

走航式海水二氧化碳分壓 ($p\text{CO}_2$)
與溶解無機碳穩定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C-DIC}$)
量測系統操作手冊

Operation Manual

for Underway $p\text{CO}_2$ and $\delta^{13}\text{C-DIC}$ Measurement System

編撰者：高愷嶸

編撰日期：2026 年 六月

目錄

第一章、走航式二氧化碳儀器基本資訊	4
1.1 水氣平衡器系統	4
1.1.1 海水樣本中 $p\text{CO}_2$ 氣體的量測原理與流程	5
1.1.2 溫鹽、水文及氣象系統	6
1.2 儀器基本資訊-偵測器	7
1.2.1 LI-7000 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 氣體分析儀	7
1.2.2 碳同位素碳分析儀	7
第二章、系統安裝於研究船	8
2.1 硬體架設	8
2.2 水路設置	9
2.3 電路設置	9
2.4 走航系統	10
2.5 GPS 訊號線	11
2.6 空氣樣本進樣管線架設	12
2.7 二氧化碳標準氣體標定與架設	12
2.8 LI-COR 7000-PICARRO 穩定碳同位素分析系統氣體流路配置	14
第三章、儀器架設、設定、軟體操作	16
3.1 開機 (POWERING ON)	16
3.2 系統檢查 (CHECKING THE SETUP)	16
3.3 水流量調整 (ADJUSTING THE WATER FLOW RATE)	17
3.4 初始設定 (INITIAL CONFIGURATION)	17
第四章、測量海水的 PCO_2 程序	21
4.1 PCO_2 量測程序	21
4.2 量測結束與關機	21
第五章、測量資料檢視與處理	22
5.1 檢視近期量測資料	22
5.2 檢視量測趨勢圖	23
5.3 匯出量測資料 (EXPORTING DATA)	24
5.4 匯出資料	24
5.5 由量測 CO_2 計算校正後 PCO_2	25
5.6 將 xCO_2 換算為 100% 相對濕度之 PCO_2	26
第六章、故障排除	27
參考文獻	30

第一章、走航式二氧化碳儀器基本資訊

1.1 水氣平衡器系統

走航式二氧化碳分析儀其儀器設置主要由水氣平衡器系統、偵測端與電腦所組成。以下會分別說明儀器架設細節、水路、氣體管路串聯、大氣樣本採樣設置、標準氣體準備流程。新海研 3 號走航式二氧化碳分壓系統(Underway $p\text{CO}_2$ system)為 AS-P3 (Apollo SciTech, LLC):

此系統試用電壓為 110VAC, 保險絲為 4-Amp slow burn。

儀器乾重為 43Kg, 搬運過程中請水平搬運, 並且避免震動導致管線與電路鬆脫。

此套 $p\text{CO}_2$ 走航系統包含以下主要組件(圖 1):

- 表水溫鹽儀 (Seabird SBE-45 Thermosalinograph, 在水樣過濾器正後方)
- 兩階段噴淋式 (showerhead) 平衡器 (equilibrator)
- 水樣過濾器 (water filters)
- 溶氧探針 (Oxygen optode)
- 酸鹼度探針 (pH probe)
- 氣體選擇閥 (gas selection valve)



圖 1、二氧化碳分壓分析器 (圖片截自官網手冊)。

1.1.1 海水樣本中 $p\text{CO}_2$ 氣體的量測原理與流程

此平衡器透過兩階段噴灑增強氣液接觸效率，使海水中溶解的 CO_2 與平衡器內的氣體較快達成氣液平衡。

1. 海水樣本

由研究船表水系統幫浦抽取海水(如圖 2 內藍色箭頭所示)，經過水樣過濾器後流進表水溫鹽儀，接著一部分水樣送入系統的兩階段平衡器，使 CO_2 自水中釋放至平衡器內氣體中(圖 1, 2)。請注意，水體流入水氣平衡器的流速最慢請高於 2 L min^{-1} ，在這樣流速下響應時間(e-folding time)為 6 分鐘內（海水樣本二氧化碳濃度改變可在 6 分鐘內達到新的平衡值(Pierrot et al., 2009)），樣水流入速率若少於這流速便會使響應時間拉長。若是碳十三穩定同位素訊號穩定則需要至少十至十五分鐘。

2. 飽和氣體樣本乾燥處理

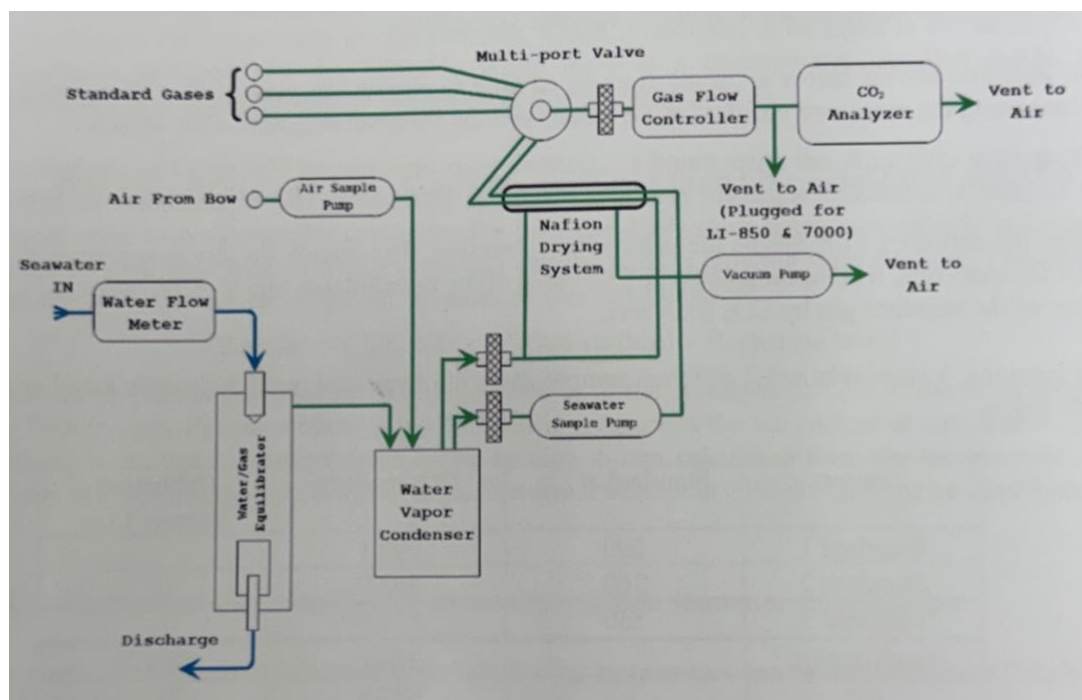
平衡器上方達到水氣平衡的飽和水氣(headspace air)會經過以下乾燥程序包含：

- 電子冷卻系統 (electronic cooling system)
- Nafion 乾燥管
- $0.2 \mu\text{m}$ 孔徑的空氣濾心(air filter)

此組乾燥系統可有效去除水氣與顆粒，避免氣體的濕度影響偵測端 CO_2 量測。

3. 氣體分析儀

乾燥後的氣體樣品經過 multi-port valve (VICI valve)後送入分析儀進行 CO_2 濃度或碳十三穩定同位素量測，目前新海研 3 號的走航系統可串接二氧化碳分析儀與碳同位素碳分析儀(Picarro 2131i)，下一段會詳細說明此儀器。大氣樣本氣體測量流程與海水樣本一致。



1.1.2 溫鹽、水文及氣象系統

為提高 $p\text{CO}_2$ 計算之準確度，系統同時量測多項環境變數，包括：

- 溫度與鹽度：

使用 Seabird SBE-45 Thermosalinograph 量測海水溫度、鹽度，以及進水口當下的水溫與鹽度。此外，水氣平衡器也有溫度探針，可紀錄水樣水氣平衡時的溫度變化，通常水氣平衡器內的溫度會高於進水口的溫度 0.5 度。在計算時二氧化碳分壓時請考慮此溫度差異對於 $p\text{CO}_2$ 計算之影響。

