻璃等各式玻璃板；N 廠則是生產 PCB 玻璃纖維布。各廠之作業特性、採樣規劃及現場採樣位置圖如附錄三。

本研究針對玻璃製造業四廠(K~N 廠)之粉塵暴露調查，共採集現場樣品 42 個，包括個人樣品 4 個、區域樣品 30 個及現場空白樣品 8 個 (每廠次 2 個)。詳細分析結果如表 29~32。

分析結果發現，在粉塵上，K、L、M 及 N 廠之平均個人(可呼吸性粉塵)、區域(可呼吸性粉塵)及區域(總粉塵)分別為(0.129、0.048±0.003 及 0.172±0.077 mg/m³)、(0.138、0.106±0.061 及 1.731±2.786 mg/m³)、(NA、0.151±0.116 及 0.88±0.93 mg/m³)與 (NA、0.060±0.003 及 0.110 mg/m³)；在結晶型游離二氧化矽(石英)濃度上，K、L、M 及 N 廠之平均個人(可呼吸性)、區域(可呼吸性)及區域(總粉塵)分別為 (0.040、0.038±0.001 及 0.074

$\pm 0.045 \text{ mg/m}^3$)、 $(0.070、0.069 \pm 0.054 \text{ 及 } 0.860 \pm 1.412 \text{ mg/m}^3)$ 、 $(\text{NA}、0.042 \pm 0.001 \text{ 及 } 0.116 \pm 0.072 \text{ mg/m}^3)$ 與 $(\text{NA}、0.041 \pm 0.001 \text{ 及 } 0.051 \text{ mg/m}^3)$ 。四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.134 ± 0.006 、 0.099 ± 0.080 及 $0.794 \pm 1.440 \text{ mg/m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度及區域總結晶型游離二氧化矽(石英)平均濃度分別為 0.055 ± 0.021 、 0.048 ± 0.027 及 $0.283 \pm 0.697 \text{ mg/m}^3$ 。

本研究調查之四廠生產之玻璃製品應用於各個領域，其中 K 廠以平板玻璃為主；L 廠為光學(鏡頭)玻璃；M 廠是各式玻璃板；N 廠則為玻璃纖維布。製作玻璃時首先須將各種原料粉碎，均勻混合後送入窯內進行高溫熔解，產出的玻璃膏經冷卻降溫後形成玻璃，而光學(鏡頭)玻璃製程甚至需經過兩次之熔解及冷卻成形。由於玻璃的用途差異，各廠的原料配比也不相同，更甚者是每日皆須調整以因應客戶之需求。

在現場訪視中發現，玻璃製造業二氧化矽粉塵主要暴露情境在於原料混合的區域，因此四廠均嚴格要求作業勞工配戴個人防護具，且投料口也多設置集塵設備，以降低人員之暴露。惟在 L 廠之投料區的粉塵量較高，使得該廠之總粉塵平均濃度提高。

如依據玻璃製造廠不同作業區暴露調查結果進行彙整 (表 33~35) 比較發現，唯有在原料區有超過容許暴露濃度標準的情形($15.38\% = 2/13$)，其餘區域皆低於容許暴露標準。

本研究針對 3 種不同作業區採集之樣品進行統計檢定發現，不同作業區採集之粉塵(包括區域總粉塵、區域可呼吸性粉塵與個人可呼吸性粉塵)中的粉塵濃度、二氧化矽(石英)濃度及粉塵中二氧化矽百分比並無統計上顯著差異(Kruskall-Wallis Test, $p > 0.05$)。

表 29 玻璃製造 K 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或可呼吸性粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離二氧化矽濃度 (mg/m ³)	含結晶型游離二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
熔解區	區域	可呼吸性	0.048	0.037	77.202	第一種	0.126
熔解區	區域	總粉塵	0.260	0.047	18.176	第一種	1.487
磨料區	區域	可呼吸性	0.045	0.039	85.503	第一種	0.114
磨料區	區域	總粉塵	0.199	0.141	70.859	第一種	0.412
投料區	個人	可呼吸性	0.129	0.040	30.798	第一種	0.305
投料區	區域	可呼吸性	0.050	0.038	75.388	第一種	0.129
投料區	區域	總粉塵	0.151	0.062	41.417	第一種	0.691
加工區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
加工區	區域	總粉塵	0.078	0.047	61.088	第一種	0.476
個人(可呼吸性粉塵)**			0.129	0.040	30.798	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.048±0.003	0.038±0.001	79.364±5.393	-	-
區域(總粉塵)			0.172±0.077	0.074±0.045	47.885±23.285	-	-

*粉塵重量接近偵測極限 0.03mg、未列入平均值計算、；**平均值±標準差；N.D. 低於偵測下限

表 30 玻璃製造 L 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或可呼吸性粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離二氧化矽濃度 (mg/m ³)	含結晶型游離二氧化矽%	粉塵種類	我國容許濃度 TWA (mg/m ³)
熔解區	區域	可呼吸性	0.041	0.037	89.487	第一種	0.109
熔解區	區域	總粉塵	0.094	0.045	47.868	第一種	0.602
投料區	區域	總粉塵	4.948*	2.491	50.339	第一種	0.573
投料區	區域	可呼吸性	0.163	0.132	81.227	第一種	0.120
投料區	個人	可呼吸性	0.138	0.070	50.648	第一種	0.190
個人加工區	區域	可呼吸性	0.113	0.039	34.019	第一種	0.278
個人加工區	區域	總粉塵	0.152	0.044	29.072	第一種	0.965
個人(可呼吸性粉塵)**			0.138	0.070	50.648	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.106±0.061	0.069±0.054	68.244±29.926	-	-
區域(總粉塵)			1.731±2.786	0.860±1.412	42.426±11.631	-	-

*濾紙粉塵重>2mg；**平均值±標準差

表 31 玻璃製造 M 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許 濃度 TWA (mg/m ³)
原料放置區	區域	總粉塵	0.301	0.215	71.481	第一種	0.408
原料放置區	區域	可呼吸性	0.069	0.041	59.677	第一種	0.162
投料區	區域	可呼吸性	0.322	0.042	13.124	第一種	0.661
投料區	區域	總粉塵	2.265	0.121	5.322	第二種	4.000
投料區	個人	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
熔解區	區域	可呼吸性	0.120	0.042	34.608	第一種	0.273
熔解區	區域	總粉塵	0.544	0.070	12.919	第一種	2.011
成品加工區	區域	總粉塵	0.422	0.057	13.546	第一種	1.930
成品加工區	區域	可呼吸性	0.094	0.041	43.120	第一種	0.222
個人(可呼吸性粉塵)**			-	-	-	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.151±0.116	0.042±0.001	37.632±19.373	-	-
區域(總粉塵)			0.883±0.927	0.116±0.072	25.817±30.671	-	-

