綠色化學與國際視野的交匯：高中「微量放射狀濾紙層析」探究活動

陳佩琪

新北市立樹林高中化學科教師

前言

本文分享導入「綠色化學」於高中探究與實作課程，結合線上國際交流活動，提升學生的科學實作能力與全球視野的課程經驗(以下簡稱本課程)。針對傳統濾紙層析實驗溶劑用量多、有機廢液處理不易等問題，本課程引進改良式「放射狀濾紙層析」設計(DeMott et al., 2024)。透過四週的探究與實作活動課程，學生不僅掌握了微量分析技術，成功將流動相用量從傳統的 25 mL 降至 2.5 mL，更透過與國外夥伴學校的線上視訊，交換實驗數據與環保觀點。本課程設計能有效提升學生的環境意識、實驗操作增加精細度以及英語溝通的自信心，為高中化學課程在地化與國際化的結合提供了可行的實踐模式。本文詳述課程架構、實驗操作細節及教師於跨國教學現場之觀察與反思。

課程設計動機

當前的高中化學新課綱（108 課綱）中，「探究與實作」已成為培養科學素養的核心場域(教育部，2018) 。然而，在現場教學中，化學實驗往往伴隨著大量的化學藥品消耗與廢液產出。以經典的「濾紙層析」（paper chromatography）為例，這項技術雖然是分離混合物、檢測物質純度的基礎方法，但傳統的實驗裝置通常將矩形濾紙置於燒杯或大型展開槽中，為了維持展開槽內的蒸氣飽和且確保濾紙與液面接觸密合，往

往需要消耗 15-25 mL 甚至更多的流動相（mobile phase）(Bosley, n.d.) 。

當課程涉及色素或墨水分離時，常需使用有機溶劑。在一個有 40 名學生的班級中，若以兩人一組進行實驗，單次課程即可產生數百毫升的有機廢液。這不僅增加了實驗室廢液處理的成本與環境負擔，有機溶劑揮發所產生的異味與潛在毒性，亦對師生的健康造成潛在威脅。因此，如何在兼顧好的教學品質前提下，落實「減量」（reduce）與「預防」（prevention）原則，成為化學教育工作者極需面對的課題。

一、綠色化學在教學上的實踐

美國環境保護署（U.S. Environmental Protection Agency, EPA）將綠色化學定義為「設計化學產品與過程，減少或消除危險物質的使用或生成」(DeMott et al., 2024)。在教學環境中，落實綠色化學不僅是環保口號，更是實驗設計的創新指標。本課程引進國際間推廣的「放射狀濾紙層析」改良設計(EPA, n.d.)，該設計利用幾何圖形的改變與微型儲液槽的搭配，將層析所需的流動相體積大幅減縮至 2.0-2.5 mL。這不僅符合綠色化學中「發展新的分析系統以減少有毒化學品消耗」的原則(Hartwell, 2012)，其特殊的裝置更富含工程思考的教育價值。

二、結合國際交流的教育意義

科學無國界，環境議題更是全球性的挑戰。本課程將此綠色化學實驗與線上國際交流結合。透過讓臺灣學生與國外學生操作相同的實驗模組(EPA, n.d.)，比較不同國家的實驗數據、探討各國對實驗室廢棄物管理的規範差異，期能將學生的視野從實驗桌延伸至全球，實踐「在地行動，全球思維」的教育理想(Singh, et al., 1999)。