- 大氣壓力與水氣平衡器內水氣分壓：

系統會自動記錄氣壓與水氣分壓 (water vapor pressure)，並納入 $p\text{CO}_2$ 計算。

三、氣象與定位資料

新海研 3 號購置的走航式二氧化碳分壓系統沒有氣象測量設備。目前定位資訊是串聯新海研 3 號定位訊號。

四、進階型 (Premium Package) 之附加探針

此新海研 3 號購入的系統額外包含：

- 溶氧感測器：Aanderaa 4835 DO (圖 1)
- pH 感測器 (圖 1, 在 DO 探針正後方)

表水由表水溫鹽儀流出後一路進水氣平衡器，另一路進入溶氧與 pH 感測器，同時量測與紀錄表水溶氧與 pH 變化。表水這些資料有助於科學家現場判斷， $p\text{CO}_2$

觀測的數據可靠性。航次結束後，保持探針濕潤，以延長探針使用年限。目前 Durafat pH 電極已經沒有再生產，請小心保存。

1.2 儀器基本資訊-偵測器

1.2.1 LI-7000 CO₂/H₂O 氣體分析儀

目前新海研 3 號走航式二氧化碳分壓系統串連 CO₂/H₂O 氣體分析儀與碳同位素碳分析儀。CO₂/H₂O 氣體分析儀 LI-7000 為 LI-COR 公司所開發之高精度封閉式 CO₂/H₂O 氣體分析儀 (Closed-Path Infrared Gas Analyzer)，其設計主要用於長期、連續且具穩定性的二氧化碳與水氣量測。透過雙光路 (dual-optical path) 以及差分式紅外線吸收技術，LI-7000 能有效消除溫度、壓力與背景漂移造成的干擾，提供低噪訊與極高靈敏度的濃度測量輸出，搭配平衡器 (equilibrator) 可測量海水與大氣中 CO₂ 氣體濃度。

1.2.2 碳同位素碳分析儀

目前新海研 3 號持有碳同位素碳分析儀 (Picarro 2131i)。該分析儀利用時間基準的光學吸收光譜法 (optical absorption spectroscopy) 來量測目標氣體濃度。其核心為 Picarro 專利的波長掃描腔體衰減光譜法 (WS-CRDS)。此技術讓雷射光在樣品中往返數萬次，使有效光徑大幅增加，從而達到極高靈敏度，並可將儀器製作成堅固、緊湊且可野外使用的形式。

分析儀系統由兩個主要模組組成：

分析儀主機（包含光譜儀、樣品腔、內部電腦與硬碟）負責量測與濃度計算。

外接真空幫浦用於將氣體抽入並維持腔體壓力。操作順序：請先開啟外接真空幫浦再開啟分析儀主機，關閉系統時順序則反之。

第二章、系統安裝於研究船

2.1 硬體架設

pCO₂走航系統應安裝於船舶或實驗室內穩固的平台上，並置於具備良好通風條件且穩定室溫（約 25°C）的環境中。環境相對濕度應低於 85%。走航式二氧化碳分壓系統架設時請找尋方便串接研究船上供電來源、供水系統與排水系統的位置。同時必須做好防護措施以免進水或排水端突然爆管導致儀器損毀。

架設先固定鐵架於檯面上，後續分別放入走航式系統、CO₂/H₂O 氣體分析儀（最上方）與碳同位素碳分析儀（中間層）（圖 3）。

架設後請開啟時時空調以避免室內濕度過高。若是要測室內空氣過夜進行以穩定系統，請關閉艙門避免內水氣過高，導致氣體分析儀損毀。

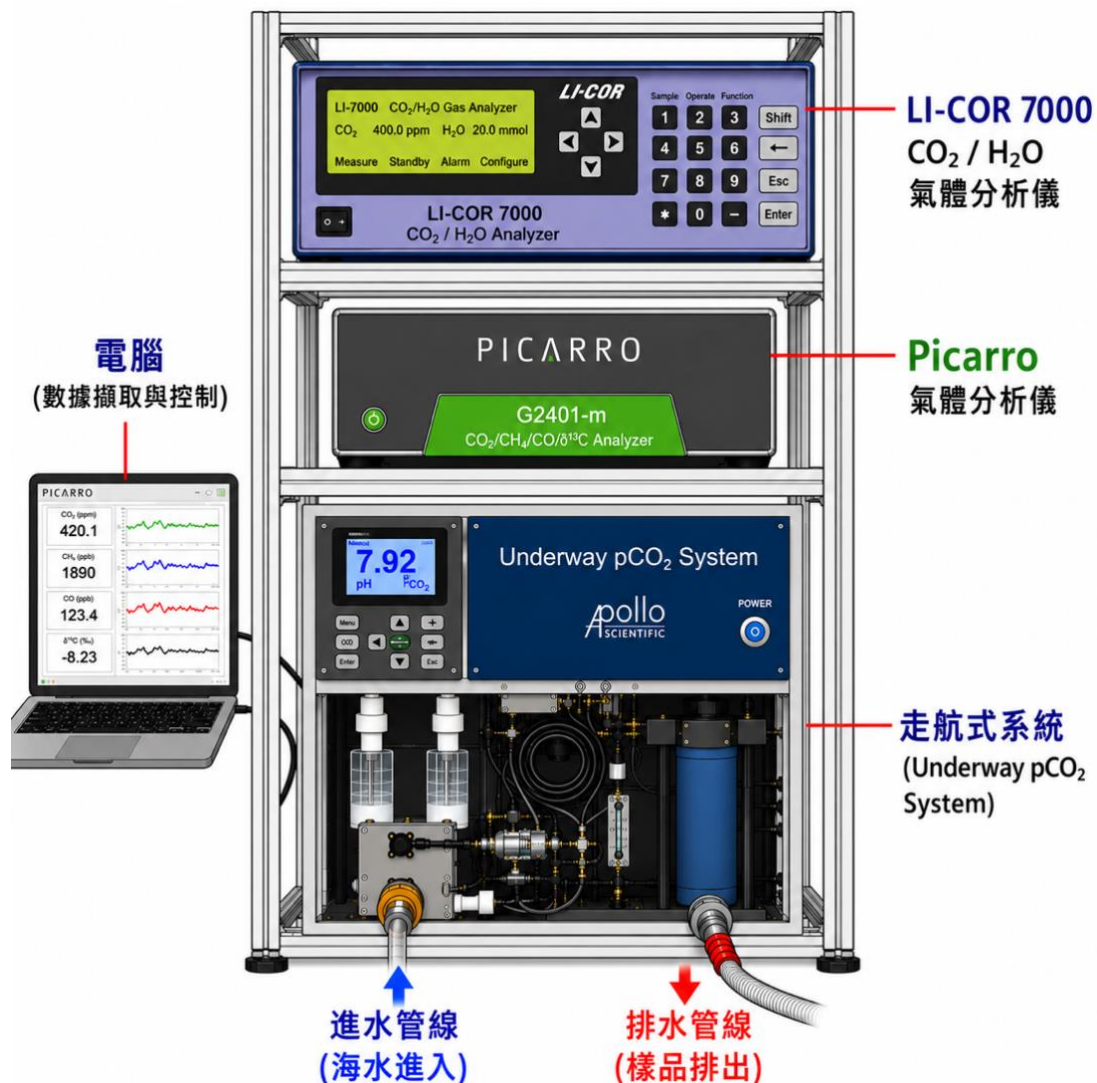


圖 3、航式二氧化碳分壓系統串連 CO₂/H₂O 氣體分析儀與碳同位素碳分析儀於研究船實驗室內架設圖。

2.2 水路設置

供水系統應提供 2.5 - 5 L/min 流量（建議 3.5 L/min）及 60 psi 壓力。表水樣本會經研究船上表水溫鹽儀後流經去泡器(Debubbler)去除海水樣本氣泡，再流經濾芯（空孔徑 0.45 μM ，可依探測海域不同進行更換，圖 4）後進入走航式系統，避免顆粒阻塞或累積於系統中。在航次觀測期間，請確認水路不可以有氣泡累積。此外，要記得確認濾芯是否需要清潔或更換，更換或清洗頻率濾芯請依探測海域彈性調整。