*粉塵重量接近偵測極限 0.03mg、未列入平均值計算；**平均值±標準差；N.D. 低於偵測下限

表 32 玻璃製造 N 廠作業環境粉塵暴露濃度監測結果

測定點	樣品 類型	總粉塵或 可呼吸性 粉塵	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵 種類	我國容許濃 度 TWA (mg/m ³)
投料區	區域	可呼吸性	0.062	0.042	67.699	第一種	0.143
投料區	區域	總粉塵	N.D.	-	-	-	-
投料區	個人	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
原料放置區	區域	總粉塵	N.D.	-	-	-	-
原料放置區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
熔解區	區域	可呼吸性	0.058	0.040	69.544	第一種	0.140
熔解區	區域	總粉塵	0.110	0.051	46.556	第一種	0.618
撚紗區	區域	可呼吸性	N.D.	-	-	-	-
撚紗區	區域	總粉塵	N.D.	-	-	-	-
個人(可呼吸性粉塵)**			-	-	-	-	-
區域(可呼吸性粉塵)			0.06±0.003	0.041±0.001	68.622±1.305	-	-
區域(總粉塵)			0.110	0.051	46.556	-	-

*粉塵重量接近偵測極限 0.03mg、未列入平均值計算；**平均值±標準差

表 33 玻璃製造業作業環境(原料區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容 許濃度 TWA (mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
K	區域(可呼吸性)	0.045	0.039	85.503	第一種	0.114	N
K	區域(總粉塵)	0.199	0.141	70.859	第一種	0.412	N
K	個人(可呼吸性)	0.129	0.040	30.798	第一種	0.305	N
K	區域(可呼吸性)	0.050	0.038	75.388	第一種	0.129	N
K	區域(總粉塵)	0.151	0.062	41.417	第一種	0.691	N
L	區域(可呼吸性)	0.163	0.132	81.277	第一種	0.120	Y
L	區域(總粉塵)	4.948***	2.491	50.339	第一種	0.573	Y
L	個人(可呼吸性)	0.138	0.070	50.648	第一種	0.190	N
M	區域(可呼吸性)	0.069	0.041	59.677	第一種	0.162	N
M	區域(總粉塵)	0.301	0.215	71.481	第一種	0.408	N
M	區域(可呼吸性)	0.322	0.042	13.124	第一種	0.661	N
M	區域(總粉塵)	2.265	0.121	5.322	第二種	4.000	N
M	個人(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
N	區域(總粉塵)	N.D.	-	-	-	-	-
N	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
N	區域(可呼吸性)	0.062	0.042	67.699	第一種	0.143	N
N	區域(總粉塵)	N.D.	-	-	-	-	-
N	個人(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
個人(可呼吸性粉塵)**		0.134±0.006	0.055±0.021	40.723±14.036	超過暴露標準		15.38%
區域(可呼吸性粉塵)		0.119±0.109	0.056±0.037	63.778±26.499			
區域(總粉塵)		1.573±2.086	0.606±1.055	47.884±27.130			

*原料區=原料放置、磨料、投料；**平均值±標準差；***濾紙粉塵重>2mg；N.D.低於偵測下限

表 34 玻璃製造業作業環境(熔解區)粉塵暴露濃度監測結果彙整

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容 許濃度 TWA (mg/m ³)	是否我 國超過 容許濃 度標準
K	區域(可呼吸性)	0.048	0.037	77.202	第一種	0.126	N
K	區域(總粉塵)	0.260	0.047	18.176	第一種	1.487	N
L	區域(可呼吸性)	0.041	0.037	89.487	第一種	0.109	N
L	區域(總粉塵)	0.094	0.045	47.868	第一種	0.602	N
M	區域(可呼吸性)	0.120	0.042	34.608	第一種	0.273	N
M	區域(總粉塵)	0.544	0.070	12.919	第一種	2.011	N
N	區域(可呼吸性)	0.058	0.040	69.544	第一種	0.140	N
N	區域(總粉塵)	0.110	0.051	46.556	第一種	0.618	N
個人(可呼吸性粉 塵)**		-	-	-	超過暴露標準		0.00%
區域(可呼吸性粉塵)		0.067±0.036	0.039±0.002	67.710±23.547			
區域(總粉塵)		0.252±0.209	0.053±0.011	31.380±18.415			

*熔解區=熔解區(入窯前)；**平均值±標準差

表 35 玻璃製造業作業環境(加工區)粉塵暴露濃度監測結果彙

工廠	樣品類型	粉塵濃度 (mg/m ³)	結晶型游離 二氧化矽濃 度(mg/m ³)	含結晶型游離 二氧化矽%	粉塵種 類	我國容許濃 度 TWA(mg/m ³)	是否超 過我國 容許濃 度標準
K	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
K	區域(總粉塵)	0.078	0.047	61.088	第一種	0.476	N
L	區域(可呼吸性)	0.113	0.039	34.019	第一種	0.278	N
L	區域(總粉塵)	0.152	0.044	29.072	第一種	0.965	N
M	區域(可呼吸性)	0.094	0.041	43.120	第一種	0.222	N
M	區域(總粉塵)	0.422	0.057	13.546	第一種	1.930	N
N	區域(可呼吸性)	N.D.	-	-	-	-	-
N	區域(總粉塵)	N.D.	-	-	-	-	-
個人(可呼吸性粉 塵)**		-	-	-	超過暴露標準		0.00%
區域(可呼吸性粉 塵)		0.104±0.013	0.040±0.001	38.570±6.435			
區域(總粉塵)		0.217±0.181	0.049±0.007	34.569±24.243			

*加工區=加工區、撚紗區；**平均值±標準差；***不列入平均計算；N.D.低於偵測下限

五、二氧化矽之原料與空氣中二氧化矽濃度之相關性及探討

本研究針對各廠現場收集之原料中結晶型二氧化矽(石英)比例與其作業場所空氣中粉塵含結晶型二氧化矽(石英)比例進行皮爾森相關性分析，結果顯示兩者間並無統計上顯著之相關性，因此，無法以原料之結晶型二氧化矽(石英)比例來推估現場空氣粉塵含二氧化矽暴露濃度。雖然相關性統計之結果可受到樣本數及採樣誤差之影響，但本研究發現各廠內空氣粉塵含二氧化矽暴露濃度及原料樣品中所含之二氧化矽(石英)百分比之變異性均大，因此，單一數值(原料中結晶型二氧化矽(石英)之比例)與多變之現場空氣粉塵含二氧化矽暴露濃度或其含二氧化矽之比例間，勢必無法呈現良好之相關性。而可能造成原料之二氧化矽(石英)比例與現場空氣粉塵含二氧化矽比例無明顯相關性的原因包括原料之粒徑分布特性，本研究發現各廠原料之粒徑分布中位數(D_{50})差異頗大，例如陶瓷業均低於 $20\mu\text{m}$ ，而鑄造業可超過 $500\mu\text{m}$ (表 10)，如考慮現場粉塵樣品採集粒徑之特性及分布不均勻特性，這些因素均可導致空氣樣品中粉塵特性與原料中不同。