課程目標

本課程依據高中化學「物質的分離」單元與「綠色化學」議題進行轉化，設定以下四個面向的教學目標：

1. 認知與知識建構（Knowledge）

   甲、學生能理解濾紙層析的分離機制，包括毛細作用、固定相與流動相之間的原理。

   乙、學生能解釋相似者互溶原理在選擇展開液時的應用。

   丙、學生能準確定義並計算保留因子（Rf 值），並理解其作為定性分析的意義。

2. 技能與探究實作（Skills）

   甲、學生能操作美工刀與剪刀進行濾紙圖樣加工，製作放射狀臂層析紙。

乙、學生能熟練使用微量吸管或毛細管進行精準點樣，控制樣品點的大小與濃度。

丙、學生能架設微量密閉層析系統，並進行數據測量與誤差分析。

3. 情意與環境素養（Attitude & Ethics）

甲、學生能體認綠色化學十二原則對永續發展的重要性。

乙、學生能計算並比較改良前後的試劑用量差異，培養實驗減廢的責任感與成就感。

丙、建立正確的化學安全觀念。

4. 國際溝通與表達（Global Competence）

甲、學生能整理實驗數據，製作英文簡報。

乙、學生能透過視訊軟體，自信地向外國夥伴解說實驗設計與發現，並進行跨文化的科學對話。

四週實驗課程內容與實施歷程

本課程規劃為四週的教學，每週 2 節課，共計 8 節課。課程設計由淺入深，從器材製作、基礎原理驗證、進階探究到國際交流發表（表 1）。

表 1
四週實驗課程內容

週次	主題焦點	主要內容	探究重點	綠色化學／國際交流
1	認識濾紙層析與綠色化學	濾紙層析原理、前導問題與概念	由日常色素食品引發問題；設計實驗變因	介紹低體積流動相設計與綠色化學背景
2	微量放射狀臂濾紙層析裝置設計與國際交流（一）	流動相儲槽組裝、放射狀紙臂設計與剪裁	以設計與操作限制為情境，討論如何減少溶劑用量	與國外學生交流組裝微量濾紙色層實驗裝置的困難處
3	食用色素分離與國際交流（二）	標準色素與混合樣品製備與點樣、裝置運作、資料蒐集	以實證方式推論混合樣品組成	與國外學生分享探究食用色素的結果
4	墨水分離、比	不同墨水樣品點	設計並比較多種流	連結科學倫理與生活中