此系統排水依靠重力排出，排水管不得彎折、阻塞或受壓。若排水受阻，需排出的水樣累積於平衡器中將影響量測精度並可能損壞設備。以 3/4 英吋管路或軟管連接排水口。因為台灣法規限制，依據這樣的排水量可能會導致台灣研究船污水櫃櫃過載的現象，所以出海時盡可能攜帶水桶與具備開關功能之沉水馬達，直接將量測後的水樣排出船體。



圖 4、海水樣本濾芯。

左圖為疊式濾芯，右圖為拋棄式聚丙烯樹脂濾芯。

2.3 電路設置

此走航系統可使用 110 VAC/60 Hz 或 220 VAC/50 Hz 電源。確認電源規格相容後再接線。此設備、兩偵測器與電腦的供電建議由穩電壓功能之不斷電系統提供，以避免船隻突然斷電對於系統造成損害。走航系統於量測前應暖機至少 1 小時以上。走航系統透過 usb 訊號線彙整資訊至筆電，透過圖 5 說明走航系統、偵測器與筆電間訊號線該如何串聯。

1. LI-COR 7000

使用 LI-COR 原廠 RS232 訊號線，將 LI-COR 7000 訊號連接至走航系統側面板之連接埠。

2. Picarro 2131i

Picarro 2131i 使用 USB 訊號線直接連接至筆電進行資料擷取與記錄。

3. 外接螢幕

Picarro 2131i 可透過 HDMI 訊號線連接外接螢幕，以即時顯示量測資訊。此訊號與筆電資料擷取無關。

2.4 走航系統

走航系統透過 USB 訊號線連接至筆電，負責彙整並輸出系統相關量測資訊。

注意事項：

- LI-COR 7000 必須使用原廠 RS232 訊號線。
- Picarro 2131i 具有獨立的資料與系統顯示功能，外接螢幕可直接連接至 Picarro 2131i。

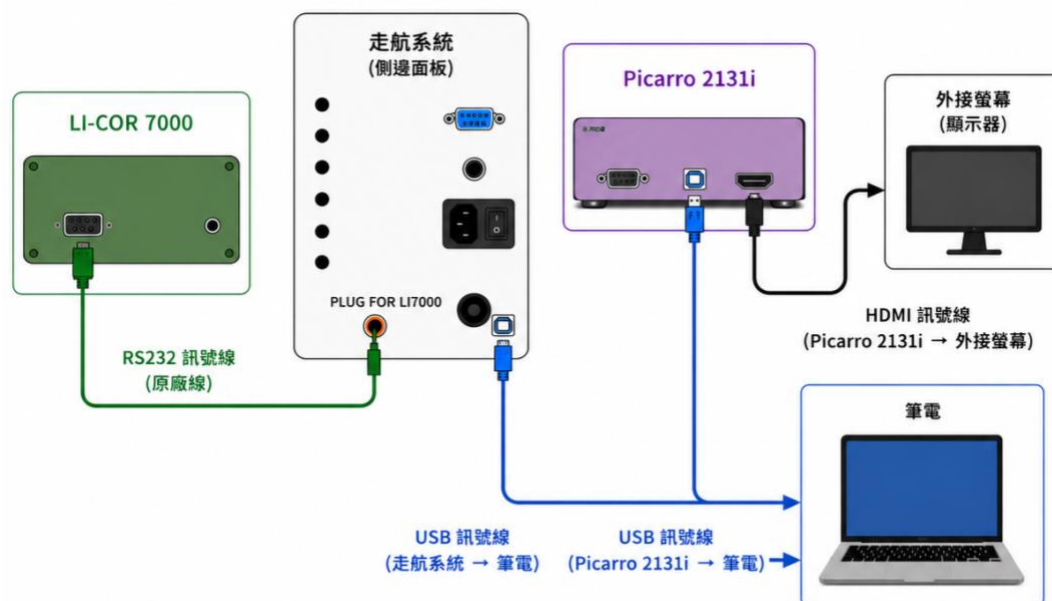


圖 5、訊號線連接示意圖。

2.5 GPS 訊號線

GPS 訊號線由走航系統（圖 6）直接連接至最上層甲板之 GPS 天線（圖 7），以降低船體結構對衛星訊號接收的遮蔽與干擾，確保定位資料的穩定性與準確性。GPS 訊號透過 RS232 通訊介面傳輸至走航系統，供航行位置、時間及相關導航資訊記錄使用。目前新海研 3 號的 GPS 系統無法與走航系統轉連（20260709 更新）。



圖 6、二氧化碳分壓分析器氣體、電源線與訊號線示意圖（圖片取自官網手冊）。



圖 7、GPS 訊號線架設示意圖。

2.6 空氣樣本進樣管線架設

空氣進樣管線（使用 1/4 英吋外徑氣密管路）應延伸至最上層甲板（圖 8 左）進行取樣，以降低船舶主機、其他排氣系統與人為廢氣對大氣二氧化碳量測之干擾，確保所採集樣本具有良好的代表性。進樣口應設置適當之防水措施，以避免雨水、海浪飛沫或冷凝水進入管線，影響量測品質或造成儀器損壞。

在空氣樣本進入走航系統前，氣體管線須加裝冷凝水排除裝置（圖 8 右），以有效移除管線中可能產生之冷凝水。由於實際海上環境濕度較高，若未進行適當除水處理，過量水氣可能進入分析系統，進而影響氣體流量穩定性、量測精度及儀器運作可靠度。因此，應定期檢查冷凝水排除裝置之排水狀況，以確保系統正常運作。



圖 8、空氣樣本進樣口與防水設施架設。

左圖為空氣樣本進樣口與防水設施架設，右圖空氣樣本冷凝水排除裝置。

2.7 二氧化碳標準氣體標定與架設

標準氣與走航系統串聯是使用 1/8 英吋外徑不鏽鋼或銅管連接。每個氣瓶應配備二段式減壓閥。氣瓶必須直立固定並符合安全規範。系統至少需 3 組標準氣，最多可連接 5 組。連接完成後將出口壓力調整至 15 psi，確認無漏氣。非量測期間應關閉氣瓶閥門。航次期間通常使用攜帶較為便利之次標準氣體（Secondary Standard Gas）進行儀器校正。然而，次標準氣體可能因長期使用、鋼瓶壓力變化或其他因素造成濃度偏移，因此於每次航次出海前，均應使用經認證之 NIST（National Institute of Standards and Technology）標準氣體進行重新標定，以確保校正氣體濃度之準確性。

目前標定作業採用海洋科學系黃蔚人老師實驗室提供之 NIST 標準氣體進行校驗，標定程序如下：

(1) 標準氣體架設

- a. 將標準氣體鋼瓶連接至走航系統之不鏽鋼進氣管線，並確認所有接頭已妥善鎖固。
- b. 緩慢開啟鋼瓶主氣閥，使用泡泡水檢查所有接頭及管線連接處，確認無漏氣情形。
- c. 調整減壓閥（Regulator）輸出壓力，使出口壓力維持於 10–20 psi 範圍內，以提供穩定氣體流量。

(2) 次標準氣體標定

次標準氣體之標定應透過走航系統串接 LI-COR 7000 分析儀進行校驗。建議至少使用 2–3 支 NIST 標準氣體建立校正曲線，再對 1 支次標準氣體進行標定。

其中，所選用之 NIST 標準氣體濃度範圍應涵蓋次標準氣體濃度，至少包含：

- 一支濃度低於次標準氣體之 NIST 標準氣體
- 一支濃度高於次標準氣體之 NIST 標準氣體

完成標定並確認次標準氣體濃度後，方可於航次期間作為儀器校正氣體使用。

(3) 漏氣檢查與壓力監測

所有標準氣體鋼瓶於連接至走航系統後，均須開啟氣閥並以泡泡水檢查各接頭及管線是否存在漏氣情形。

航次出發前，建議於完成架設後關閉鋼瓶主閥並記錄鋼瓶壓力值，隔日再次確認壓力是否發生異常下降。若壓力明顯降低，表示系統可能存在微漏氣現象，應重新檢查所有接頭、減壓閥及管線配置。