針對三種行業(鑄造業、陶瓷業、玻璃業)中不同作業區採集之空氣粉塵樣品所含之二氧化矽(石英)百分比進行統計檢定，結果發現，三種行業中，不同作業區採集之粉塵(包括區域總粉塵、區域可呼吸性粉塵與個人可呼吸性粉塵)中所含之游離二氧化矽(石英)百分比並無統計上顯著差異(Kruskal-Wallis Test, $p>0.05$)。但如進行跨行業比較時發現 (表 36)，陶瓷業區域總粉塵樣品中所含之二氧化矽百分比最高(平均值為 54.963%)，顯著高於鑄造業(平均值為 23.613%)及玻璃業(平均值為 35.974%)之樣品；區域可呼吸性粉塵中所含之二氧化矽百分比以玻璃業最高(平均值為 61.380%)，陶瓷業次之(平均值為 60.036%)，兩者均顯著高於鑄造業(平均值為 20.581%)。玻璃業之原料區及熔解區可呼吸性粉塵樣品中所含之二氧化矽平均百分比分別為 63.778% 及 67.710%，高於總粉塵樣品中的 47.884% 及 31.380%，也導致本行業在可呼吸性粉塵樣品中所含之二氧化矽百分比之提高。在個人可呼吸性粉塵上，樣品中所含之二氧化矽百分比以陶瓷業最高(平均值為 48.502%)，顯著高於鑄造業(平均值為 14.601%)。依據文獻之結果(表 37)顯示，鑄造業、陶瓷業及玻璃業現場可呼吸性粉塵中游離二氧化矽(石英)的百分比可隨不同之廠家及製程區域，而有所不同，本研究獲得之平均值結果，在鑄造業屬相對偏低，但在陶瓷業及玻璃業中則偏高，但由於各研究間數據變動大，本研究之結果仍能呼應文獻之數值範圍。

表 36 三種不同行業作業環境粉塵暴露濃度中石英佔比統計檢定結果

粉塵種類	行 業	廠數(總 樣本數)	石英 (%) ¹	顯著性 (p 值) ²	分組比較 ³
總粉塵 (區域)	鑄造業	4 (16)	23.613±11.226 (6.112 ~ 53.912)	<0.001	鑄造業<陶瓷 業 玻璃業<陶瓷 業
	陶瓷業	4 (20)	54.963±13.148 (35.151 ~ 84.827)		
	玻璃業	4 (9)	35.974±18.356 (12.919 ~ 61.088)		
可呼吸性 粉塵(區 域)	鑄造業	4 (16)	20.581±11.411 (7.552 ~ 40.649)	<0.001	鑄造業<陶瓷 業 鑄造業<玻璃 業
	陶瓷業	4 (11)	60.036±17.188 (33.918 ~ 85.195)		
	玻璃業	4 (10)	61.380±21.932 (34.019~ 89.487)		
可呼吸性 粉塵(個 人)	鑄造業	4 (15)	14.601±7.919 (6.377~ 29.061)	<0.001	鑄造業<陶瓷 業
	陶瓷業	4 (6)	48.502±12.795 (31.238~ 68.427)		
	玻璃業	4 (2)	40.723±14.036 (30.798~ 50.648)		

¹平均值±標準差(範圍)；²無母數 Kruskal-Wallis Test；³Dunn Test, p<0.05

表 37 三種不同行業作業環境粉塵暴露濃度中石英佔比文獻彙整結果

行業 (樣品)	樣本數	可呼吸性粉塵石英%	資料來源
鑄造 (區域)	22	3.0	[11]
鑄造 (區域)	33323	5.3	[11]
鑄造 (個人)	23	28±10*	[5] 中的 A 廠 呖喃造模鑄造
鑄造 (個人)	14	38±12*	[5] 中的 B 廠 呖喃造模鑄造
鑄造 (個人)	38	49±14*	[5] 中的 C 廠 水玻璃造模
鑄造 (個人)	23	56±34*	[5] 中的 D 廠 水玻璃造模
鑄造 (個人)	435	5.9**	[30]
鑄造 (個人)	12	20.5**	[33]A 廠
鑄造 (個人)	12	36.3**	[33]B 廠
鑄造 (個人)	6	31.7**	[33]C 廠
陶瓷 (區域)	6	4.3	[11]
陶瓷 (區域)	152	4.2	[11]
陶瓷 (區域)	18	32±23*	[25] 中的 A 廠 建築陶瓷
陶瓷 (區域)	18	20±7.5*	[25] 中的 B 廠 建築陶瓷
陶瓷 (區域)	22	38±24*	[25] 中的 C 廠 建築陶瓷
陶瓷 (區域)	18	21±15*	[25] 中的 D 廠 衛生陶瓷
陶瓷 (區域)	18	27±14*	[25] 中的 E 廠 衛生陶瓷
玻璃 (區域)	36	7.0	[11]
玻璃 (區域)	245	8.1	[11]
玻璃 (區域)	7	3.2±2*	[26] 中的 A 廠 螢幕玻璃
玻璃 (區域)	14	16±2.3*	[26] 中的 B 廠 玻璃瓶

*使用該研究報告中之石英佔比(石英濃度除以可呼吸粉塵濃度)數據，再計算平均值±標準差

**該研究報告中之平均數據，將其平均石英濃度除以平均可呼吸性粉塵濃度所得之石英佔比(平均值)

在不同類型之樣品其石英佔比相關性分析上發現，區域可呼吸性粉塵及相同區域個人可呼吸性粉塵中平均石英佔比之相關性($r=0.845$, $p=0.004$)最高、區域總粉塵及相同區域個人可呼吸性粉塵中平均石英佔比相關性 ($r=0.810$, $p=0.008$)次之，同步採集之區域總粉塵及區域可呼吸性粉塵中平均石英佔比相關($r=0.780$, $p=0.003$, 圖 4)再次之。由圖 4 中也可發現三種行業在數據分布上之差異性。

另外，各行業原料 (未經研磨處理)之粒徑(表 10)與粉塵樣品中石英佔比間亦無顯著之相關性。

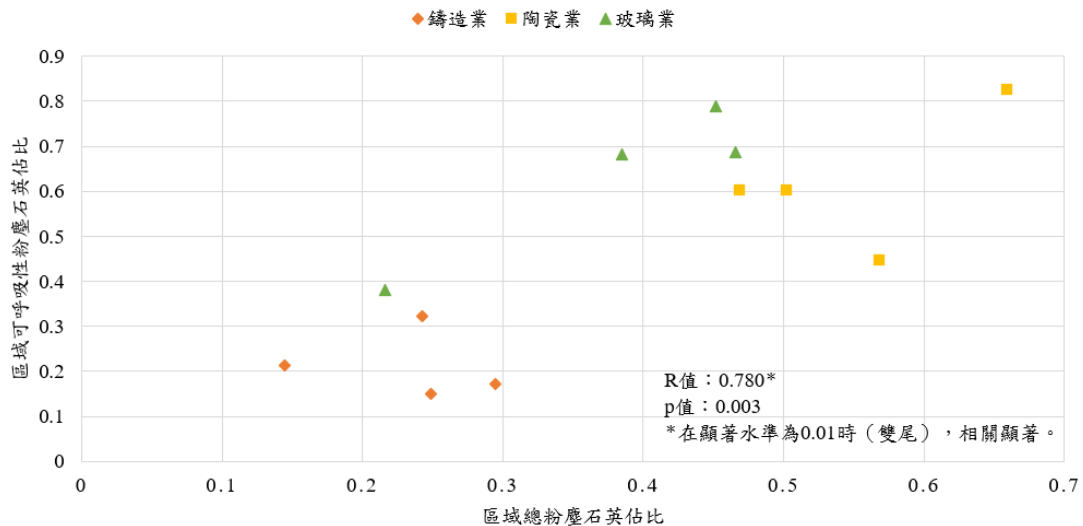


圖 4 同步採集之區域總粉塵及區域可呼吸性粉塵石英佔比相關性

六、使用含二氧化矽原料行業其作業環境符合我國勞工作業場所容許暴露標準暴露實態

本研究藉作業環境監測進行調查使用含二氧化矽原料行業的三種行業(鑄造業、陶瓷業、玻璃製造業)之勞工粉塵及結晶型游離二氧化矽(石英)暴露濃度，以作為行業危害評估之依據。