較溶劑流動相差異與國際交流（三）	樣、測試不同比例流動相、Rf 計算與比較	動相條件	應用層析法情境，與國外學生分享探究結果

第一週 綠色思維

教學重點：介紹綠色化學概念(Anastas & Warner, 1998)、層析原理，並實作傳統裝置的實驗。

1. **濾紙準備與裁切：**依據實驗室燒杯規格，指導學生裁切適合的矩形濾紙（圖 1）。

   甲、6 cm 寬度濾紙：適用於 400 mL 燒杯。裁切為長方形，確保兩側不觸碰杯壁。

   乙、8 cm 寬度濾紙：適用於 600 mL 或 800 mL 燒杯（600 mL 可能過窄，建議使用 800 mL）。需將頂部保留較寬以便懸掛。

   丙、注意細節：精準的裁切能避免濾紙邊緣影響展開速率。

2. **傳統流動相儲槽架設（圖 2）**

   甲、容器選擇：比較不同燒杯（400 mL vs 800 mL）對濾紙尺寸的適配性。

   乙、溶劑配置：

   i. 400 mL 燒杯：需加入約 25 mL 流動相。

   ii. 800 mL 燒杯：需加入約 50 mL 流動相。

   關鍵觀察：請學生記錄此步驟的溶劑消耗量，為後續綠色化學討論鋪路。

3. **防揮發處理：**

   甲、使用玻璃皿作為蓋子。

   乙、利用封口膜密封燒杯嘴處的縫隙，防止揮發性溶劑逸散。

   丙、使用細線與膠帶將濾紙懸掛於燒杯中央，確保濾紙底端均勻浸入溶劑且不觸碰杯壁。

圖 1
學生裁切適合的矩形濾紙

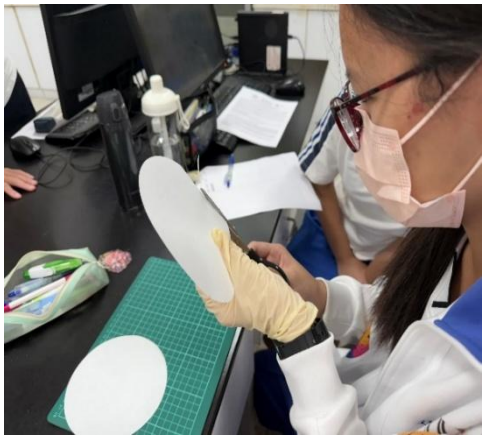


圖 2
傳統紙層析設計與裝置

學生在實驗紀錄中的回饋如表 2。

表 2
學生的回饋

觀察項目	傳統裝置 (400/800 mL 燒杯)	學生感受 (1-5 分，5 為最滿意)
溶劑使用量	25 ~ 50 mL	1 (非常浪費)
操作便利性	需懸掛、封口、調整高度	2 (繁瑣)
氣味逸散	需大量封口膜，拆卸時氣味重	2 (有明顯氣味)
實驗成功率	易觸碰杯壁導致失敗	3 (需小心操作)
廢棄物產生	大量溶劑、封口膜、膠帶	1 (多)

第一週第二節子題為「綠色革新—微量放射狀臂濾紙層析裝置」，其**教學重點為**引入放射狀臂濾紙設計，實作綠色微型實驗，體驗「減量」的效益。促成：

1. **學生思維轉變**：全班若有 10 組，使用傳統裝置將消耗 250-500 mL 的有機溶劑。引導學生思考如何利用「幾何形狀改變」來達成減少溶劑量。
2. **放射狀裝置製作與操作**：

   甲、裝置微型化：介紹利用小瓶蓋（直徑約 2 cm）作為流動相儲槽，並以大瓶蓋作為支撐架的設計（如圖 3、4）。

圖 3
微量放射狀臂濾紙裝置

圖 4
放射狀臂濾紙層析

第二週 綠色工程師—微型裝置設計與製作

教學重點：延續上週課程其本週重點在於「工欲善其事，必先利其器」。除了介紹綠色化學概念外，重點在於指導學生製作精密的放射狀濾紙與微型儲液裝置。這不僅是化學課，更是一堂美感與工程的實作課。

實驗步驟與實作細節：

1. 流動相儲槽製作

甲、學生需準備一個直徑約 2 cm、高 1 cm 的小瓶蓋（容量約 2.5 mL），以及一個直徑 10-12 cm 的大瓶蓋（底座）或玻璃發皿。

乙、利用強力雙面膠將小瓶蓋固定於大瓶蓋正中央，需確保水平，避免傾斜導致流動相分佈不均（圖 5）。

丙、固定栓：這是本實驗的巧思所在。指導學生將拋棄式塑膠滴管的球部剪下，修剪成一個能夠塞入濾紙中心孔洞的「塞子」。此塞子的功能是確保濾紙中心的三角形折角能穩定地浸沒在流動相中，防止濾紙浮起（圖 6）。

丁、細節注意：為了防止溶劑揮發並觀察實驗進程，學生需裁切透明塑膠片（可利用回收的資料夾或保鮮膜），封裝於紙盤底部，製成透明上蓋。

2. 放射狀濾紙圖樣製作

甲、數位輔助設計：學生可使用 PowerPoint 繪製直徑 15 公分的圓，內部設計一中心六邊形，並向外延伸出六條臂，每臂寬 0.5 公分（圖 7）。

乙、轉印與裁切：將濾紙以可移除雙面膠暫時固定於 A4 列印紙上，送入印表機列印圖樣。隨後進行最考驗耐心的步驟裁切。

丙、細節操作：學生需使用銳利美工刀，小心切除臂與臂之間的扇形區域。教師需特別強調：「中心連接處絕對不能切斷，且每條臂的寬度需一致」，這直接影響後續流動相展開的速率是否同步。

丁、摺疊技巧：最後利用鑷子將中心六邊形的六個三角形尖端向下折 90 度，形成「腳」，這是接觸流動相的關鍵部分。

圖 5
流動相儲槽

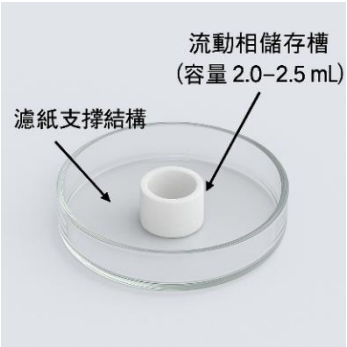
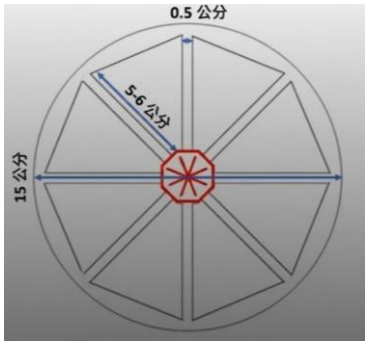