航次執行期間亦應定期監測鋼瓶壓力變化，以確認氣體供應正常。若未即時發現漏氣問題，可能導致標準氣體耗盡，使後續儀器校正作業無法進行，進而影響量測資料品質與航次作業進度。

此外，除了上述管線氣體測漏外。我們也必須檢查整個走航式儀器是否漏氣，可用吸管沿著管路呼出氣體，看該區域是否造成 CO₂ 濃度增加。此測試必須於防刺前完成測試，以確保資料品質。

2.8 LI-COR 7000 - Picarro 穩定碳同位素分析系統氣體流路配置

A. 樣本氣路 (B Cell 外部氣路)

走航系統切換之大氣樣本與表水平衡氣樣本，皆由 LI-COR 7000 的 **Bin** 入口進入 B Cell 分析槽進行量測。

樣本氣體離開 B Cell 後，由 **Bout** 出口排出，並依序通過 (圖 9 右)：

橘色可替換濾芯濾球 (Water Trap) 中的白色濾碟 (Inline Filter)，用於過濾微粒與化學藥劑顆粒。

完成除水與過濾後，氣體進入 Picarro 分析儀進行穩定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 量測。為確保量測品質，應定期檢查濾球、乾燥劑及濾碟之狀態，必要時立即更換，以避免水氣或顆粒物進入 Picarro 分析系統。

B. 內部參考氣路 (A Cell 內部循環回路)

LI-COR 7000 的 A Cell 為參考分析槽，必須透過儀器內建幫浦建立封閉循環氣體回路，以維持穩定且低背景濃度之參考氣體環境。

氣體循環路徑如下 (圖 9 左)：

A Cell 出氣 (Aout) → 內建幫浦 IN → 內建幫浦 OUT → 去除水氣 (過氯酸鎂 Magnesium Perchlorate, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) 與二氧化碳 (氫氧化鈉包覆矽酸鹽 Ascarite II) 化學藥劑 → 白色濾碟 → A Cell 進氣 (Ain) → A Cell

其中：

去除水氣與二氧化碳化學藥劑用於持續吸附循環氣體中的水氣與 CO_2 。

白色濾碟用於阻擋化學藥劑粉塵進入分析槽。

所有接頭應保持良好氣密性，避免外部空氣滲入而影響量測結果。

內建幫浦流速建議設定為最慢且穩定之流速，以降低化學藥劑消耗速率並維持穩定循環。

內建幫浦流速設定

按下 **SHIFT** 鍵。

按下數字鍵 **6**。

螢幕將顯示目前幫浦流速 (Flow Rate)。

選擇最慢且穩定之流速設定即可。

較低流速可有效降低化學藥劑消耗速率，延長藥劑使用壽命；惟仍應確保氣體循環穩定，以維持 A Cell 參考氣體之分析品質。

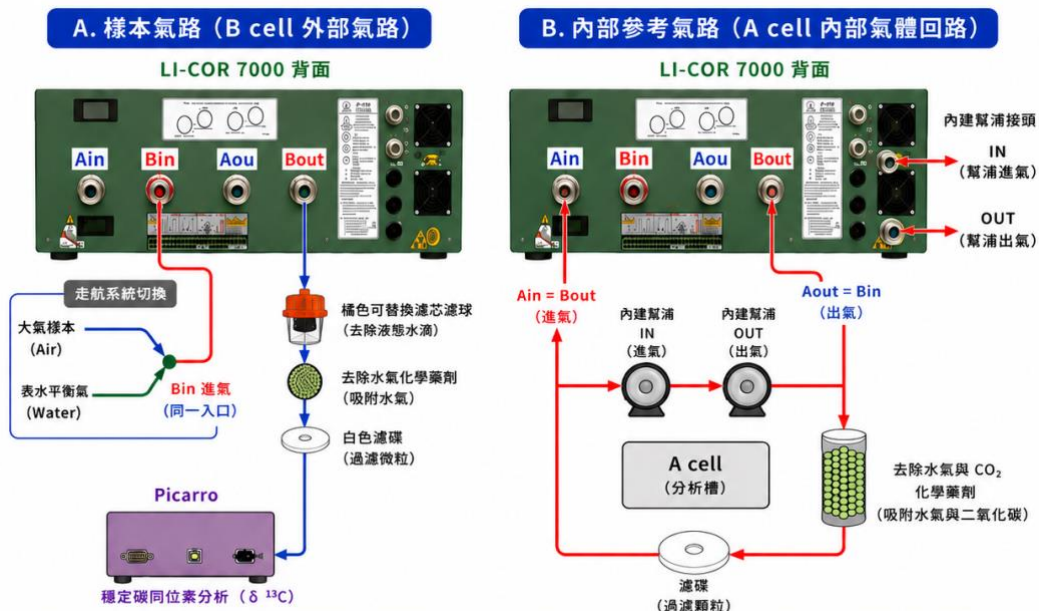


圖 9、LI-COR 7000 與 Picarro 穩定碳同位素分析系統之氣體流向示意圖。

A 為樣本氣路 (B Cell 外部氣路)。走航系統切換之大氣樣本與表水平衡氣樣本共用同一進氣口 (Bin) 進入 LI-COR 7000 B Cell 分析槽。氣體離開 B Cell 後，依序通過橘色可替換濾芯濾球、水氣去除藥劑及白色濾碟，再進入 Picarro 分析儀進行穩定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 量測。B 為內部參考氣路 (A Cell 內部循環回路)。LI-COR 7000 透過內建幫浦建立封閉式循環系統，氣體由 A Cell 出口 (Aout) 經內建幫浦、二氧化碳去除藥劑 (Ascarite II)、水氣去除藥劑 (Magnesium Perchlorate) 及白色濾碟後，再返回 A Cell 入口 (Ain)，以維持穩定之零氣參考環境。

第三章、儀器架設、設定、軟體操作

量測前準備 (Preparing for Measurements)

本章說明如何準備進行量測。內容假設系統已依照第 2 章「系統安裝」完成組裝與連接。

3.1 開機 (Powering On)

按下並放開 LI-5405A 電源按鈕以開啟系統。按鈕周圍的環形指示燈亮起表示設備已通電。在開始量測前，應讓 LI-5405A 預熱 30 分鐘。

開啟氣體分析儀。LI-7815 在接通電源後會自動啟動；若未啟動，請按下電源按鈕。依環境溫度不同，氣體分析儀可能需要 30 至 45 分鐘才能完成暖機。通常，我們會於航次前一天開始暖機，必且執行大氣氣體與標準品量測，以確保一出海便可量得高品質數據。

開啟電腦，登入系統後啟動 pCO₂ 應用程式。

3.2 系統檢查 (Checking the Setup)

完成初始安裝後，在開啟供水或開始量測之前，應先確認系統配置是否正確（圖 10）。

- 確認平衡器排水閥 (Equilibrator Drain Valve) 處於關閉狀態（與流向垂直）。
- 確認兩組濾器底部藍色排水閥均已關閉（與流向垂直）。
- 確認兩個空氣通氣閥 (Air Vent) 均已關閉。
- 確認 SBE 45 主流量閥 (Primary Flow Valve) 與副流量閥 (Secondary Flow Valve) 均已部分開啟。