調查結果彙整發現 (表 38)，各廠之粉塵樣品多數屬於我國法規中的第一類粉塵 (結晶型游離二氧化矽含量超過 10%)，顯示其危害之潛勢相對較大。有部分廠區的區域樣品濃度偏高 (見各廠監測結果)，超過我國含結晶型游離二氧化矽粉塵容許暴露標準值，而個人採樣結果，鑄造業有 8 人超過容許暴露標準，陶瓷業則有 1 人(表 39)。如以較為嚴格之美國 OSHA 現行 PEL (8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$) 為判斷依據，則鑄造業、陶瓷業、玻璃製造業之勞工個人暴露不合格率分別由 53.33% 提高至 73.33% (=11/15)、由 16.67% 提高至 33.33% (=2/6) 及由 0% 提高至 50% (=1/2)；但如改用國際上常用之暴露標準(8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$) 進行判斷，不合格率分別減至 40.00% (=6/15)、16.67% (=1/6) 及 0%，這些變化，除可提供我國未來調整游離二氧化矽容許暴露標準值時之參考外，亦可提供事業單位規劃相關控制作為，及早因應。

表 38 本研究三種行業作業環境石英粉塵符合我國第一種粉塵之比例

粉塵種類	行業	廠數(總樣本數)	第一種粉塵比例
總粉塵 (區域)	鑄造業	4 (31)	93.55% (29/31)
	陶瓷業	4 (23)	100% (23/23)
	玻璃業	4 (12)	83.33% (10/12)
可呼吸性粉塵 (區域)	鑄造業	4 (27)	77.78% (21/27)
	陶瓷業	4 (14)	100% (14/14)
	玻璃業	4(12)	100% (12/12)
可呼吸性粉塵 (個人)	鑄造業	4 (15)	66.67% (10/15)
	陶瓷業	4 (6)	100% (6/6)
	玻璃業	4 (2)	100% (2/2)

表 39 本研究三種行業作業環境石英粉塵濃度超過暴露標準統計

行 業	個人採樣 樣本數	石英濃度 ¹ mg/m ³	超過暴露標準%		
			我國 (變動型)	美國 (0.05 mg/m ³)	英國等國 (0.1 mg/m ³)
鑄造業	15	0.11±0.08	53.33 (8 人)	73.33 (11 人)	40.00 (6 人)
陶瓷業	6	0.12±0.20	16.67 (1 人)	33.33 (2 人)	16.67 (1 人)
玻璃業	2	0.06±0.02	0	50.00 (1 人)	0

¹ 個人可呼吸性粉塵，全日 TWA，平均值±標準差

本研究發現鑄造業、陶瓷業及玻璃製造業這三種行業中，原料中結晶型二氧化矽(石英)比例與其作業場所空氣粉塵含結晶型二氧化矽(石英)比例，發現無統計上顯著之相關性，加上各空氣樣品間結晶型二氧化矽(石英)之比例差異大，因此，無法以原料之結晶型二氧化矽(石英)比例來推估現場之暴露濃度。由於國際上多採行定值式容許暴露標準 (美國亦於 2019 年修改為定值)，因此，可呼吸性粉塵中結晶型二氧化矽濃度之檢測更顯重要。但由於國內對於粉塵中結晶型二氧化矽濃度之檢測並不普遍，一般僅檢測粉塵濃度，因此，在檢測量能有限的情況下，針對各相關行業，可利用文獻中得到的可呼吸性粉塵中結晶型二氧化矽百分比上限值作為結晶型二氧化矽暴露濃度之推估依據，初步篩選可呼吸性粉塵中結晶型二氧化矽濃度是否超過容許暴露標準，再依此制定後續之監測規劃。

第五章 結論與建議

第一節 結論

- 一、在二氧化矽容許暴露標準的制訂上，國際上多採用定值方式，僅有我國與日本採變動模式，即暴露標準隨結晶型游離二氧化矽的含量比例而降低。美國 OSHA 原採變動模式，但已於 2019 年修改為定值方式，將四種結晶型游離二氧化矽(石英/方矽石/磷矽石/硅藻石)之可呼吸性粉塵的八小時日時量平均暴露標準均訂為 0.05 mg/m^3 ，但多數國家訂為 0.10 mg/m^3 。部分國家(紐西蘭、瑞典、芬蘭等)考慮方矽石與磷矽石之毒性較強，而設定較石英嚴格之管制標準(多為石英的一半)。
- 二、在分析作業場所原料所含二氧化矽成份比例方面，鑄造業(鑄模砂)、陶瓷業使用之加工生產用砂(多種原料混合)、玻璃製造業使用之原料矽砂中結晶型游離二氧化矽(石英)之比例平均值(\pm 標準差)分別為 $44.41\pm 9.41\%$ 、 $14.99\pm 5.91\%$ 與 $56.95\pm 17.48\%$ ；石材與玻璃加工取得之製程廢砂，其含結晶型游離二氧化矽(石英)之比例較低，分別為 6.98% 及 0.79% 。而一般矽砂及原料供應業者僅分析原料中的總二氧化矽，採用酸化分析法使原料中之總二氧化矽轉化為揮發性之 SiF_4 ，再藉秤重法分析，因此，可能高估原料中結晶型游離二氧化矽的量。
- 三、在作業現場環境空氣中二氧化矽及粉塵濃度監測調查方面，鑄造業四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.909 ± 0.695 、 0.679 ± 0.646 及 $2.463\pm 2.080 \text{ mg/m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.108 ± 0.077 、 0.110 ± 0.180 及 $0.528\pm 0.513 \text{ mg/m}^3$ 。其中以脫模區有最高的平均粉塵及結晶型游離二氧化矽濃度，其值超過我國容許暴露標準的比例亦最高(87.50%)，而噴砂區(噴砂、洗砂等作業)超過我國容許暴露標準的比例(43.75%)次之，最低區域則為原料區與研磨區(33.33%)；陶瓷四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.354 ± 0.655 、 0.383 ± 1.103 及 $0.605\pm 0.465 \text{ mg/m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.124 ± 0.198 、 0.195 ± 0.554 及 $0.326\pm 0.263 \text{ mg/m}^3$ 。其中以製胚區所測得之平均粉塵及結晶型游離二氧化矽之濃度最高，其值超過容許