圖 6
固定栓

圖 7
射狀濾紙規格



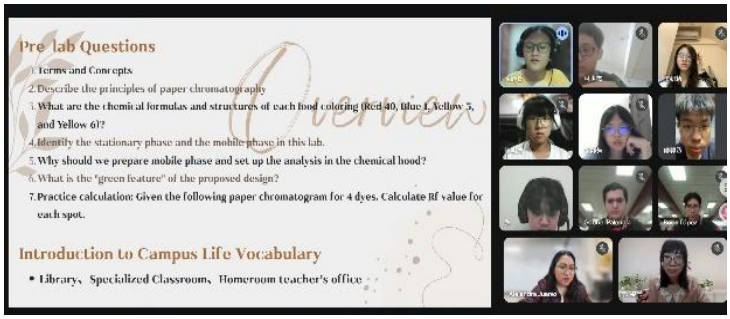
學生在實驗紀錄中的回饋如下（表 3）：

表 3
學生的回饋

學生實驗日誌問題	問題原因分析	改進方法
裁切濾紙時各臂寬保持一致性最具挑戰	手工裁切受視覺判斷與手部穩定度影響，容易產生誤差，導致臂寬不一致	1. 提供裁切模板輔助定位 2. 先以鉛筆與直尺畫線再裁切 3. 統一使用相同裁切工具
因使用雙面膠固定時濾紙易撕破	濾紙抗拉強度低，高黏性雙面膠剝離時造成拉力集中	1. 改用低黏性雙面膠或紙膠帶 2. 減少黏貼面積，採點狀固定 3. 可增加中間紙層分散應力
中心六個小三角形向下折 90° 困難，很考驗眼力影響插入瓶蓋	折角精準度受人眼判斷誤差與濾紙回彈性影響，折太深或不足皆會影響結構	1. 使用筆桿或瓶蓋作為折角輔助物 2. 利用預折後微調方式 3. 更換較適合濾紙材質

國際線上交流：透過 Google Meet 或 Zoom 與國外夥伴學校連線。利用線上會議分組討論，內容以投影片的方式與瓜地馬拉高中生分享學習單內容（圖 8）。

圖 8
線上交流影像



第三週 色彩的科學—基礎色素分離

教學重點：利用安全性高的食用色素進行試作，讓學生熟悉微量點樣技術與裝置操作流程，理解 Rf 值計算，驗證層析原理。

實驗步驟與實作細節：

1. 樣品製備：

甲、準備紅（Red 40）、藍（Blue 1）、黃（Yellow 5/6）食用色素標準液，以及由藍黃混合的綠色未知液。

乙、另備有色素跳跳糖，溶於少量水中作為測試樣品。

2. 微量點樣：

甲、這是影響實驗成敗的關鍵。學生將濾紙平放，在距離中心約 1.5 cm 的臂上用鉛筆做記號。

乙、使用毛細管或微量吸管沾取色素。教師強調：「點要小，顏色要濃」。學生需進行「點樣—吹乾—再點樣」的循環約三次，將色點直徑控制在 2-3 mm 以內，以避免展開後圖譜過度擴散拖尾。（圖 9）。