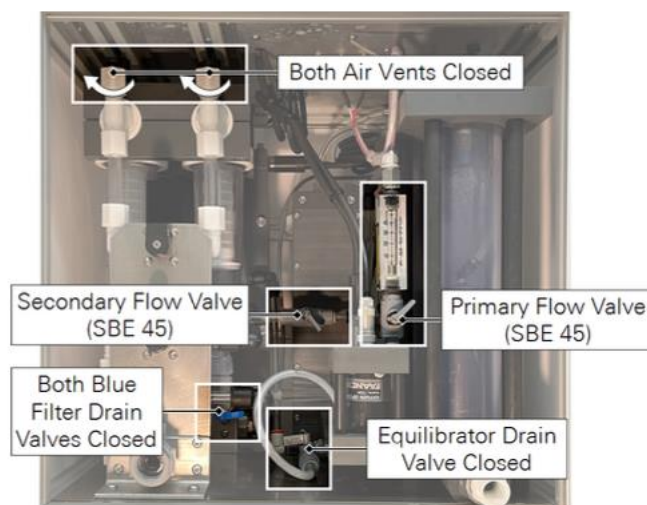


圖 10、開啟主流量閥前之閥件位置示意圖。啟動供水前，請確認空氣通氣閥 (Air Vent)、平衡器排水閥 (Equilibrator Drain Valve) 及兩組藍色濾器排水閥 (Blue

Filter Drain Valve) 均處於關閉狀態；SBE 45 溫鹽儀之主流量閥 (Primary Flow Valve) 與副流量閥 (Secondary Flow Valve) 則應保持部分開啟。

3.3 水流量調整 (Adjusting the Water Flow Rate)

確認供水系統已連接完成，且可提供 2.5–5 L/min 的流量，建議流量為 3.5 L/min，供水壓力約為 60 psi (4.14 bar)。

步驟 1：開啟進水閥，直到海水於平衡器內均勻且緩慢噴灑。閥門與流向平行表示開啟，垂直表示關閉。海水將充滿系統、流經平衡器，並由排水口排出。

- 壓力過低：水呈滴落狀、大水滴、單一水柱或少數幾股水流。
- 壓力過高：水流強烈衝擊平衡器側壁。
- 壓力適當：水均勻且柔和地噴灑，形成細小水滴後部分沿內壁流下。

若發現漏水，應立即修復。可鎖緊鬆動接頭，或將管路重新壓入快速接頭。

步驟 2：測試兩組濾器流路。同步切換兩個濾器選擇閥，使水流進入另一組濾器，並確認兩組濾器均無漏水。

步驟 3：調整 SBE 45 主流量閥，使流量計顯示 20 gal/hr (76 L/hr)。允許流量範圍為 10–28 gal/hr (38–106 L/hr)。

步驟 4：調整 SBE 45 副流量閥，以獲得理想的平衡器流型。持續微調主、副閥門，直到流量與噴灑狀態同時達到最佳條件。

注意：流經平衡器的海水樣品必須依靠重力自由排放。若排水管堵塞，可能造成量測誤差，甚至損壞設備。請確保排水管安裝正確且無阻塞。

3.4 初始設定 (Initial Configuration)

啟動 Underway PCO2.exe 程式並等待系統初始化。畫面將顯示設備連線與量測設定選項。

註：若軟體介面無法完整顯示於螢幕上，請開啟 Windows 顯示設定 (Display Settings)，將 Scale and Layout 調整為 125% 或 100%。

步驟 1：選擇系統中實際使用的感測器 (圖 11)。

- Aanderaa Dissolved Oxygen、Cyclops Chlorophyll 與 Weather Station 若有安裝，應設為 In Use。

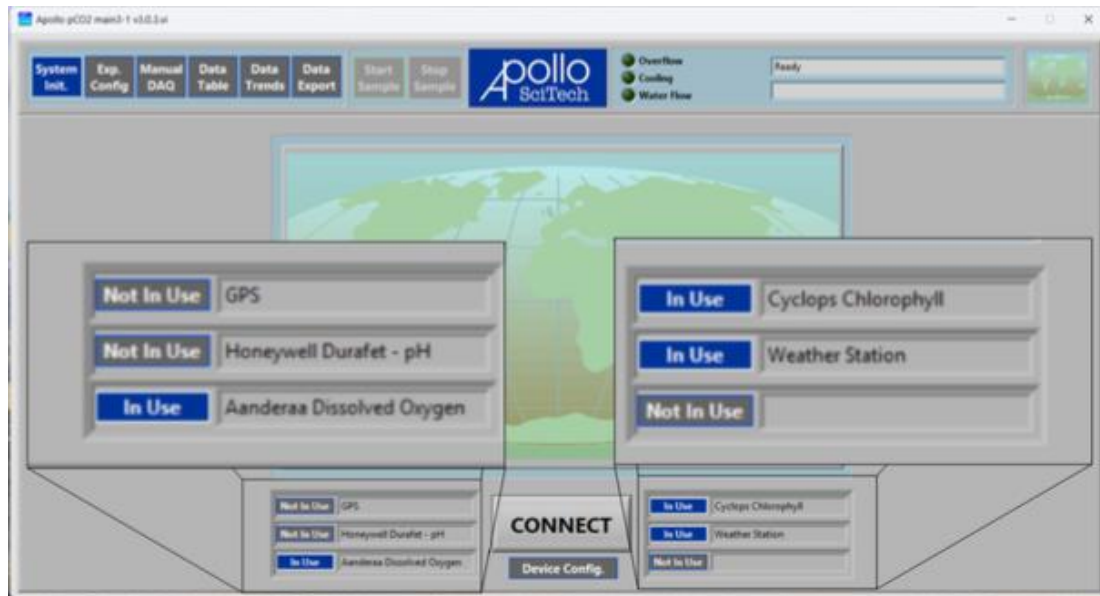


圖 11、系統初始化畫面，用於選擇啟用之感測器與設備，並建立系統通訊連線。

步驟 2：點選 Device Config 進行設備設定（圖 12）。

LI-COR Model：選擇 LI-7000 與 Picarro，並輸入設備 Hostname(位於序號標籤)。按下 Set 套用設定。

GPS Input：維持預設設定。GPS 資料由 Airmar Weather Station 提供，其餘 GPS 來源不支援。

Overflow Alarm：設定溢流警報條件。可選擇 1X 或 2X 作為警報觸發次數，並設定兩次檢查間隔時間。

Chlorophyll Sensor：若有購置葉綠素探針可輸入葉綠素感測器校正係數。預設值適用於大部分應用。

Peristaltic Pump：蠕動幫浦用於排除冷凝器積水。Interval (mins) 為停機時間；Pump ON (mins) 為運轉時間。預設設定通常已足夠。