暴露濃度標準的比例以原料區最高(42.86%)，其次為製胚區與釉區；玻璃製造業四廠之個人可呼吸性粉塵、區域可呼吸性粉塵及區域總粉塵總平均濃度分別為 0.134 ± 0.006 、 0.099 ± 0.080 及 $0.794\pm 1.440\text{mg/m}^3$ ；個人可呼吸性結晶型游離二氧化矽、區域可呼吸性結晶型游離二氧化矽及區域總結晶型游離二氧化矽之平均濃度分別為 0.055 ± 0.021 、 0.048 ± 0.027 及 $0.283\pm 0.697\text{mg/m}^3$ 。其中僅有原料區有超過容許暴露濃度標準的情形(15.38%)，其餘區域則較低。

- 四、在二氧化矽之原料與空氣中二氧化矽濃度之相關性，本研究發現各廠現場收集之原料中結晶型二氧化矽比例與其作業場所空氣粉塵含結晶型二氧化矽比例之間並無統計上顯著之相關性，加上各樣品間結晶型二氧化矽(石英)佔比之差異大，因此，無法以原料之結晶型二氧化矽(石英)來推估現場之暴露濃度。
- 五、在評估我國作業場所使用含二氧化矽原料其作業環境符合我國勞工作業場所容許暴露標準暴露實態方面，本研究勞工暴露調查結果顯示，有部分廠區的區域樣品濃度偏高，超過我國結晶型游離二氧化矽容許暴露標準值，而個人採樣結果，鑄造業有 8 人超過容許暴露標準，陶瓷業則有 1 人。如以較為嚴格之美國 OSHA 現行 PEL (8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 0.05 mg/m^3)為判斷依據，則鑄造業、陶瓷業、玻璃製造業之勞工個人暴露不合格率分別由 53.33%提高至 73.33% (=11/15)、由 16.67%提高至 33.33% (=2/6)及由 0%提高至 50% (=1/2)；但如改用國際上常用之暴露標準(8 小時日時量平均可呼吸性石英粉塵為 0.1 mg/m^3) 進行判斷，不合格率分別減至 40.00% (=6/15)、16.67% (=1/6)及 0%，這些增減變化，可做為我國未來修訂結晶型游離二氧化矽容許暴露標準值時之參考。

第二節 建議

- 一、本研究調查之三種行業(鑄造、陶瓷及玻璃製造)均屬粉塵作業，有部分廠區的區域及個人樣品濃度偏高，超過我國含結晶型游離二氧化矽粉塵容許暴露標準值，因此，應加強危害控制。由於此三種行業之製程亦均使用高熱，因此，普遍使用立扇降溫，此將加重粉塵飛散之狀況，建議應以正確的通風換氣方式加以改善。鑄造廠採自動製模，或人工製模壓實機台旁設有集塵裝置者，現場粉塵濃度相對較低，建議他廠採行。陶瓷業之製胚區所測得之粉塵暴露濃度最高，因此應加強製胚機台之密閉及

排氣，減少粉塵逸散。玻璃製造業之原料區有最高的粉塵濃度，建議於進料及混料時，應加強局部排氣或輔以自動化。另外，各廠如使用個人防護具作為控制方法時，則可依勞動部公告之「呼吸防護具選用參考原則」，選用正確之淨氣式防塵口罩，並注意其密合度，確保防護之有效性。

- 二、本研究調查之三種行業，其原料中結晶型二氧化矽比例與其作業場所空氣粉塵含結晶型二氧化矽比例之間並無顯著相關性，因此，無法以原料之結晶型二氧化矽(石英)比例來推估現場空氣粉塵含二氧化矽暴露濃度。但原料中結晶型二氧化矽仍為相關健康危害之主要來源，因此，應針對供應商進行管制，規定在其產品規格與物質安全資料表中應明示結晶型二氧化矽之比例，而非現行之總二氧化矽，以強化危害辨識資訊。
- 三、針對原料中結晶型二氧化矽(如石英)之檢測分析，目前尚無參考分析方法，一般矽砂及原料供應業者僅分析原料中的總二氧化矽，藉酸化分析法使原料中之總二氧化矽轉化為揮發性之 SiF_4 ，再以秤重法分析，因此，可能高估原料中結晶型二氧化矽的量，因此本研究建議參考文獻中之分析流程，進行完整之分析品管評估，以建立原料中結晶型二氧化矽之參考分析方法。
- 四、國內目前對於粉塵中結晶型二氧化矽濃度之檢測尚不普遍，因此，應規劃加速提升檢測量能。本研究發現原料中結晶型二氧化矽(石英)比例及原料廠商提供之成分資訊，並無法用以推估現場之暴露濃度，由於多數事業單位僅量測粉塵濃度，因此，建議各特定行業，初期尚無法檢測粉塵中結晶型二氧化矽時，可利用文獻中得到的可呼吸性粉塵中結晶型二氧化矽百分比上限值作為推估依據，初步篩選可呼吸性粉塵中結晶型二氧化矽濃度是否超過容許暴露標準，再依此制定後續之監測規劃。

後記

本研究計畫主持人為鐘副研究員順輝及錢教授葉忠，並由彭助理研究員君傑、蘇助理研究員育揚及史助理研究員經立等共同參與。

另外感謝雲林科技大學環境及安全衛生工程學系碩士班王政朝先生及楊崇貴先生等協助辦理。

研究執行期間，獲得余總經理榮彬、李秘書長聯雄、汪研究員禧年、莊副教授坤遠、黃科長耀銘等提供諸多建議，使本研究更臻於完善，謹此一併致謝。

參考文獻

- [1] 湯大同、陳成裕：我國結晶型游離二氧化矽暴露現況分析研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2007。
- [2] 蔡朋枝、林洺秀：修爐工人游離二氧化矽世代追蹤研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2003。
- [3] 徐國敏、賴俊雄：中部地區鑄造業勞工肺部疾病與粉塵測定濃度相關性研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1994。
- [4] Mohamed SH, EL-Ansary AL, EL-Aziz EMA. Determination of crystalline silica in respirable dust upon occupational exposure for Egyptian workers. *Industrial Health*. 2018; 56: 255-263.
- [5] 湯大同：鑄造業勞工結晶型游離二氧化矽暴露特徵與健康危害風險評估。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2003。
- [6] 鐘順輝：含結晶型游離二氧化矽粉塵的容許濃度怎麼訂？。勞動及職業安全衛生簡訊，第十期，12-15 頁，2016。
- [7] 湯大同、郭麗莉：鑄砂中各種結晶型游離二氧化矽含量分析研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2001。
- [8] 葉文裕、林洺秀：石作作業勞工粉塵暴露危害調查。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1997。
- [9] 汪禧年、郭錦堂：利用 MOUDI 採樣器及 XRD 檢測鑄造業游離二氧化矽暴露評估研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2009。
- [10] Radnoff D, Todor MS, Beach J. Occupational exposure to crystalline silica at Alberta work sites. *J Occup Environ Hyg*. 2014; 11(9): 557-570.
- [11] Ehrlich C, Noll G, Wusterhausen E, Kalkoff WD, Remus R, Lehmann C. Respirable Crystalline Silica (RCS) emissions from industrial plants – Results from measurement programmes in Germany. *Atmospheric Environment*. 2013; 68: 278-285.
- [12] Erol I, Aydin H, Didari V, Ural S. Pneumoconiosis and quartz content of respirable dusts in the coal mines in Zonguldak, Turkey. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 116-117: 26-35.
- [13] 蔡朋枝、賴全裕：新型二氧化矽粉塵採樣器驗證。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2006。

