

## 後記

# 鬼打牆之電： 可逆式電解水及鹼性氫氧燃料電池

改進了國中電解水實驗，操作的雙手再不必碰到氫氧化鈉，同樣的裝置也是目前火紅的燃料電池，簡單的氫氧結合釋出乾淨又便宜的電力。「蠻簡單的電池但效果好。」同學自己對這電池的評論。高雄女中學生沈君宜、周炯彤、周昱瑄、林軒?、胡祖瑄、高嘉偵6人小組從探究課程開始研究綠色能源，學校雖能提供昂貴材料，如質子交換膜、電極吸附效果好的白金，但劉靄雯老師考慮日後的實驗推廣，希望從便宜原料著手，因此研究小組運用簡易電解水裝置先蒐集氫氣，一連串文獻搜尋和試驗後，發現同一裝置，也會發生氫氧結合反應，立地成為燃料電池。

## 保護雙手有巧思 電池原理鬼打牆

為了不讓手碰到氫氧化鈉，她們事先安裝兩極金屬進入有三接頭的管子裡，之後再把2管三接頭管放入充滿氫氧化鈉溶液的布丁盒中，當蒐集氫和氧的試管，2極連上電後開始電解集氣，當2管氣體蒐集好後移開電池，裝置即開始放電，放電完後，沒用完的氣從管子抽出，氫氧化鈉溶液自動上升，又可重複做一次電解，相當聰明地解決了國中生手不小心爛掉的風險，而且氫氧結合的放電效率高，電解5 ml氫氣可得1.5 V開路電壓，並讓小鬧鐘走上10分鐘。

電解產氫、放電，再電解再放電，都在同一個裝置上，如鬼打牆般反覆地展演了燃料電池的基本原理。研究電池放電過程中，原本希望比較不同溫度、電解液對電池的影響，但實驗與假設一直無法相應證，不過倒是得出溫度、氫氧化鈉溶液濃度對輸出電壓和放電效率的影響；溫度5℃時輸出電壓最強，濃度2.5 M時所需電解時間最短、開路電壓最高；原本認為生成於兩試管氣體都能起化學反應，後來發現只有吸附在兩極金屬上的氣體才能充分反應，影響電壓高低的不是電解能產生多少氣體，而是螺絲釘可吸附多少氣體，讓實驗小組對氫氧電池的瞭解邁進一大步。

## 電流鬼魅難捉摸 劉老師情意相挺

一台名為Powerlink的設備榮登關鍵設備，它能把電池電流反應接上電腦、在電腦上觀察連續電壓電流反應，為三用電表升級版。感謝這設備不是沒原因，實驗早期，有次放學後全組留校實驗，那時只有三用電表可用，其中林軒?同學疑似出現發功的現象，不小心輕碰了正在放電的布丁盒氫氧裝置，三用電表居然瞬間全部歸零，只好重做，不巧，林同學又碰了一下，三用電表再度歸零，林同學愧疚得不好意思回家，自己留校再做，並撻下了一句「我跟布丁盒不合」的狠話，或許也埋下了換牙籤盒做實驗的遠因。那時還不知道，能與兩極做反應的只有螺絲釘上的氣體，一碰那些氣體就溢散到水中和管頂，造成無法放電的情形，日後有了關鍵設備，才能仔細比對出此一電池的特性。

高瞻實驗結束後，研究小組還繼續改良，牙籤盒又換回了布丁盒。胡同學表示，實驗時曾風風雨雨，經過很多挫折，但一路走來，很高興跟大家一起作實驗，友誼也更加堅固。研究小組特別感謝劉靄雯老師，每當實驗遇瓶頸，老師知道需加強某部分本質學識，遂晚上額外加課，幫研究小組打通知識的任督二脈；並分享生活的智慧和經驗，讓她們受用無窮。老師常常鼓勵她們：「名次不重要，重要是投入的心力和過程，有努力做到這樣就很棒了。」