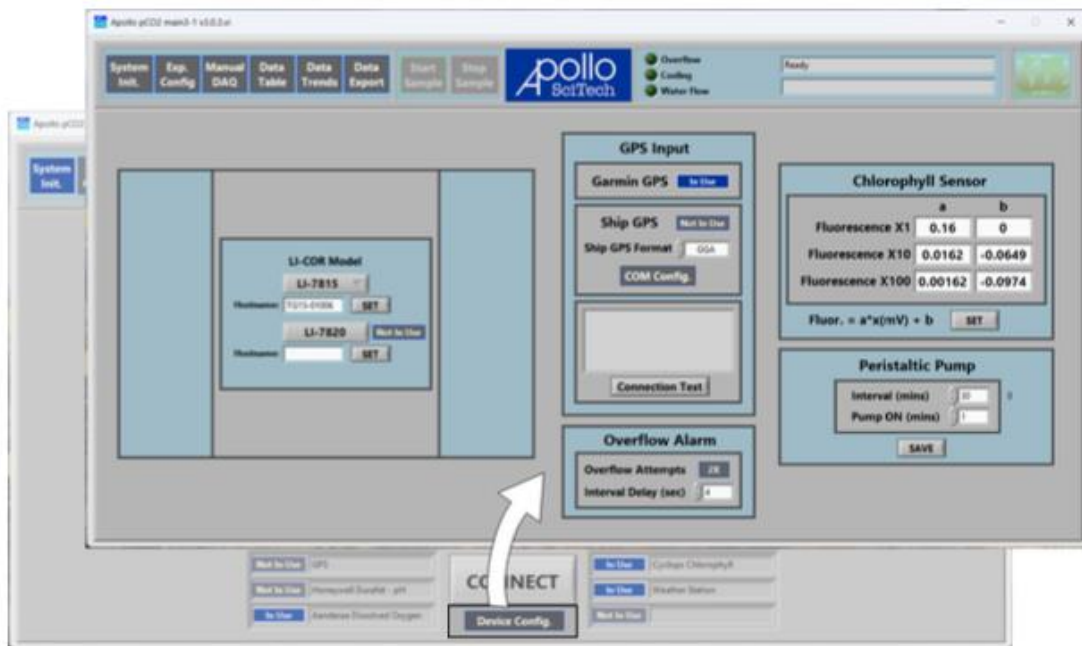


圖 12、Device Config（設備設定）畫面，用於設定氣體分析儀型號、GPS 資料來源、溢流警報條件、葉綠素感測器校正係數及蠕動幫浦運轉參數。

儲存設定：點選左上角之「System Init.」返回系統初始化畫面，系統將儲存目前設定。

建立設備連線：點選「Connect」按鈕以建立軟體與各設備之通訊連線。

系統將顯示各設備之運作狀態（Device Status）。若有設備顯示 Failed，請檢查：

- 通訊線路是否正確連接。
- 各設備電源是否正常供應。
- 氣體分析儀（Gas Analyzer）是否已開機並完成啟動程序。

若所有設備均顯示 **Passed**，表示系統已完成初始化設定，可開始進行量測（圖 13）。



圖 13、Instrument Status（設備狀態）畫面，顯示各設備初始化與通訊測試結果。

第四章、測量海水的 $p\text{CO}_2$ 程序

4.1 $p\text{CO}_2$ 量測程序

進入 Exp. Config 頁面後，輸入 Project、Operator 與 Memo 等專案資訊。接著輸入各標準氣之 CO_2 濃度值。系統最多可設定五組標準氣，未使用之接口可保留空白，軟體將自動略過。完成後設定量測循環參數，包括大氣量測次數（Air Measurements）、海水量測次數（Seawater Measurements）、大氣與海水重複循環次數（Air-Seawater Repeats）以及整體循環次數（Cycle Repeats）（圖 14）。

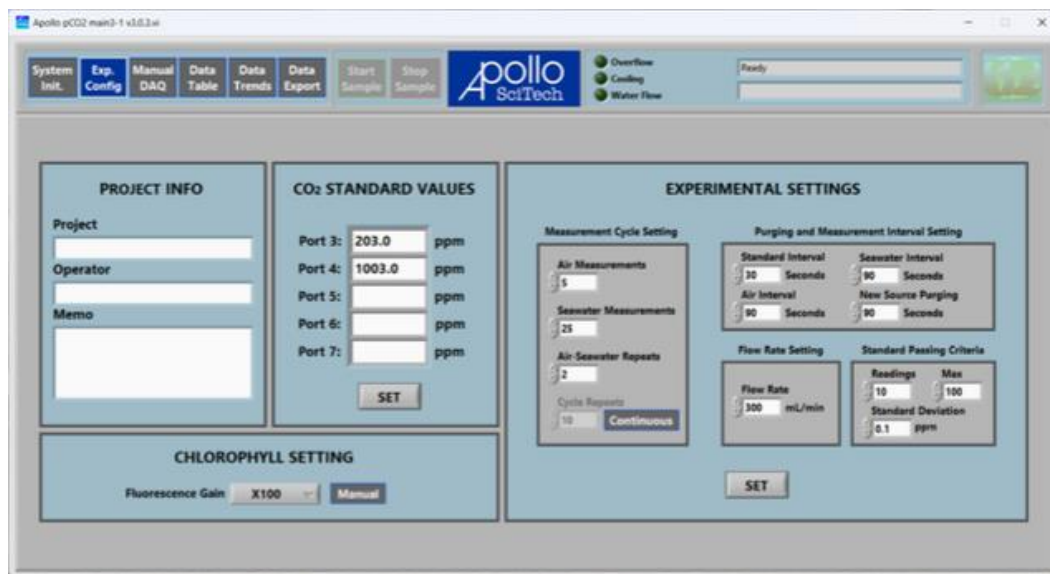


圖 14、Exp. Config（實驗設定）畫面。

系統量測程序首先進行標準氣校正。每組標準氣將持續量測，直到連續十筆資料之標準差小於 0.1 ppm 為止。若未達標準，系統將持續量測並計算最近十筆資料之移動平均值，直到符合條件或達到最大量測次數。所有標準氣完成校正後，系統依序進行大氣樣本量測與海水平衡氣量測。切換氣源時，系統將依設定之 Purging Time 自動沖洗管路，以確保前一氣源完全排除。

量測期間系統將持續監測溢流警報（Overflow）、冷卻系統警報（Cooling）及供水流量警報（Water Flow）。當警報指示燈呈綠色時表示系統正常運作；若顯示紅色則表示發生異常，需立即進行檢查。

4.2 量測結束與關機

完成量測後按下 Stop Sample 停止量測程序。系統將完成當前量測循環後自動停止。停止量測後，應使用去離子水（DI Water）沖洗系統數分鐘，以去除殘留海水及鹽分。接著開啟排水閥，排空葉綠素感測器與溶氧感測器管路內殘留之水體。完成排水後，關閉 LI-5405A 主機及分析儀電源。長期存放期間應拔除所有電源線，並依分析儀原廠手冊進行保存作業。

第五章、測量資料檢視與處理

本章說明量測資料之檢視、匯出及後處理流程。海上觀測期間，研究人員可透過 Data Table 與 Data Trends 即時監控量測結果，以確認儀器運作正常及資料品質；完成航次後，再進行資料匯出、CO₂ 校正及 pCO₂ 計算等後處理工作。

5.1 檢視近期量測資料

於海上觀測或在實驗室中可點選 **Data Table** 按鈕即可開啟近期量測資料表。

若系統仍持續進行量測，介面右上角之狀態欄（Status）將顯示目前執行之量測步驟及倒數計時。

若需調整資料表中顯示之量測參數或變更欄位排列順序，可點選畫面右下角之齒輪圖示（Gear）進入設定。使用者可依需求篩選欲顯示之參數，並調整各欄位之排列順序（如圖 15 所示）。

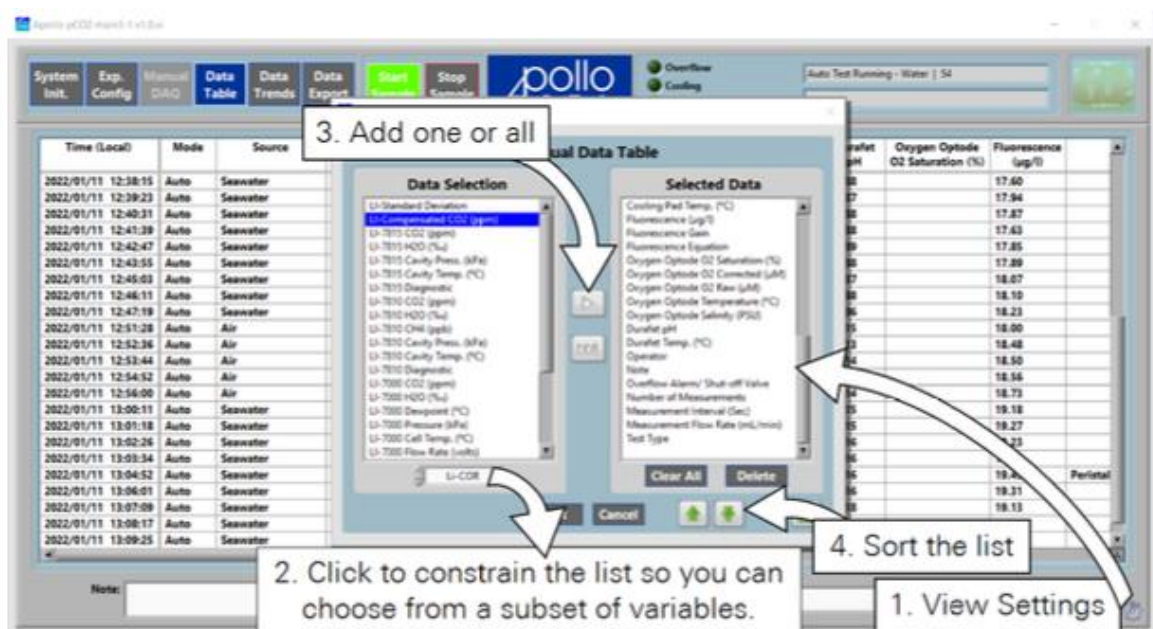


圖 15、資料表欄位設定。

5.2 檢視量測趨勢圖

在觀測期間可點選 **Data Trends** 按鈕即可開啟量測資料趨勢圖，便可快速比較數據，有助於科學家對於數據有更好的解讀與判斷。

於各圖表視窗中，首先由資料檔清單選擇欲檢視之資料檔（可選擇目前量測資料或歷史資料），再於下拉式選單中選擇欲繪製之量測參數。所選資料檔之日期、時間及專案名稱（Project Title）將顯示於畫面中（如圖 16 所示）。

當選擇目前正在量測之資料檔時，系統將於新增量測資料後自動更新圖形內容，無須重新整理。

圖形之 X 軸與 Y 軸預設皆啟用自動縮放（Auto-scale）功能。若需自行設定座標範圍，可於圖形上按滑鼠右鍵，取消 **Auto-scale** 選項後，再輸入所需之座標範圍；亦可利用圖表右下角內建之縮放（Zoom）及拖曳（Drag）功能調整顯示範圍。

若需設定圖表可供選擇之量測設備，可點選畫面左下角之齒輪圖示（Gear）進入設備設定。凡於設備清單中標示為深綠色之設備，其量測參數將不會出現在圖表參數選單中，亦無法選取進行繪圖。

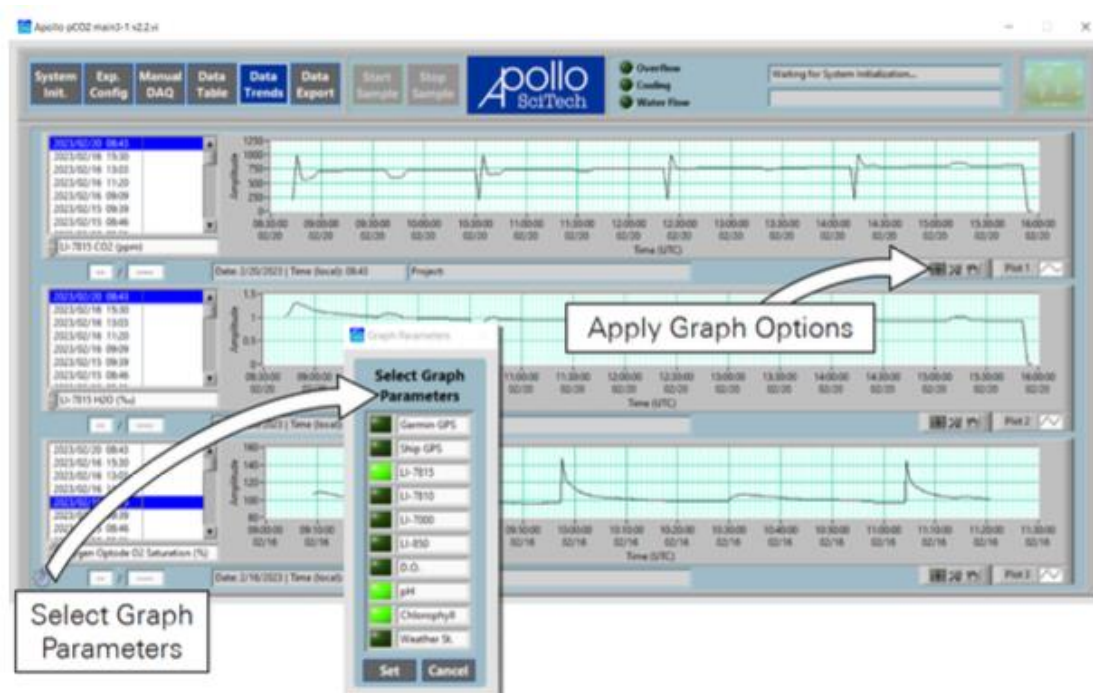


圖 16、資料趨勢畫面。

5.3 匯出量測資料 (Exporting Data)

所有量測資料檔皆依建立日期與時間排序，並於右側欄位顯示各資料檔所屬之專案名稱 (Project Title)。本頁面可瀏覽系統內所有歷史量測資料。

點選畫面右下角之藍色設定圖示，可進一步設定資料顯示方式，包括篩選顯示條件、選擇顯示欄位及調整資料排列順序（如圖 17 所示）。

5.4 匯出資料

1. 點選 **Export File**，開啟資料匯出設定畫面。
2. 於 **Select Export Data**（選擇匯出資料）中，選擇欲匯出之資料內容。
 - 選擇 **ALL** 可匯出所有量測參數。
 - 或由下拉式選單選擇特定設備，僅匯出該設備之量測參數。
 - 點選 **Add** 可勾選該設備所有量測參數；點選 **Remove** 則可取消勾選。
 - 已勾選之參數將作為匯出 CSV 檔案之資料欄位。
3. 於 **Select Export Files**（選擇匯出檔案）中，選擇欲匯出之資料檔。
 - 按住 **Shift** 並點選滑鼠，可選取連續多個檔案。
 - 按住 **Ctrl** 並點選滑鼠，可選取不連續之多個檔案。
4. 於 **Folder Path**（儲存路徑）中，指定匯出檔案之儲存位置。
5. 點選 **Export** 開始匯出所選資料檔，系統將依設定內容輸出為 **CSV** 格式，以供後續資料分析與處理。

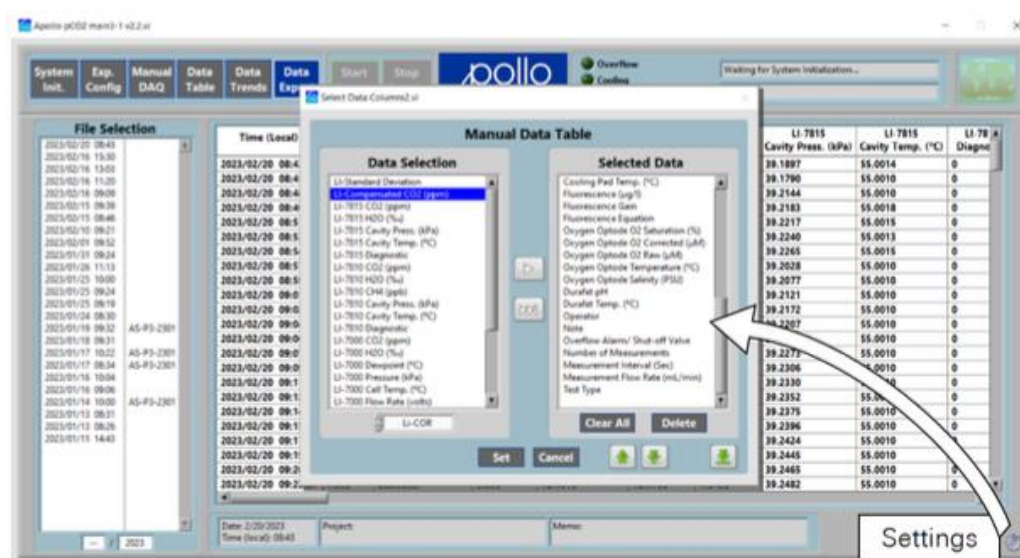


圖 17、資料匯出設定畫面。

5.5 由量測 CO₂ 計算校正後 pCO₂

資料檔中 Compensated CO₂ (ppm) 欄位所顯示之數值，係依據標準氣校正後所得之 pCO₂ 濃度。

氣體分析儀所量測之 xCO₂ (即乾燥樣品氣體中海水、大氣或標準氣之 CO₂ 莫耳分率，單位為 ppm)，必須利用標準氣實際量測值進行校正，以提高量測準確度。

為獲得最佳校正效果，建議使用之標準氣濃度範圍應涵蓋所有待測樣品之 pCO₂ 範圍。

公式 (4-1) 利用各標準氣之實際濃度 (S₁、S₂、S₃.....) 及分析儀量測濃度 (R₁、R₂、R₃.....)，將原始量測值校正為實際 CO₂ 濃度。

$$\text{Corrected } xCO_2 = (Raw - R1) \times \frac{(S2-S1)}{(R2-R1)} + S1 \quad 4-1$$

其中：

Corrected xCO₂: 校正後之 CO₂ 莫耳分率 (ppm)

Raw: 分析儀原始量測值

S: 標準氣真實 CO₂ 濃度

R: 分析儀量測之標準氣 CO₂ 濃度

校正範例

假設系統量測三組標準氣及兩組樣品，其量測結果如表 4-1 所示。

Table 4-1. Standards and sample gases.

Source	Standard xCO ₂	CO ₂ reading	Calibrated Sample CO ₂
Standard 1	S1 = 200	R1 = 202.1	
Standard 2	S2 = 360	R2 = 362.0	
Standard 3	S3 = 550	R3 = 551.3	
Equilibrator		Raw 1 = 350.7	(348.7)
Air		Raw 2 = 386.4	(384.5)

若平衡器樣品之原始 CO₂ 濃度為 350.7 ppm，其濃度介於第一組 (S₁) 與第二組 (S₂) 標準氣之間，因此代入公式 (4-1) 即可得到：

$$\text{Corrected } xCO_2 = (350.7 - 202.1) \times \frac{(360-200)}{(362.0-202.1)} + 200 = 348.7 \quad 4-2$$

校正後之 CO₂ 濃度為 348.7 ppm。

若大氣樣品之原始 CO₂ 濃度為 386.4 ppm，其濃度介於第二組 (S₂) 與第三組 (S₃) 標準氣之間，因此利用第二與第三組標準氣進行校正，可得：

$$\text{Corrected } xCO_2 = (386.4 - 362.0) \times \frac{(550-360)}{(551.3-362.0)} + 360 = 384.5 \quad 4-3$$

校正後之 CO₂ 濃度為 384.5 ppm。

5.6 將 xCO₂ 換算為 100% 相對濕度之 pCO₂

平衡器內海水於平衡溫度下之 CO₂ 分壓 pCO₂(eq) (μatm) 可利用下式計算：

$$pCO_2(\text{eq}) = xCO_2(\text{water}) \times [P_b(\text{eq}) - P_w(\text{eq})] \quad 4-4$$

其中：

xCO₂(water)：分析儀量測並校正後之乾燥樣品氣體 CO₂ 莫耳分率 (ppm)

P_b(eq)：平衡器內之大氣壓力 (atm)

P_w(eq)：平衡器內之水氣壓 (atm)

P_w(eq)可依據平衡器之鹽度及溫度計算而得。本系統假設平衡器內海水之鹽度與溫度與 SBE 45 所量測之數值相同。雖然平衡器內部亦裝設溫度計，但其校正精度不及 SBE 45，因此建議以 SBE 45 所測得之溫度作為計算依據。

此外，大氣 xCO₂ 建議每 2 至 4 小時量測一次。大氣 CO₂ 分壓 pCO₂(air) (μatm) 則依下式計算：

$$pCO_2(\text{air}) = xCO_2(\text{air}) \times [P_b(\text{sea surface}) - P_w(\text{sea surface})] \quad 4-5$$

其中：

xCO₂(air)：乾燥大氣樣品之 CO₂ 莫耳分率 (ppm)

P_b(sea surface)：海表大氣壓力 (atm)

P_w(sea surface)：海表水氣壓 (atm)

海表水氣壓可依據船舶進水口所量測之海水溫度及鹽度計算。若使用小型船舶，亦可直接採用 SBE 45 所量測之溫度及鹽度資料。

第六章、故障排除

系統漏水 (Water Leaking)

水路接頭鬆脫

若可辨識漏水位置，請檢查並鎖緊漏水接頭。

必要時可使用工具協助鎖固，但建議先以手動方式鎖緊，以避免過度鎖固造成零件損壞。

電腦滑鼠游標自行移動 (Computer Mouse Cursor Moves on Its Own)

電腦誤判 GPS 裝置

在連接 Airmar 氣象站後，若發現滑鼠游標自行漂移或隨機移動，表示電腦可能誤將 GPS 接收器辨識為滑鼠裝置。

處理方式如下：

暫時拔除 GPS 接收器。

開啟 Windows「裝置管理員 (Device Manager)」。

展開「滑鼠與其他指標裝置 (Mice and Other Pointing Devices)」。

找到 GPS 裝置並停用。

重新連接 GPS 接收器。

完成後即可恢復正常操作。

軟體無法辨識設備 (The Program Does Not Recognize Connected Devices)

通訊線路是否正確連接

請確認：

網路線 (Ethernet Cable) 連接正常。

USB 傳輸線連接正常。

各接頭已完全插入且固定。

必要時重新插拔並重新啟動軟體。

警報觸發 (Alarm Triggered)

進水流量過高

若平衡器 (Equilibrator) 內部水位過高，請降低進水流量。

系統建議操作條件如下：

水流量：2.5–5 L min⁻¹

建議流量：3.5 L min⁻¹

水壓：約 60 psi (4.14 bar)

排水受阻

檢查排水管路是否存在阻塞、折曲、壓扁。

排水不順

排水出口必須低於儀器本體，使排水可依靠重力自然流出。

若冷凝器內部有積水現象：

進入 Manual DAQ 頁面。

手動啟動 Peristaltic Pump。

確認所有蠕動幫浦均正常運轉以及蠕動幫浦運轉頻率是否過低。

必要時可縮短幫浦啟動間隔。

冷卻系統運作異常 (Cooling System Does Not Work Properly)

環境溫度過高

若工作空間溫度過高：

開啟門窗增加通風。

啟動空調系統。

降低環境溫度。

Peltier 冷卻器異常

檢查系統後方冷卻風扇是否正常運轉。

同時確認：

散熱鰭片無灰塵堆積。

無異物阻礙風扇轉動。

或者冷卻板失效。

必要時清除異物或更換冷卻板以恢復冷卻功能。

標準氣量測無法通過判定條件 (Reference Gas Measurements Cannot Meet Passing Criteria)

接頭漏氣

檢查標準氣體連接之壓縮接頭 (Compression Fittings)。

必要時適度鎖緊。

標準氣壓力不足？

確認供氣壓力約為：

15 psi (約 1 atm)

若壓力過低，將無法正常開啟質量流量控制器 (Mass Flow Controller)。

請確認：

減壓閥已開啟。

標準氣流量可提供約 100 mL min^{-1} 。

標準氣壓力穩定且無明顯波動。

若供氣不足，可能導致外界空氣混入標準氣測量流程，造成量測失敗。

CO₂ 分析儀尚未初始化或運作異常

確認分析儀：

已完成暖機程序。

無任何錯誤訊息。

測值穩定。

若分析儀訊號不穩定，將造成量測標準差過大而無法通過判定條件。

若必須繼續量測，可暫時於 Exp. Config 頁面放寬允許之標準差條件，但建議後續進一步排除分析儀問題。

海水 pCO₂ 測量時氣體流量過低 (Gas Flow Rate Too Low on Water pCO₂ Measurement)

氣體管路阻塞或漏氣

請依下列步驟檢查：

進入 Manual DAQ 頁面。

將閥位設定為 Port 2。

啟動 Sample Pump。

設定流量為 100 mL min^{-1} 。

正常情況下，質量流量控制器 (MFC) 讀值應接近 100 mL min^{-1} 。

若讀值明顯低於設定值，表示系統可能存在異常。

請檢查：

氣體管路內是否有積水。

蠕動幫浦是否能正常運作。

管路內是否有結冰現象。

管線接頭是否鬆脫。

管線或接頭是否破損造成漏氣。

參考文獻

Pierrot, D., Neill, C., Sullivan, K., Castle, R., Wanninkhof, R., Luger, H., ... Cosca, C. E. (2009). Recommendations for autonomous underway pCO₂ measuring systems and data-reduction routines. *Deep-Sea Research II*, 56, 512–522.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.005>