- [14]鄧叔禎：作業環境勞工化學性暴露調查計劃(一)。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1998。
- [15] 葉文裕、林洺秀：耐火磚作業環境主要危害源粉塵粒徑之探討。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1999。
- [16] 林洺秀：修爐工人結晶型游離二氧化矽暴露評估研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2001。
- [17] 湯大同、蔡朋枝：垃圾焚化爐維修作業員工結晶型游離二氧化矽之暴露評估。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2002。
- [18] 賴錦皇、林洺秀：修爐工人游離二氧化矽氧化性傷害評估。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2004。
- [19] 馮鈞政、陳成裕：原料砂供應業結晶型游離二氧化矽暴露調查研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2011。
- [20] 黃惠慈：鑄造廠結晶型游離二氧化矽之 XRD 暴露研究。中國醫藥大學碩士論文，2009。
- [21] Baldwin PEJ, Yates T, Beattie H, Keen C, Warren N. Exposure to Respirable Crystalline Silica in the GB Brick Manufacturing and Stone Working Industries. *Ann Work Expo Health*, 2019; 63(2): 184-196.
- [22] Burmeister S. Exposure to crystalline silica during a foundry ladle relining process. *Appl Occup Environ Hyg*, 2001; 16(7): 718-720.
- [23] Irwin A, Osha. Overexposure to crystalline silica in a foundry operation. *Appl Occup Environ Hyg*, 2003; 18(1): 18-21.
- [24] Mohammadyan M, Rokni M, Yosefinejad R. Occupational exposure to respirable crystalline silica in the Iranian Mazandaran province industry workers. *Arh Hig Rada Toksikol*, 2013; 64(1): 139-143.
- [25] 吳宗綱、陳成裕：陶瓷製造業勞工暴露調查研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2013。
- [26] 馮鈞政、陳成裕：玻璃製造業勞工結晶型游離二氧化矽暴露調查研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2012。
- [27] 湯大同：工業製程對二氧化矽成份轉變之影響。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1999。

- [28] 湯大同：工業原料中結晶型游離二氧化矽含量調查。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，1997。
- [29] Maciejewska A. Occupational Exposure Assessment for Crystalline Silica Dust-Approach in Poland and Worldwide. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2008; 21(1): 1-23.
- [30] Andersson L, Bryngelsson IL, Ohlson CG, Naystrom P, Lilja, BG, Westberg H. Quartz and dust exposure in Swedish iron foundries. *J Occup Environ Hyg*. 2009; 6(1): 9-18.
- [31] Bhaskar R, Li J, Xu L. A comparative study of particle size dependency of IR and XRD methods for quartz analysis. *Am Ind Hyg Assoc J*, 1994; 55(7): 605-609.
- [32] Ferg EE, Loyson P, Gromer G. The influence of partical size and composition on the quantification of airborne quartz analysis on filter paper. *Industrial Health*. 2008; 46: 144-151.
- [33] 邱芬芳：鑄造業勞工的可呼吸性粉塵及可呼吸性結晶型游離二氧化矽暴露評估與預測模式。中國醫藥大學碩士論文，2015。

附錄一 鑄造業各廠之製程作業特性及採樣點規劃

1.A 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 造模、澆鑄、脫模、噴砂、研磨等製程 ● 作業時間：8 小時 ● 以外籍勞工為多數 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：造模、噴砂、脫模、研磨區域操作者。 ● 區域：造模、噴砂、脫模、研磨、砂回收處理區域。 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
造砂模→澆鑄→脫模→噴砂→研磨	
採樣位置平面圖	
<p>區域採樣：造砂模區①② 噴砂區③ 噴砂+研磨區④ 脫模區⑤ 砂回收處理區⑥ 造砂模區⑦(兩個總粉塵)</p>	<p>個人採樣：造砂模區① 噴砂區② 噴砂+研磨區③ 脫模區④</p>

2.B 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 生產中大型鑄件，天車吊掛鑄件移動 ● 作業時間：8 小時 ● 多數外籍勞工 ● 自硬性造模 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：投料、噴砂、混砂、脫模操作者。 ● 區域：原料放置、噴砂、混砂、脫模、砂回收處理、個人加工處理區域。 <p>個人及區域採樣皆已 6 小時為主</p>

製造流程
混砂→造砂模→澆鑄→脫模→噴砂→研磨

採樣位置平面圖

The floor plan illustrates the layout of the foundry facility, with sampling locations marked by numbered circles (1-8) and colored squares. The legend on the right side of the plan identifies the sampling points:

- 1: 原料放置區 (Raw material storage area)
- 2: 噴砂區 (Shot blasting area)
- 3: 混砂區 (Mixing sand area)
- 4: 脫模區 (Demolding area)
- 5: 砂回收處理區 (Sand recovery and treatment area)
- 6: 個人加工區 (Personal processing area)
- 7: 個人加工區 (Personal processing area)
- 8: 個人加工區 (Personal processing area)

The plan also shows the layout of the building, including the entrance (INTU.), storage areas, and a north arrow.

區域採樣：	原料放置區①	個人採樣：	原料投料區①
	噴砂區②③		噴砂區②
	混砂區④⑤		混砂區③
	脫模區⑥		脫模區④
	砂回收處理區⑦		
	個人加工區⑧		

3.C 廠商

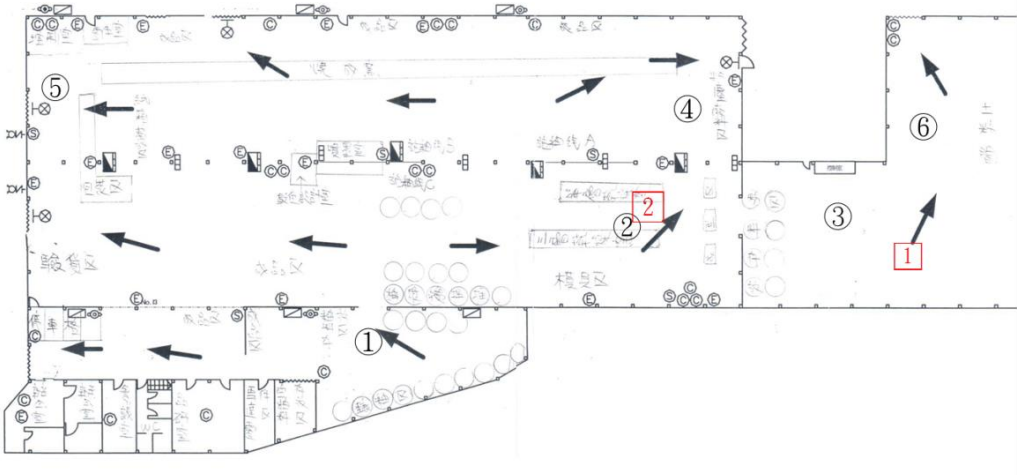
製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 生產中小型鑄件(農機、汽車) ● 作業時間：8 小時 ● 廠內工安嚴格管理 	採樣規劃： <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：造模、洗砂、研磨區操作者 ● 區域：原料放置、造模、洗砂、研磨、砂回收處理區域。 個人及區域採樣皆已 6 小時為主
製造流程	
自動造砂模→澆鑄→噴砂→洗砂→研磨	
採樣位置平面圖	
區域採樣： <ul style="list-style-type: none"> 原料放置區① R 線造模區② 洗砂+打折區③④ S 線造模區⑤ 個人研磨區⑥ 砂回收處理區⑦ 	個人採樣： <ul style="list-style-type: none"> R 線造模區① S 線造模區② 洗砂+打折區③ 個人研磨區④