3. 層析展開：

甲、將 2 mL 的去離子水或 0.1% NaCl 溶液注入小瓶蓋儲槽。

乙、迅速將放射狀濾紙覆蓋於裝置上，確保三角形尖端浸入液體，並塞入自製的「固定栓」。

丙、蓋上透明保鮮膜蓋，壓上重物密封（圖 10）。

4. 實驗數據分析：進行下列測量與計算

甲、待溶劑前緣（Solvent Front）到達臂端前 0.5 cm 停止實驗，迅速用鉛

筆描繪溶劑前緣（因乾燥後會消失）。

乙、測量溶劑移動距離 (Y) 與各色點中心移動距離 (X)。

丙、計算 Rf = X / Y。

圖 9

學生微量點樣實驗

學生在實驗紀錄中的回饋如下（表 4）：

表 4

學生的回饋

學生實驗日誌問題	問題原因分析	學生修正策略
觀察到水相沿六條臂同步擴散，色素分離成藍色與黃色	六臂結構對稱、不同色素對固定相與流動相親和力不同	屬於正確現象，解釋分離原因
點樣一滴就暈成 5 mm，無法控制在 2–3 mm	點樣體積過大、濾紙吸水速度快	使用較細毛細管、輕觸即離；先在廢紙上練習點樣
毛細管用力過大，戳破濾紙形成小洞	濾紙纖維結構脆弱，操作角度不當	毛細管與濾紙接近平行、只「點」不「刺」
未吹乾就進行第二次點樣，圓點融合	溶劑尚未蒸發，樣品仍在擴散	每次點樣後完全乾燥再進行下一次，可輕吹或靜置
點樣位置太靠近中心，樣品直接流入儲槽	起始點位置錯誤，未進入分離區	應事先標示安全點樣區域，避免靠近中心
Rf 值偏低，組間差異大	環境濕度高，影響蒸發與移動速率	記錄環境條件並納入誤差分析，不視為操作錯誤

國際線上交流：利用線上會議分組討論，內容以錄製各自實驗過程影片的方式與瓜地馬拉高中生分享內容及回饋（圖 11）。

第四週 探究與挑戰—墨水分離與溶劑效應

教學重點：課程進入探究實作，引入配置不同有機溶劑與選擇不同極性的墨水樣品。

實驗步驟與實作細節：

1. 多樣化樣品測試

甲、學生蒐集各種黑色筆：水性原子筆、油性奇異筆、白板筆、簽字筆等。

乙、預測：根據筆的特性（水性/油性），預測其在水與有機溶劑中的移動行為。

2. 流動相的調置

甲、學生自行分組調配不同的有機流動相，探討極性對分離的影響。其方法包括：

i. 方法 A：70% 異丙醇（Isopropanol，藥局常見）。

ii. 方法 B：91% 異丙醇。

iii. 方法 C：1-丁醇 / 乙醇 / 氨水 (1:1:1) 混合液（圖 12）

3. 對照實驗

甲、同一種油性筆，分別在「水」與「異丙醇」系統中進行層析。學生將親眼見證「相似者互溶」的化學原理：油性墨水在水中幾乎不動（Rf ≈ 0），但在異丙醇中則順利展開。

圖 10
學生層析展開實驗

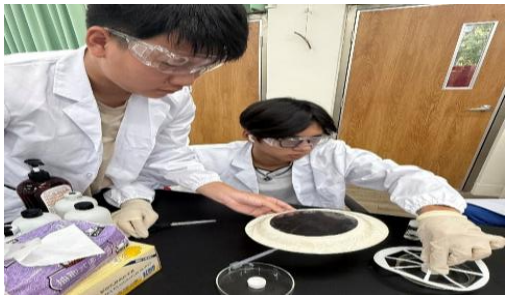
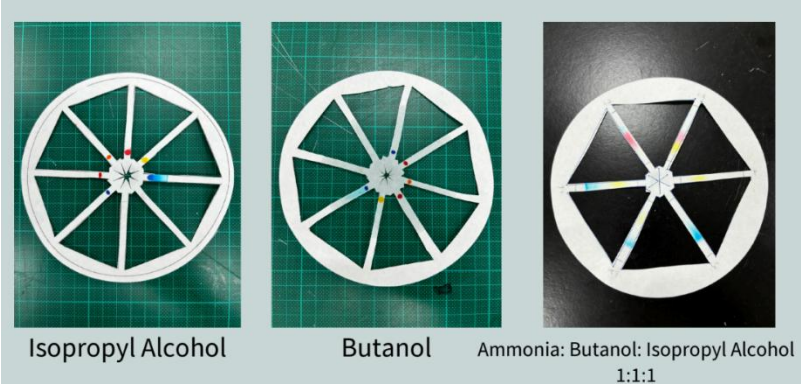