6-1

環境

科學小論文



# 再生綠建材 以石材廢泥燒製輕質粒料

國立花蓮高級工業職業學校  
呂婉榛、宋雅雯



## 再生綠建材——以石材廢泥燒製輕質粒料

台灣石材加工業幾乎全數集中於花蓮地區，而天然石材在切割、加工過程中產生數量龐大的石材廢棄物，每年超過136萬公噸，其中石材廢料佔31萬公噸，石材廢泥佔105萬公噸（花蓮縣環保局），其雖對經濟發展有顯著之貢獻，但日益增多的事業廢棄物，卻也造成環境上之負擔。

地狹人稠的台灣，自然資源匱乏且廢棄物處置地點日益難求，若可依據廢棄物減量化、安定化、無害化及資源化之原則，將石材廢棄物妥適處理成為健康安全、低污染，且可再利用之再生綠建材，將可轉『廢』為『寶』，轉危機為商機，獲得可觀的經濟價值與社會效益。

目前已經可以廣泛的利用下水道污泥與水庫淤泥商業產製輕質粒料，鑑於石材廢棄物非屬事業有害廢棄物，且經濟部工業局亦明訂石材廢泥為事業廢棄物再利用種類之一，故希冀藉此研究，評估石材廢泥燒製輕質粒料的可能性，以不同的燒結變數（燒結溫度：1050℃、1075℃、1100℃、1125℃、1150℃；燒結時間：5分鐘、15分鐘），嘗試燒結輕質粒料，找出最佳燒結條件，且實際使用於混凝土中，由力學性質研判可否作為結構用輕質粒料，並分析其經濟效益，提供業者有效處理與應用事業廢棄物的另一個管道，進而減少環境污染與衝擊，維護生態環境平衡，促進建築與環境共生共利，傳承永續經營之居住環境。

### A 評估燒製的可能性

鑑於石材廢棄物非屬事業有害廢棄物（有害事業廢棄物認定標準），且經毒性溶出試驗(TCLP)證實為無毒無害之事業廢棄物，故經濟部工業局亦明訂石材廢泥為事業廢棄物再利用種類之一，可將石材廢泥再利用為再生綠建材。

台灣地區之石材加工多使用進口原石為主，其中花崗石約佔87%、大理石約佔10%及蛇紋石約佔3%，欲將石材廢泥減量化之再利用處理，應針對花崗石廢泥才可達到最大效益。本研究之石材廢泥（圖1）取自於花蓮石材資源化處理公司，含水量約30%，比重2.7。



圖1 石材廢泥



圖2 石材廢泥粉末

### 1. 輕質粒料之膨脹機理：

1948年J.E. Conley和H. Wilson及1950年C.M. Riley的研究中，均指出材料發泡膨脹必須同時具備滿足兩個必要條件，才可獲得膨脹良好的均質多孔輕質粒料：

- (1) 為材料必須產生高溫玻璃相，且具有足夠之黏滯性以滯含逸出氣體。
- (2) 為材料中存在某些成分，在玻璃相形成後的溫度能同時逸出氣體。

燒結輕質粒料的成功與否？與其化學組成有一定關係！故本研究先於亞洲水泥花蓮廠以X-Ray螢光分析儀（圖3）分析廢泥試樣之化學組成份，評估其是否具備燒製輕質粒料之條件。



圖3 X-Ray螢光分析儀（XRF, Thermo ARL 8680）

### 2. 石材廢泥化學組成份分析結果：

化學成份	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Flux							
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
%	68.92	14.38	3.72	3.04	1.07	0.11	3.52	3.75	0.34	0.13

Flux = 15.68%

燒失量L.O.I = 0.13%

經研判本研究取樣之石材廢泥為花崗石廢泥，且花崗石廢泥之化學成份確實可符合輕質粒料膨脹範圍的區間內，故應可燒製成輕質粒料。



## B 燒製石材廢泥輕質粒料

將均質化之石材廢泥粉（圖2）加入適量的水進行拌合，秤石材廢泥約3 g，以搓湯圓方式進行造粒，其直徑約為1.2公分，再將造粒試樣（氣乾狀態）置於不鏽鋼盤中，待預定加熱溫度到達時，迅速將高溫爐開啓，利用長桿將不鏽鋼盤放入高溫爐中進行燒結，並以碼錶計時，完成後關掉電源。

燒結變數：

燒結溫度：1050°C、1075°C、1100°C、1125°C、1150°C

燒結時間：5分鐘、15分鐘



圖4 石材廢泥造粒成品

石材廢泥輕質粒料基本性質：

（一）粒料外觀及剖面情況

### 1. 燒結溫度1050°C，燒結時間5分鐘、15分鐘



圖5 1050°C-5min 輕質粒料外觀及剖面



圖6 1050°C-15min 輕質粒料外觀及剖面

- (1) 1050°C-5min、1050°C-15min為淺褐色。
- (2) 加熱至1050°C，粒料表面沒有生成黏性之玻璃相，所以無法使粒料內部產生氣體時自封成孔隙，剖面亦可證實內部無產生孔隙之輕質現象，故可得知燒結1050°C之溫度不足，無法燒結成輕質粒料。

### 2. 燒結溫度1075°C，燒結時間5分鐘、15分鐘



圖7 1075°C-5min 輕質粒料外觀及剖面



圖8 1075°C-15min 輕質粒料外觀及剖面

- (1) 1075°C-5min為淺褐色，1075°C-15min為褐色。
- (2) 粒料表面也沒有生成黏性之玻璃相，但粒料剖面可發現已有少數氣體散出造成之孔洞，故得知燒結溫度超過1075°C就極有可能燒製出輕質粒料。

### 3. 燒結溫度1100°C，燒結時間5分鐘、15分鐘



圖9 1100°C-5min 輕質粒料外觀及剖面



圖10 1100°C-15min 輕質粒料外觀及剖面

- (1) 1100°C-5min呈現深褐色，內部已有些孔洞，但燒結未均勻，一半粒料已具輕質效果，另一半卻無，研判可能已達燒結溫度或燒結時間之臨界點，可能增加溫度或時間即可達輕質化之效果。
- (2) 1100°C-15min表面為深棕色，發現表面已熔融，內部分佈黑色均勻小孔，證實燒結至1100°C-15min已可達到表面需生成黏性之玻璃相，並有足夠時間來封閉自骨材內部放出之氣體，確實可以製成輕質粒料。

### 4. 燒結溫度1125°C，燒結時間5分鐘、15分鐘



圖11 1125°C-5min 輕質粒料外觀及剖面



圖12 1125°C-15min 輕質粒料外觀及剖面

- (1) 1125°C-5min 與1125°C-15min雷同，顏色為深棕色，外觀光滑且內部孔洞均勻分佈，表示已生成黏性之玻璃相，且可將氣體包覆於其內，但一半以上相互黏結在一起，無法形成單顆獨立之輕質粒料。
- (2) 由此得知，以電熱式高溫爐燒製輕質粒料，燒結至1125°C，溫度已過高無法成型，但若使用目前商業生產所使用之旋窯式高溫爐燒結，粒料彼此黏結之情況可能會有所改善，但仍須加以證實。

### 5.燒結溫度1150℃，燒結時間5分鐘、15分鐘



圖13 1150°C-5min輕質粒料外觀及剖面



圖14 1150°C-15min輕質粒料外觀及剖面

(1) 1100°C-5min呈現深褐色，內部已有些孔洞，但燒結未均勻，一半粒料已具輕質效果，另一半卻無，研判可能已達燒結溫度或燒結時間之臨界點，可能增加溫度或時間即可達輕質化之效果。

(2) 1100°C-15min表面為深棕色，發現表面已熔融，內部分佈黑色均勻小孔，證實燒結至1100°C-15min已可達到表面需生成黏性之玻璃相，並有足夠時間來封閉自骨材內部放出之氣體，確實可以製成輕質粒料。

綜合以上輕質粒料外觀及剖面情形，可發現在熱處理的過程中，最初粒料變成土黃色，略呈粉紅色；達膨脹溫度後，顏色轉成暗棕色，此顏色轉變表示三價鐵離子（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）在膨脹溫度時減價（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）之現象。

### （二）重量損失

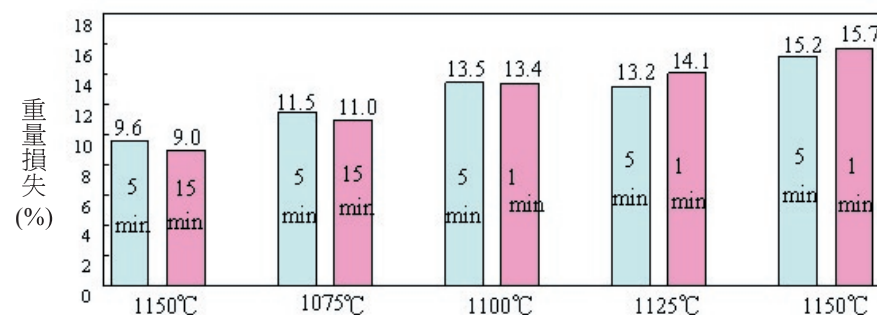


圖15 輕質粒料重量損失之結果

由圖15輕質粒料重量損失之結果中得知，燒結溫度越高，燒結前、後之重量損失亦越大。石材廢泥經造粒後氣乾含水量為7.7%，應於100°C即散失，其餘之重量損失應是石材廢泥不同化學組成於不同燒結溫度中氣體逸出所造成，氣體產生之主要原因及反應方程式如下：

氣體產生之主要原因：

1. 硫化物於400°C時產生揮發之情況。
2. 石材廢泥之結晶水約在600°C下分解。
3. 含碳之化合物在700°C時燃燒產生 $\text{CO}_2$ 。
4.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 約在1000°C～1150°C時釋放出氧氣。

可能造成氣體之產生之反應方程式：

反應方程式	反應溫度
$\text{FeS}_2 \rightarrow \text{FeS} + \text{SO}_2$	350～450°C
$4\text{FeS} + 7\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2$	500～800°C
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{SO}_3$	560～775°C
$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	400～900°C
$\text{FeCO}_3 + 3\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{CO}_2$	> 800°C
$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	1250～1300°C
$6\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2$	1000～1550°C

### （三）比重

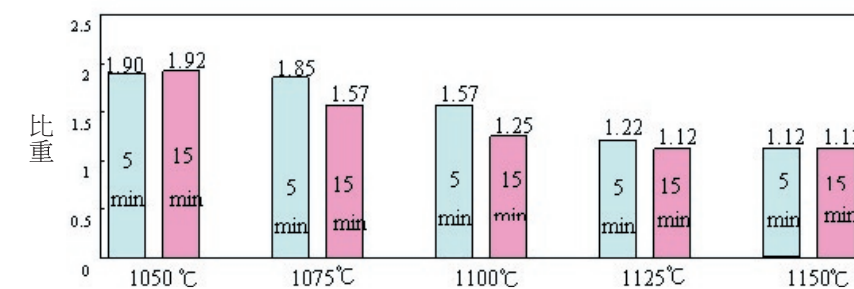


圖16 輕質粒料之比重

石材廢泥（花崗石廢泥）之化學成分中含有可釋放出氣體的物質，加熱至一定溫度時，表面層溫度升高較快，會先融成膠體再形成玻璃相之表面層，此時因溫度增高致使內部產生高塑性流體，表面生成黏性之玻璃相，並且有足夠之時間來封閉自骨材內部放出之氣體，當氣體逸出時，一面受到塑性流體之包圍，一方面未能穿透表面玻璃相層，在內部造成氣泡，使體積增加而達到膨脹效果。

由圖16可發現當燒結溫度達到1100°C以上時，粒料確實達到輕質化的效果，比重均小於輕質粗粒料之標準1.6；且燒結時間增長至15分鐘，粒料燒結之情況更為均勻，大幅減小至1.25，若使用於混凝土時，可大幅降低混凝土之自重，應可廣泛使用於高層建築，但應詳加試驗予以確定。

### （四）吸水率

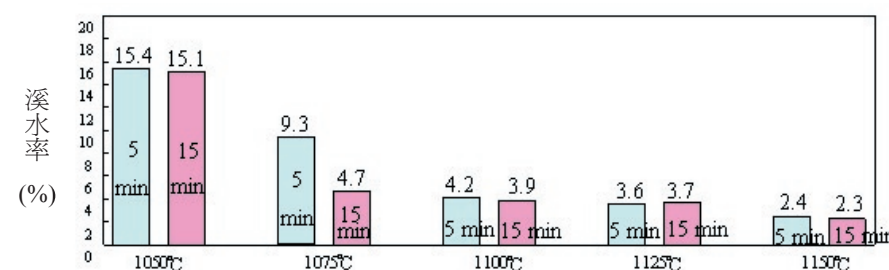


圖17 輕質粒料之吸水率



由圖17得知輕質粒料之吸水率隨著燒結溫度增加，而有下降之情況，但加熱至1100℃以上，下降趨勢卻有所減緩（由4.2%下降至2.3%），燒結溫度達1100℃，幾乎就可達最佳效果。

綜合以上粒料外觀及剖面情況、重量損失、比重與吸水率的結果，可研判輕質粒料最佳的燒結溫度為1100℃，最佳燒結時間為15分鐘，可將石材廢泥燒結為再生綠建材。

### C 輕質粒料混凝土

將最佳之石材廢泥輕質粒料(1100℃－15 min)實際使用於混凝土中，選定水灰比0.53，參照ACI 211.1常重混凝土建議之配比設計步驟得到各種材料的配比用量如表3-12，製作φ10 cm x 20 cm之常重砂－輕質混凝土圓柱試體。

水灰比(W/B)	配比 (kg/m³)			
	水	水泥	粗粒料	細粒料
0.53	200.0	377.4	446.9	793.1

將製作好的混凝土試體養治24小時後拆模，養護28天後取出試體並予以蓋平，再進行28天抗壓強度試驗，評估可否作為結構用輕質粒料混凝土。

水灰比(W/B)	抗壓強度 (MPa)			
	1	2	3	平均值
0.53	29.21	29.98	29.17	29.63

依ASTM C 567結構用輕質混凝土單位重規定測得之單位重須小於1950 kg/m³，本研究之輕質混凝土單位重為1817.4 kg/m³，符合要求；且一般結構用輕質粒料混凝土，設計強度等級介於LAC 20至LAC 35之間，石材廢泥輕質粒料混凝土強度等級為LAC 30（強度28－32MPa），亦符合規定，故石材廢泥輕質粒料可作為結構用輕質粒料。

### D 經濟效益

（一）目前花蓮地區石材廢泥棄置費為400～500元/立方公尺，而商業製程燒製輕質粒料單位成本為450元/立方公尺，銷售價格為1500元/立方公尺，若投資生產石材廢泥輕質粒料則約有1500元/立方公尺 的利潤，投資回收利益(RQI)為1500 / 450＝333%，獲利相當可觀。

（二）在燒結輕質粒料的過程中難免會產生CO<sub>2</sub>，需審慎加以評估，但可利用瓦斯燒結，將危害減至最低，另可利用二氧化碳減量技術，回收CO<sub>2</sub>作為碳源產製石化原料，二氧化碳可與天然氣甲烷進行重組反應，以生成合成氣（一氧化碳與氫氣的混合氣體）；可用以合成高碳數烷類等能源產品或其他石化產品，或分離出一氧化碳或氫氣；一氧化碳為高價值的石化原料，而氫氣則可供高效率燃料電池發電使用，進而達成CO<sub>2</sub>間接減量。

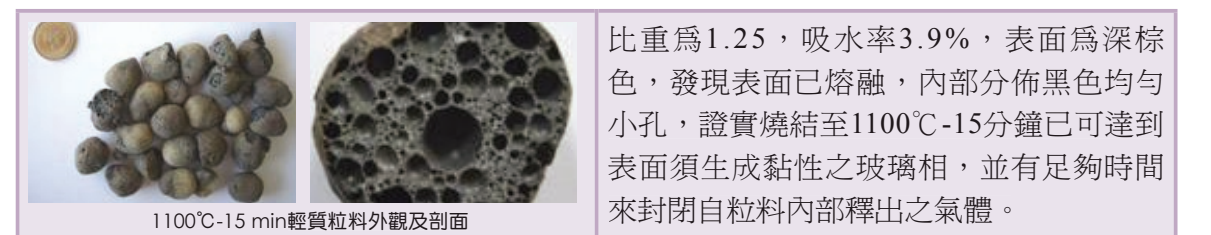
（三）一般混凝土單位重為2300 kg/m³，而本研究之石材廢泥輕質混凝土單位重僅為1817.4 kg/m³，可減輕混凝土自重，減少混凝土用量，降低混凝土之使用成本，更可大量的縮減混凝土的柱橫斷面與牆厚度，提高跨距，並增加樓地板的使用空間，提升樓層淨高度與樓層數。

（四）再者，使用石材廢泥燒製輕質粒料，可大量減少事業廢棄物，讓可用資源再利用，降低環境污染與衝擊，維護生態環境平衡，促進建築與環境共生共利，傳承永續經營之居住環境。

### E 結論

（一）欲降低花蓮地區石材廢泥對環境之衝擊應花崗石廢泥為主，本研究之石材廢泥經化學組成研判應為花崗石廢泥，且化學成分符合輕質粒料膨脹範圍的區間內，確實可燒製成輕質粒料。

（二）燒製輕質粒料最佳情況為加熱達1100℃，再放入高溫爐中燒結15分鐘。



（三）石材廢泥輕質粒料可減輕混凝土自重，減少混凝土用量，降低混凝土之使用成本，更可大量的縮減混凝土的柱橫斷面與牆厚度，提高其跨距，並增加樓地板的使用空間，提升樓層淨高度與樓層數。

（四）石材廢泥可燒製結構用輕質粒料，不僅可『轉廢為寶』，大量減少事業廢棄物，降低環境污染與衝擊，更可『點石成金』，具商業生產價值，創造可觀的收益。

（五）燒結輕質粒料的過程中難免會產生CO<sub>2</sub>，需審慎加以評估，可利用二氧化碳減量技術降低其危害。

## 後記

# 減廢的春天：花蓮在地減廢新契機

花崗岩、大理石為花蓮最負盛名的特產，殊不知棄置廢泥也是花蓮最大宗的特產。本實驗將廢泥燒製成「輕質粒料」建材，減廢再利用。

「輕質粒料」可減輕混凝土自重、提高跨度、增加樓板使用面積，是一外觀玻璃化呈相，骨材裡含氣泡的高價綠建材。目前下水道污泥製成輕質粒料已有廣泛的應用，但尚未有發掘石材廢泥之研究，由張齊憲老師指導，花蓮高工呂婉榛、宋雅雯、蔡岳廷、涂盛宏四位同學決心將這個想法實踐。

為期1年的實驗，從初始以卡車載運廢泥，至亞洲水泥商借X-Ray螢光分析儀，做材質測試，再將廢泥攪拌均質化後，手工搓成一顆顆直徑1.2 cm大小圓球入高溫爐中加熱，找可燒結成功之溫度和方法，最後找到最適溫度1100°C，再找最佳燒結時間呈相，期間實驗室內超高溫加熱環境，需常常使用大型電鋸鋸開石頭觀察剖面，既辛苦又有危險性，粒料製成後尚需後加入混凝土中實測建材強度。

## 燒結

受訪當天，笑容可掬的呂婉榛、宋雅雯同學，開朗的臉龐如晴朗的天氣，全不受大風影響，閃動靈活大眼、充滿溫情地回憶實驗過程：「所有高中的回憶就是這個。」平常到校早自習時，燒個幾盤，中午午休再去觀察，寒暑假也到校研究、打資料，連春假也提早結束，生活泡在實驗室裡了。

## 驚蟄

燒結成功與否除了溫度，均質化也是關鍵。一開始不曉得先用攪拌器把廢泥攪勻再製成湯圓，明明同一個溫度燒結，同批粒料一會兒冥頑不靈，連玻璃相也沒，一會兒化成一碗巧克力湯，整整一個月找不到燒製溫度瀕臨放棄，靠著張老師安慰打氣才堅持下去。男同學們特別辛苦，負責用大型電鋸鋸開石頭看呈相，戰戰兢兢帶著護目鏡，老師站在旁邊監督，夾子夾很緊怕萬一有任何閃失，會受傷。宋同學說：「最高興的時刻是粒料終於燒成功的時刻！」知道1100度可行，可以開始小範圍溫度測試，找出最省能源的燒製溫度和時間。

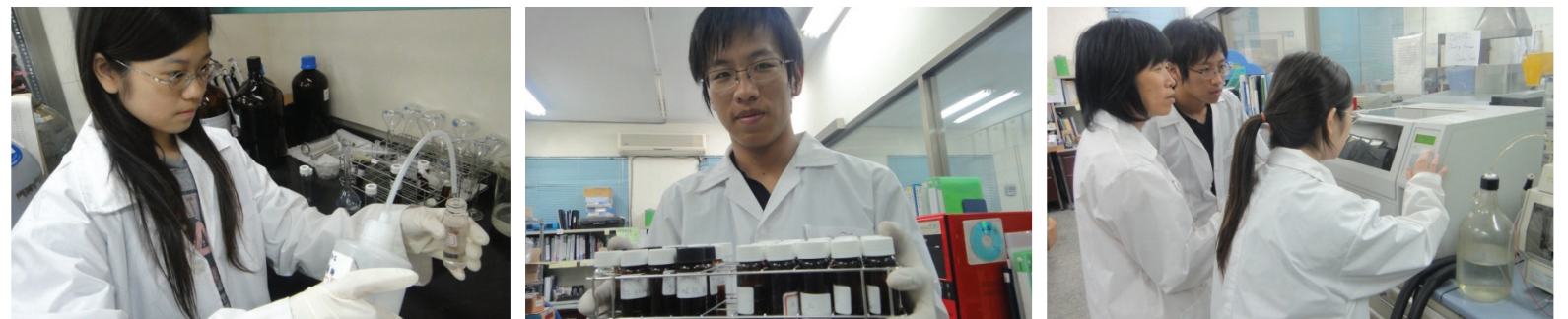
兩個受過訓練口才無礙的女生回想起來，格外感謝老師嚴格的訓練。呂同學強調，老師嚴格是希望我們不要將來到競爭場上受挫「哭著回來。」縱使已經決定誰要上台報告，還是訓練每位組員練習演講，以免臨時被要求上台，「不知道為什麼，在老師面前就緊張得結結巴巴。」同學笑瞇瞇地說，「上台去報告反而容易一點。」老師如武俠小說裡的黃蓉，步步沙盤推演各種狀況、可能被問到的問題，論文寫作上的漏洞，問最多刁鑽問題的就是老師自己。

為了希望未來能將研究結果無償分享，對環境盡一份心力，老師特別不想申請專利。2位小組成員已經是大學土木系學生，發現一些本來需要背誦的知識，現在只要回想實驗過程就可以貫通，比別人通曉使用的原理，額外感到駕輕就熟。

6-2

環 境

科學小論文



## 後勁版柯南 探討後勁溪仁武橋之污染趨勢

國立中山大學附屬國光高級中學  
林晨光、陳萱