4.D 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 以小型鑄件為主 ● 作業時間：8 小時 ● 造模區工人兼倒鐵水作業。 ● 工廠規模較小，部分員工兼其他區域工作。 	採樣規劃： <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：造砂模、洗砂研磨區操作者。 ● 區域：原料放置、造砂模、回收砂存放、洗砂研磨、個人加工、混砂區域。
製造流程	
混砂→造砂模→熔煉→澆鑄→噴砂→研磨→焊補	
採樣位置平面圖	
區域採樣： <ul style="list-style-type: none"> 原料、廢鐵放置區① 造砂模區②③ 回收砂存放區④ 洗砂+研磨區⑤⑥ 個人加工區⑦ 混砂區⑧ 	個人採樣： <ul style="list-style-type: none"> 造砂模區① 洗砂+研磨區②③

附錄二 陶瓷業各廠之製程作業特性及採樣點規劃

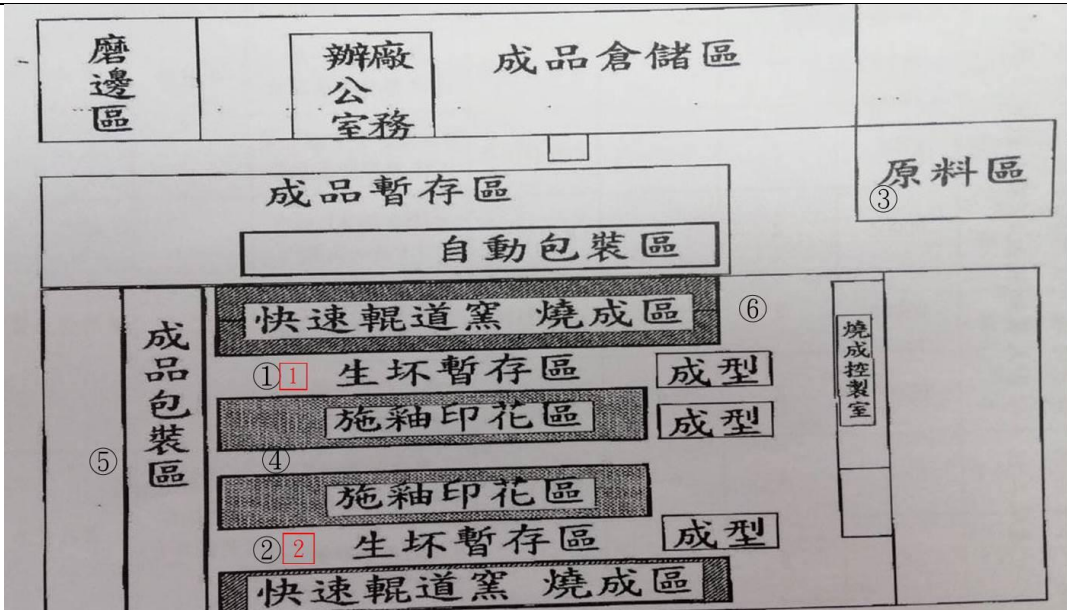
1. G 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 混料、磨料、噴霧乾燥、壓胚、施釉、燒成等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：混砂、製胚區域操作者。 ● 區域：混砂、噴霧乾燥、製釉、製胚、燒成、包裝等區域。 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
混砂→磨料→噴霧乾燥→壓製成胚→施釉→燒成	
採樣位置平面圖	
 <p>區域採樣：製釉區① 製胚區② 噴霧乾燥區③ 燒成區④ 包裝區⑤ 混砂區⑥</p> <p>個人採樣：混砂區① 製胚區②</p> <p>合計：6*2+2=14 組</p>	

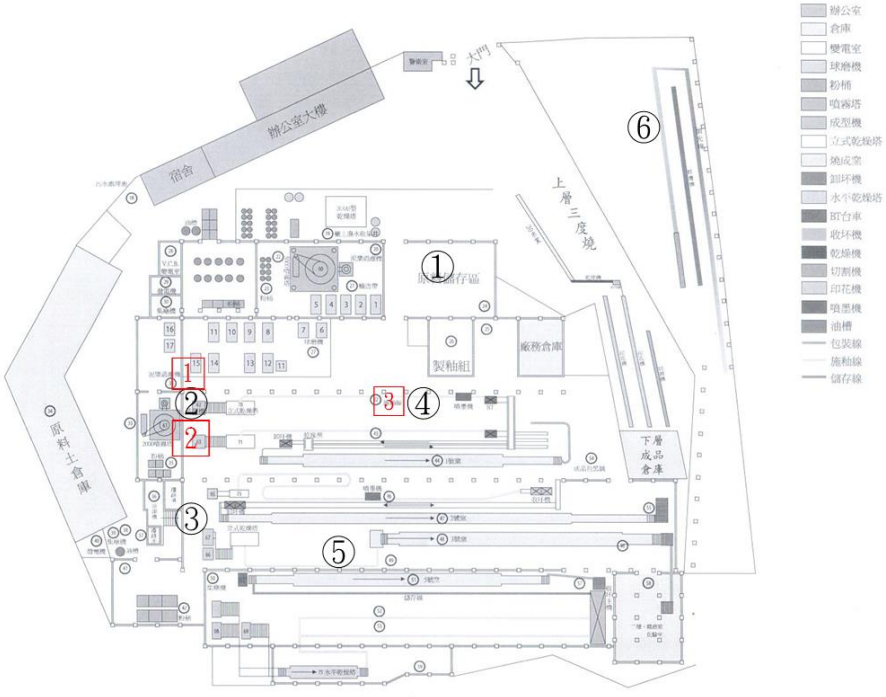
2. H 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 混料、磨料、噴霧乾燥、壓胚、施釉、燒成等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 區域：混砂、製胚、施釉、燒成、包裝等區域。 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
混砂→磨料→噴霧乾燥→壓製成胚→施釉→燒成	
採樣位置平面圖	
<p>區域採樣：</p> <ul style="list-style-type: none"> 包裝區① 製胚區②③ 施釉區④ 燒成區⑤ 混砂區⑥ <p>合計：6*2=12 組</p>	

3. I 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 混料、磨料、噴霧乾燥、壓胚、施釉、燒成等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：混砂、製胚區域操作者。 ● 區域：原料、製胚、施釉、燒成、包裝等區域。 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
混砂→磨料→噴霧乾燥→壓製成胚→施釉→燒成	
採樣位置平面圖	
	
<p>區域採樣：製胚區①②</p> <p>原料區③</p> <p>施釉區④</p> <p>包裝區⑤</p> <p>燒成區⑥</p>	
<p>個人採樣：製胚區①②</p>	
<p>合計：6*2+2=14 組</p>	

4. J 廠商

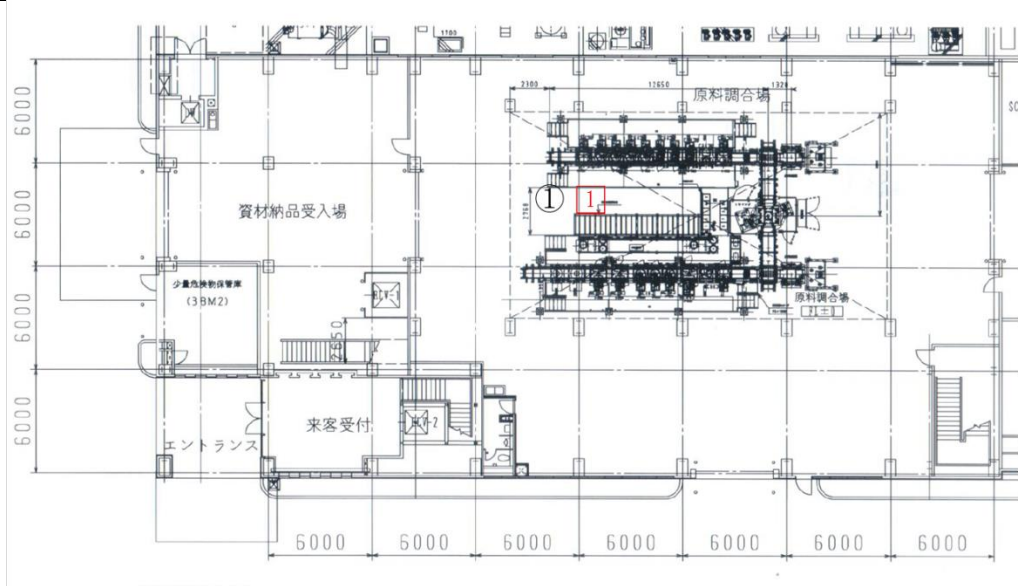
製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 混料、磨料、噴霧乾燥、壓胚、施釉、燒成等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：製胚、研磨加工區域操作者。 ● 區域：原料、製胚、施釉、燒成、包裝、研磨加工等區域。 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
混砂→磨料→噴霧乾燥→壓製成胚→施釉→燒成→研磨加工	
採樣位置平面圖	
 <p>圖例：</p> <ul style="list-style-type: none"> 辦公室 倉庫 變電室 球磨機 粉桶 噴霧塔 成型機 立式乾燥塔 施釉室 卸坯機 水平乾燥塔 卸台車 收坯機 乾燥機 切餅機 印花機 噴墨機 油槽 包裝線 施釉線 儲存線 <p>區域採樣：原料儲存區① 製胚區②③ 施釉區④ 燒成區⑤ 研磨區⑥ 合計：6*2+3=15 組</p> <p>個人採樣：製胚區①② 施釉區③</p>	

附錄三 玻璃製造業各廠之製程作業特性及採樣點規劃

1. K 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 投料、磨碎、熔解、裁切等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：投料區 ● 區域：投料區、磨料區、進料區與加工區等製程 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
投料→攪拌→熔解→降溫→檢測→裁切→品管	
採樣位置平面圖	
<p>二廠作業環境監測路線圖</p> <p>2F</p> <p>CF</p> <p>03</p> <p>01</p> <p>01</p> <p>1F</p> <p>02</p> <p>04</p> <p>02 區域採樣：投料區1 磨料區2 進料區(入窯前)3 加工區4</p> <p>01 個人採樣：投料區1</p>	

2. L 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 投料、混料、熔解、切割、研磨等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	<p>採樣規劃：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：混料區 ● 區域：混料區、進料區、個人加工區等製程 <p>個人及區域採樣皆以 6 小時為主</p>
製造流程	
(一課)投料→混料(去除雜質)→裝袋→熔解→(二課再次去雜質)調料→投料→熔解→成形→切割→品管→包裝	
採樣位置平面圖	
 <p>此圖為該廠局部平面圖，其餘不便提供</p> <p>區域採樣：混料區① 進料(入窯前)區② 個人加工區③</p> <p>個人採樣：混料區①</p>	

3. M 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> 原料粉碎、混料、熔解、裁切等製程 作業時間：24 小時、四輪三班制 	採樣規劃： <ul style="list-style-type: none"> 個人：投料區 區域：原料存放、投料、進料、成品加工等製程 個人及區域採樣皆以 6 小時為主
製造流程	
原料粉碎→混料→窯爐熔解→澄清→冷卻→成型→裁切→品管	
採樣位置平面圖	
<p>圖例：</p> <p>第一區：原料存放區 第二區：投料區 第三區：進料(入窯前)區 第四區：成品加工區</p> <p>圖例：</p> <p>第一區：原料存放區 第二區：投料區 第三區：進料(入窯前)區 第四區：成品加工區</p>	
區域採樣：原料存放區① 投料區② 進料(入窯前)區③ 成品加工④	

4. N 廠商

製程操作特性	採樣點規劃
<ul style="list-style-type: none"> ● 投料、磨碎、混料、熔解、撚紗、漿紗、織布等製程 ● 作業時間：24 小時、四輪三班制 	採樣規劃： <ul style="list-style-type: none"> ● 個人：投料區 ● 區域：原料存放、投料、進料、成品加工等製程 個人及區域採樣皆以 6 小時為主
製造流程	
投料→球磨→烘乾→混合→熔解→冷卻→成型→撚紗→漿紗→織布→成布→品管→儲運	
採樣位置平面圖	
區域採樣：原料存放區① 投料區② 進料(入窯前)區③ 成品加工④	
個人採樣：投料區①	

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

作業環境原料與空氣中二氧化矽濃度相關性暴露
研究 = A Study of Occupational Exposure and
Correlation between Crystalline Silica Contents in
Raw Materials and Those in Airborne Dusts at
Workplaces / 錢葉忠, 王政朝, 楊崇貴, 蘇育
揚, 鐘順輝著. -- 1 版. -- 新北市 : 勞動部勞動
及職業安全衛生研究所, 民 110.06
面 ; 公分
ISBN 978-986-5466-09-1(平裝)

1.勞工衛生 2.職業衛生

412.53

110004529

作業環境原料與空氣中二氧化矽濃度相關性暴露研究

著(編、譯)者: 錢葉忠、王政朝、楊崇貴、蘇育揚、鐘順輝

出版機關: 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號

電話: 02-26607600 <http://www.ilosh.gov.tw/>

出版年月: 中華民國 110 年 6 月

版(刷)次: 1 版 1 刷

定價: 300 元

展售處:

五南文化廣場

台中市中華區中山路 6 號

電話: 04-22260330

國家書店松江門市

台北市松江路 209 號 1 樓

電話: 02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「研究成果／各年度研究報告」，網址為：
<https://laws.ilosh.gov.tw/ioshcustom/static-page/page-01#content>
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述，並請注意需註明資料來源；有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN: 1011000520

ISBN: 978-986-5466-09-1



勞動部勞動及職業安全衛生研究所

INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR

221新北市汐止區
橫科路407巷99號
TEL 02-26607600
FAX 02-26607732



www.ilosh.gov.tw

ISBN 978-986-5466-09-1



GPN : 1011000520 定價:新台幣300元