圖 11
與瓜地馬拉學生討論交流實驗內容

圖 12

不同溶劑比例的放射狀濾紙層析結果



學生在實驗紀錄中的回饋如下：

1. 對於麥克筆在酒精中被分解成紫色、黃色等多種成分感到驚奇。
2. 方法 C（含氨水）雖然分離效果極佳，但強烈的氣味讓學生深刻體會到微量化的重要性—即使只有 2 mL，氣味仍可察覺，若依照傳統方法使用 30 mL，後果不堪設想。
3. 「我原本以為奇異筆（油性）多少會跑一點，結果在純水的裝置裡，那個黑點完全不動（Rf = 0），只有水自己往外跑，濾紙都濕透了，黑點還是在原地。」
4. 「A 牌的原子筆跑出來是冷色調（藍紫多），B 牌的原子筆跑出來竟然帶有紅色和棕色，原來每一家的配方真的都不一樣。

國際線上交流：

1. 內容： 雙方學生展示各自的放射狀濾紙成品，數據分析比較相同色素在不同比例溶劑的 Rf 值差異，更進一步誤差討論。
2. 議題討論：討論 "How do you dispose of chemical waste in your country?"（你們國家如何處理化學廢棄物？），引導學生思考法規與環保意識的文化差異（圖 13）。

圖 13

在大會議室裡由各自的教師指定學生分享議題觀點

教師的反思

作為第一線教師，作者回顧這四週的「綠色化學 x 國際交流」課程，有以下深刻的反思與發現：

一、科學作為共通語言，有效降低語言焦慮

在過往的雙語教學或國際交流經驗中，學生常因擔心文法錯誤而不敢開口。然而，在此次課程中，我觀察到一個有趣的現象：「科學術語成為了溝通的良好橋梁」。因為雙方都操作了相同的實驗，擁有共同的經驗脈絡。當臺灣學生拿著實驗照片，指著色層分析圖說出 "The Rf value of Red 40 is 0.65" 時，對方頻頻點頭並回應自己的數據。學生發現，只要實驗做得精確、圖表做得清楚，即便只用簡單的單字（solvent, flow, separate），也能成功傳達複雜的科學概念。這種「我說的話對方聽得懂」的成功經驗，極大地降低了他們的語言焦慮，轉而更專注於科學內容的交流。

二、從「模仿操作」到「工程思維」的轉變

傳統實驗課，學生往往只是按部就班地依據步驟操作。但在本課程的第一週「裝置製作」中，學生必須親手裁切、摺疊、調整塞栓的大小。許多學生第一次失敗，發現塞栓太鬆導致濾紙浮起，或是裁切不平整導致流動相跑偏。這些「失敗」迫使他們像工程師一樣思考：如何改進製程？如何讓六條臂的流動速率一致？這種從動手做昇華至動腦想的過程，正是探究與實作課程最珍貴的價值。改良式的放射臂狀設計，讓實驗器材不再只是冰冷的玻璃儀器，而是學生親手打造的紙工藝品。

三、擴展視野：綠色化學的全球共鳴

透過交流，學生驚訝地發現，國外夥伴對於「廢液減量」的重視程度甚至高於實驗結果的精準度。外國學生分享了他們如何利用當地的回收材料（如寶特瓶、廢棄 CD 盒）來改裝層析槽，這激發了臺灣學生深刻的反思：原來綠色化學不只是課本上的十二原則，而是全球科學社群共同的規範。

有名學生在心得中寫道：「以前我覺得倒掉幾毫升溶劑沒什麼，但在視訊中看到外國朋友為了節省一滴溶劑而斤斤計較的樣子，我才意識到這就是對地球的責任。」這種真實的情境連結，比課堂上的道德勸說更能有感深植環保意識。

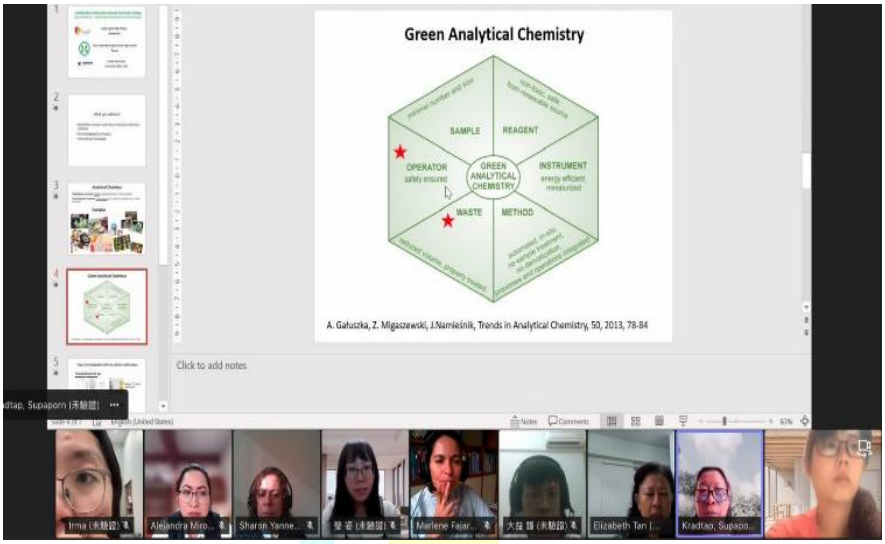
四、教學相長的動力

對於教師而言，除了備課過程中需要研讀英文實驗文本，並將其轉化為適合國內學生的教材，另外需要每次學生線上交流會議前，各國老師們在提前會前會（圖 14），這本身就是一種專業成長。當然，實施過程有很多挑戰，例如視訊設備的延

遲、兩國學制的上課時間配合、以及部分學生在鏡頭前的害羞，都是需要克服的問題。特別是必須預測學生在操作微量裝置時可能遇到的困難（如點樣技巧）。而看到學生為了在國際友人面前展現最好的成果，主動在課後留在實驗室反覆練習毛細管的操作，力求實驗圖譜完美，這種內在的學習動機是最令教師感動。

圖 14

跨國界各國教師開會前會一起討論合影



結語

發展學生對科學的興趣與強化全球素養是 STEM（科學、科技、工程、數學）教育的重要目標。將「放射狀臂微量層析」導入高中化學課程，不僅成功將綠色化學的抽象概念轉化為具體的實驗行動，達成綠色化學減量、減廢的目標，更透過器材的自

製與改良，提升了學生的實作技能與工程思維。「綠色化學－虛擬跨文化交流」能讓高中生透過低成本實驗獲得寶貴的動手實驗與跨國合作分享經驗，並克服常見限制（例如經費、課程時間與課程僵化）。而線上國際交流的引入，則為這個微觀的化學實驗增添了宏觀的全球視野。在未來的教學現場，我們期待更多教師能嘗試這種「低成本、廣連結」的課程模式。讓化學實驗不再是汙染的來源，而是啟發學生愛護環境、連結世界的起點。

參考文獻

教育部 (2018)。**十二年國民基本教育課程綱要國民中小學暨普通型高級中等學校—自然科學領域**。

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press.

Bosley, J. (n.d.). *What is fountain pen ink chromatography*. Fountain Pen Love.

DeMott, J., Hilvano, Z., Cann, H., Baldwin-Zurek, I., Kershisnik, W., & Hartwell, S. K. (2024). Novel design of low volume mobile phase paper chromatography. *Green Analytical Chemistry, 10*, 100121.

Hartwell, S. K. (2012). Exploring the potential for using inexpensive natural reagents extracted from plants to teach chemical analysis. *Chemistry Education Research and Practice, 13*, 135–146. https://fountainpenlove.com/miscellaneous/what-is-fountain-pen-ink-chromatography/

LibreTexts. (n.d.). *Paper chromatography*. https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Instrumentation_and_Analysis/Chromatography/V._Chromatography/E._Paper_Chromatography

Singh, M. M., Szafran, Z., & Pike, R. M. (1999). Microscale chemistry: The new standard. *Journal of Chemical Education, 76*(12), 1684.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (n.d.). *Basics of green chemistry*. https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry