

出國報告（出國類別：開會）

參加「第 34 屆土壤、水、能源和空氣 國際研討會」出國報告

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：王騏瑋 環境保護師

派赴國家：美國

出國期間：114 年 03 月 17 日至 03 月 23 日

報告日期：114 年 04 月 10 日

摘要

環境健康與科學協會(The Association for Environmental Health and Sciences, AEHS)成立於 1990 年，多年來 AEHS 為 600 多名會員、業界專家、研究人員及政府機構提供了一個國際交流平台，促進資訊共享並提升對環境問題的認識。AEHS 探討的環保議題觸及地質、化學、生物、工程與政府法令等領域。

AEHS 每年於美國西岸和東岸各舉辦一場大型國際研討會。本次出國計畫是出席在美國聖地牙哥舉辦之第 34 屆土壤、水、能源和空氣國際研討會(34th Annual International Conference on Soil, Water, Energy, and Air)。本研討會共有 7 個工作坊(Workshop)及 17 個發表主題。本次出國主要目的是蒐集油品污染鑑識、氣相層析/穩定同位素比值質譜儀在環境領域之應用以及環境污染調查及分析等議題之資訊，並且發表一篇海報論文「Application of Mobile Laboratory for Petroleum Contamination Site」。期望透過參與國際研討會，了解最新研究發展趨勢，並學習國外專家的經驗，有助於推動本公司研發相關技術之能力。

目次

摘要	1
壹、目的	3
貳、過程	4
參、具體成效	10
肆、心得與建議	24

壹、目的

國內營業中加油站與地下儲油槽數量可觀，而油品操作場所產生之土壤及地下水污染問題，一直是環保主管機關關切的議題。本公司擁有為數眾多的加油站、供油中心、儲槽與輸油管線，因此油品洩漏之預防和監測工作相當重要，以降低污染事件發生之風險。為因應日益嚴峻的環境保護要求，提升企業責任，台灣中油公司探採研究所，多年來積極研究發展油品污染調查、分析與整治技術。本次出國參加第 34 屆土壤、水、能源和空氣國際研討會(34th Annual International Conference on Soil, Water, Energy, and Air)，期望精進相關實務及研發能力。

環境健康與科學協會(The Association for Environmental Health and Sciences, AEHS)成立於 1990 年，是一個非營利、會員支持的組織。該協會之宗旨是促進專業人士間的交流與合作，關注於水、土壤和底泥之調查、整治及保護方面之議題。多年來，AEHS 為 600 多名會員、業界專家、研究人員及政府機構提供了一個國際交流平台，促進資訊共享並提升對環境問題的認識。自 2009 年起，AEHS 每年於美國西岸與東岸各舉辦一場國際研討會，探討與地質、化學、生物、工程與政府法令等相關環保議題。

本次出國計畫目的是蒐集油品污染鑑識、氣相層析/穩定同位素比值質譜儀在環境領域之應用以及環境污染調查及分析等議題之資訊，並且發表一篇海報論文「Application of Mobile Laboratory for Petroleum Contamination Site」。期望透過參與國際研討會，了解最新研究發展趨勢，並學習國外專家的經驗，有助於推動本公司研發相關技術之能力。

貳、過程

本次出國詳細行程如表 1 所示，共為期 7 天。114 年 3 月 17 日從桃園機場搭機至美國加州聖地牙哥，18 日至 20 日參加第 34 屆土壤、水、能源和空氣國際研討會。此研討會固定於每年 3 月在密申谷(Mission valley)的希爾頓逸林酒店(DoubleTree by Hilton)舉行。酒店位置距離聖地牙哥國際機場僅 8 英里，車程 20 分鐘內。雖然酒店不位在市中心，但是附近有電車站，若非下榻該酒店，可利用電車通勤往返，下車後僅需步行 2 分鐘即可抵達酒店。主辦方亦有提供與會者該酒店優惠碼，能在報名後以較便宜的價格入住酒店，如此可節省許多通勤時間，提升參與會議之效率。

表 1 出國行程

日期	地點	工作內容
3/17	台北-美國聖地牙哥	啟程
3/18-3/20	美國聖地牙哥	參加第 34 屆土壤、水、能源和空氣國際研討會
3/21-3/23	美國聖地牙哥-台北	返程

會場地圖如圖 1 所示，位於酒店 1 樓，場地中間區域為廠商展覽區，空間相當寬廣。會議室位在後面和側邊，而海報張貼區域則在前往會議室的走廊上。整體空間規畫相當良好，不會顯得太過擁擠。研討會主要分四個部分同時或分時段進行。第一部分為口頭報告，共有 17 個議題，每個簡報時間(含討論)共 30 分鐘。第二部分是海報發表，分別在 3/18 和 3/19 這 2 天的下午 3 點至 6 點進行，總共將

近 70 篇海報。第三部分是廠商展覽，包含環境顧問公司、檢測業者及鑽井公司等，在現場向與會者介紹其產品或技術服務，並就專業知識及經驗進行交流，洽談商業合作機會。第四部分是工作坊，會議期間共有 7 場，為付費參加。這次主辦方讓所有與會者註冊時可選擇 1 場免費聆聽。

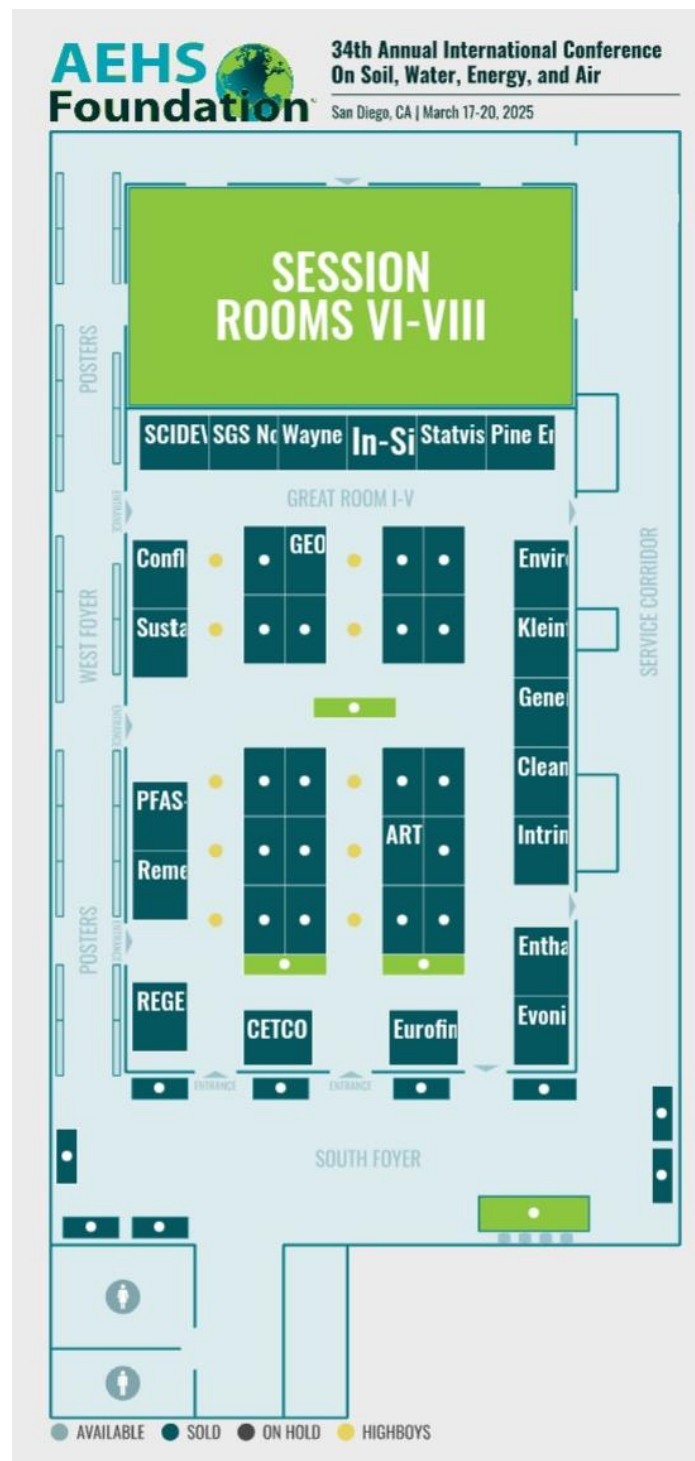


圖 1 會場地圖

主辦方有提供免費手機 APP，讓參加會議者下載使用(如圖 2)。在研討會期間，透過 APP 可取得演講資訊和及時公告資訊，並可讓與會者選取有興趣之議題，安排行程，在場次開始前 APP 會發送訊息通知與會者，避免錯過時間，對與會者來說是相當便利且有效的工具。

會議的議程如表 2。本次研討會論文發表的主題可區分為九大類，條列如下：

- (1) Sustainable remediation
- (2) Groundwater reuse
- (3) Regular program and policies
- (4) Site investigation
- (5) Risk assessment
- (6) Bioremediation
- (7) Emerging contaminants
- (8) Environmental forensics
- (9) Vapor intrusion

此研討會並無開幕與閉幕的演講或儀式，直接進行論文發表議程。在這次研討會中，不論是環境鑑識、污染調查或風險評估，這些議題討論的污染物主要是含氯有機物和全氟及多氟烷基物質(Per-and polyfluoroalkyl substances, PFAS)，僅有少數發表與油品和重金屬污染有關，這顯示近年來在學術研究和現場工程實務上，以含氯有機物和 PFAS 為較熱門的研究方向。在此研討會，有 4 個主題圍繞蒸氣入侵(Vapor intrusion, VI)。蒸氣入侵關注的污染物包含石油碳氫化合物和含氯有機物，不過此研討會大多數發表內容均是與含氯有機物有關，這顯示在國外這個議題受

到相當大的重視，對人類有較高的健康風險。

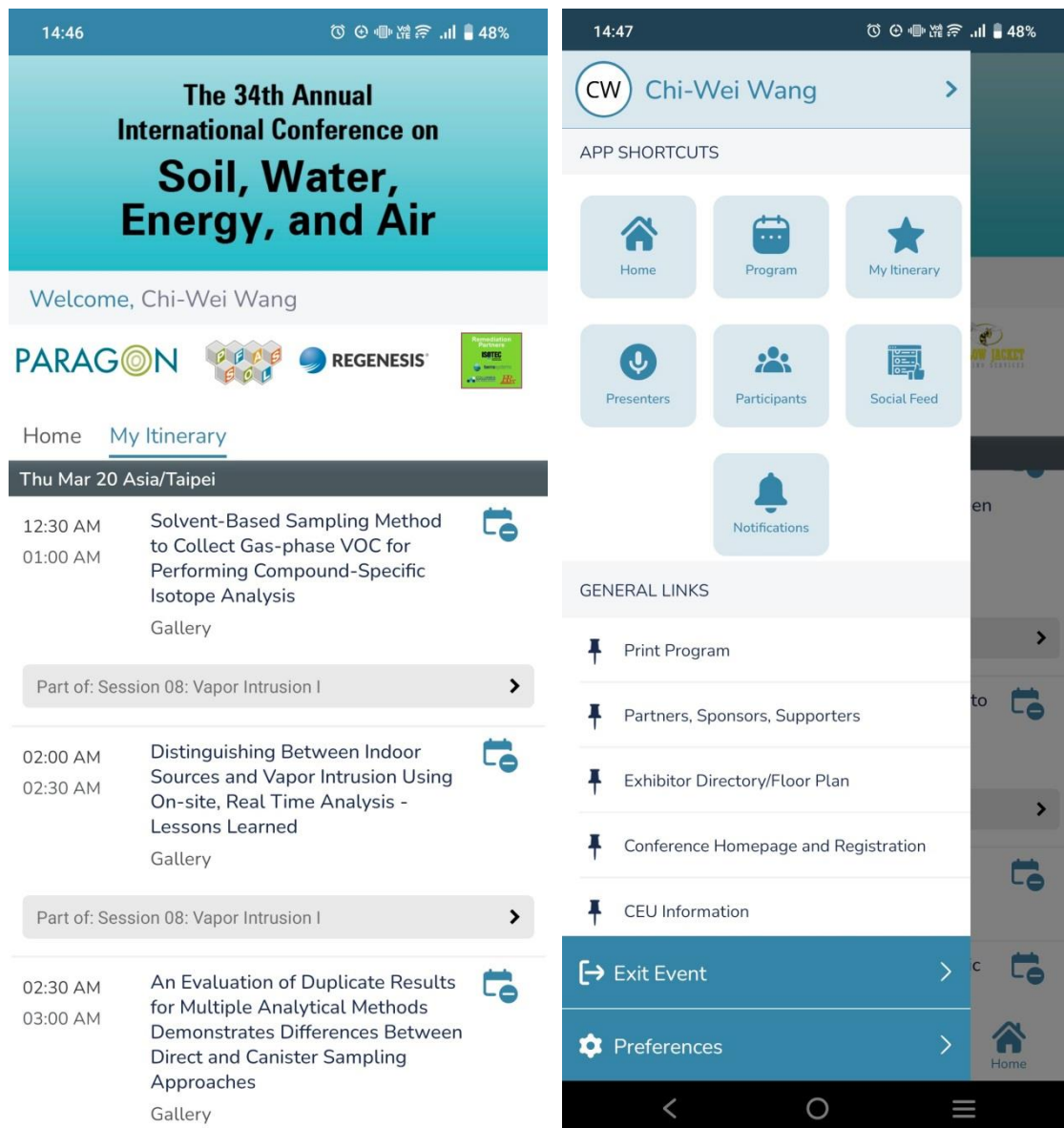


圖 2 研討會手機應用程式畫面

表 2 會議議程

日期	時間	議程
Monday March 17, 2025	1:00 PM - 4:00 PM	Workshop 01: PFAS - The Latest Information
	1:00 PM - 5:00 PM	Workshop 02: Extraction and Injection Methods for Chlorinated and Recalcitrant Compounds: Applications and Enhancements for Groundwater and Soil Remediation
	1:00 PM - 5:00 PM	Workshop 03: ITRC Guidance Document: Implementing Advanced Site Characterization Tools and Recent Updates
Tuesday March 18, 2025	8:30 AM - 12:00 PM	Session 01: Sustainable Remediation
	8:30 AM - 5:00 PM	Workshop 04: Evaluating Alternative Vapor Intrusion Strategies through Simulations Using Data-Rich Case Studies
	9:00 AM - 12:00 PM	Session 02: Integration of Remedial Strategy with Groundwater Reuse
	1:30 PM - 3:00 PM	Session 03: Ongoing Topics in Sustainable Remediation
	1:30 PM - 5:00 PM	Session 04: Remediation
	1:30 PM - 5:30 PM	Session 05: Regulatory Programs and Policies
	6:30 PM - 9:30 PM	Workshop 05: Advances in Applications, Techniques, and Interpretation in the Field of Environmental Forensics Workshop 06: Regulatory Perspectives on Vapor Intrusion
Wednesday March 19, 2025	8:30 AM - 12:00 PM	Session 06: PFAS Site Assessment/Risk Assessment
	8:30 AM - 12:00 PM	Session 07: Vapor Intrusion I
	9:00 AM - 12:00 PM	Session 08: Improving Probabilities for Successful Remediation: Best Practices for Remedial Design and Implementation
	1:30 PM - 4:30 PM	Session 09: Environmental Forensics
	1:30 PM - 5:00 PM	Session 10: Emerging Contaminants
	1:30 PM - 5:00 PM	Session 11: Vapor Intrusion II
	1:30 PM - 5:00 PM	Session 12: PFAS Remediation/Destruction/Risk Reduction
	6:30 PM - 8:30 PM	Workshop 07: Compound-Specific Isotope Analysis (CSIA) as a Characterization Tool for Contaminated Sites
Thursday March 20, 2025	8:30 AM - 12:00 PM	Session 13: Site Investigation and Remediation
	8:30 AM - 12:00 PM	Session 14: PFAS Analytical and Forensics
	8:30 AM - 12:00 PM	Session 15: Innovative Remedial Technologies



圖 3 研討會報到櫃台



圖 4 展覽區一隅

參、具體成效

本次出國計畫目的是蒐集油品污染鑑識、氣相層析/穩定同位素比值質譜儀在環境領域之應用以及環境污染調查及分析等議題之資訊，並且發表一篇海報論文「Application of Mobile Laboratory for Petroleum Contamination Site」。透過參與國際研討會，了解最新的研究發展趨勢，並學習國外專家的經驗，有助於推動本公司研發相關技術之能力。另外也參加 2 場工作坊：「Advances in Applications, Techniques, and Interpretation in the Field of Environmental Forensics」和「Compound-Specific Isotope Analysis (CSIA) as a Characterization Tool for Contaminated Sites」，前者是關於環境鑑識技術及應用，後者則是 CSIA 技術在污染場址評估之應用，可深入了解相關技術的發展與應用。

一、蒸氣入侵(Vapor Intrusion, VI)

對蒸氣入侵建築物及其他封閉空間的認識，始於 1980 年代關注氬氣入侵所造成的危害。蒸氣入侵是指來自受污染土壤和/或地下水的揮發性化學物質的蒸氣遷移進入建築物內部(如圖 6 所示)，影響室內空氣品質。這種情況可能發生在住宅和商業建築中，特別是在具有工業活動歷史的地區。當室內和室外空氣之間存在壓力差時，可能發生蒸氣入侵。常見的遷移途徑包括地基裂縫、窗戶和門周圍的間隙、樓梯間、集水坑、管道等進入建築物的通道。這些氣態的化學物質包括：(1)揮發性有機化合物，如三氯乙烯、四氯乙烯、氯乙烯和苯；(2)半揮發性有機化合物，如萘；(3)汞蒸氣；(4)多氯聯苯和殺蟲劑。這些具揮發性的化學物質對室內空氣品質造成潛在威脅。它們可能的來源相當多樣，例如地下儲槽洩漏、加油站、新的或過往化學品洩漏、現有或過去的工廠運作以及乾洗店等。這些氣體可能在

住宅或有人居住的建築物內累積到足以影響到健康及安全的濃度。在氣體濃度較低的情況下，主要關注點在於，長期暴露對於這些較低濃度的化學物質，可能會帶來癌症或是慢性疾病之風險。因此，這已是污染場址衍伸出一個環境議題。

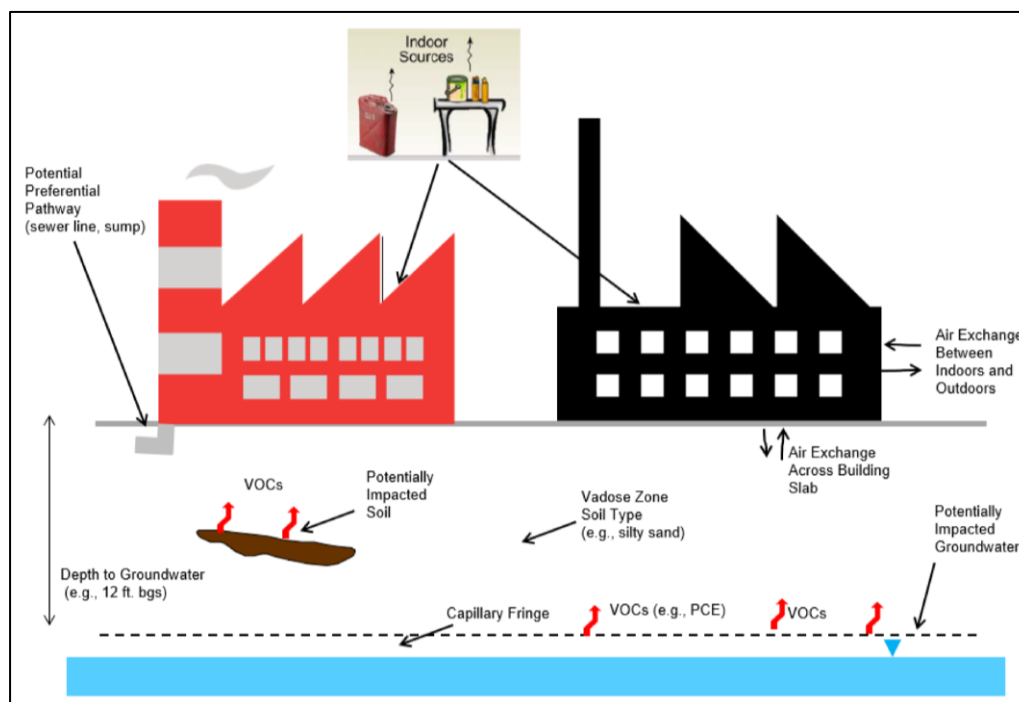


圖 6 蒸氣入侵場址概念模型

確認蒸氣入侵的一種方式是採取土壤、地下水、地板下土壤氣體和/或室內空氣的環境樣品。在美國，大多數州已建立或採用蒸氣入侵篩選標準，以確定污染的存在是否可能導致蒸氣入侵問題。評估蒸氣入侵的因素相當困難，其原因之一是建築物內部可能已經存在相同化學物質的來源，例如：家用溶劑、汽油和清潔劑等。這些物質單獨或與蒸氣入侵共同作用，都可能對人體健康構成重大風險。

當發現潛在問題時，環境顧問公司通常會進行地板下土壤氣體和室內空氣檢測。如果這些檢測顯示出潛在的化學成份，可能會進行模擬評估，以確定是否需要採取緩解措施。如果發現室內空氣問題或潛在風險較高，則會安裝緩解系統，這些措施通常包括地板下減壓系統、氣體屏障、密封地基中的裂縫和開口等。由

於緩解成本可以估算且相對低廉，一般許多業主的物業鄰近加油站、乾洗店或工廠，或是其地點過去曾有這些設施，會主動採取緩解措施。

在美國，此議題受到關注是因為蒸氣入侵會影響到居住安全與房地產買賣的價格。美國環境保護署明確要求，在購買房地產時，必須考慮蒸氣入侵問題，使物業所有者符合「超級基金法(Superfund Law)」的土地所有者責任保護資格。蒸氣入侵問題的存在，可能成為租戶提前終止租約的理由，影響租賃關係。蒸氣入侵也可能導致房產價值降低。此外，受蒸氣入侵影響的房產，可能貸款較為困難。因此，了解並積極應對蒸氣入侵問題，對於維護房地產價值和降低相關法律風險至關重要。

針對蒸氣入侵的調查，通常採取單點採樣方式，由於污染物並非在空間中均勻分布，且濃度會隨時間變化，因此需要有充足的採樣點位與頻採樣率，否則容易產生誤判。Vaporsafe 是一個提供揮發性有機物與氣味現場即時分析的服務公司，其服務已拓展至澳洲、歐洲和巴西。目前已完成超過 200 個案場的連續監測服務。透過現場數據即時上傳至網路，供專業人員遠端查看和判讀，能立即做出決策，通常一次出勤即可快速解決複雜的蒸氣入侵問題，降低業主的風險，並可節省其可觀的成本與時間。

該公司使用實驗室等級的氣相層析儀，並依據美國環保署 TO-14 方法產生定量數據。主要的高風險化合物可以在不到 10 分鐘內完成測量，1 天約可完成 150 次分析。針對揮發性含氯有機物，使用電子捕捉偵測器(Electron capture detector, ECD)作為氣相層析儀的偵測器，對這類化合物的偵測具有高靈敏度，偵測極限可達 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在案場，該公司會先採用人工現場取樣方式，確定熱點區域，再利用連續

監測方式觀察濃度變化並追溯污染物進入建築物的途徑，以利劃定土壤氣體污染範圍，如圖 7 所示。手動非連續採樣方式，係以氣密針吸取樣品，再手動進樣至氣相層析儀。以 1 天 8 小時的工作時間，預計可完成 40~50 個樣品分析。這個數量已能滿足數個建築物或是有許多房間的建築物的調查。而連續監測部分，其上限是同時對 16 個點位進行連續採樣、儀器自動分析。

Two Modes of Operation

<u>Discrete Sampling</u> • Manually collect samples at strategic locations & times • 30 to 50 analyses/day 	<u>Continuous Monitoring</u> • System runs unattended • <10 min/analysis • ~150 analyses/day 
---	---

We Often Combine the Two



圖 7 Vaporsafe 在案場所使用的分析方式

雖然室內空氣成份分析是最直接判斷蒸氣入侵影響程度的方式，但是在某些情況下，搭配穩定同位素比值分析，可輔助追溯蒸氣入侵的來源。這是因為室內空氣的 VOC 來源，不一定來自蒸氣入侵，也可能是建築物內存在的化學品。對各種來源的化學品，進行穩定同位素比值分析，再與室內氣體比對，藉此找出可能來源。存放於室內的各種清潔劑或黏著劑，都可能是產生 PCE 或 TCE 蒸氣的來源。圖 8 是這些 PCE 或 TCE 蒸氣之穩定碳及氯同位素比值所繪成的關聯圖。再與室內氣體和地下水中的 PCE 進行比對(圖 9)，推論 PCE 是來自室內的一種黏著劑。

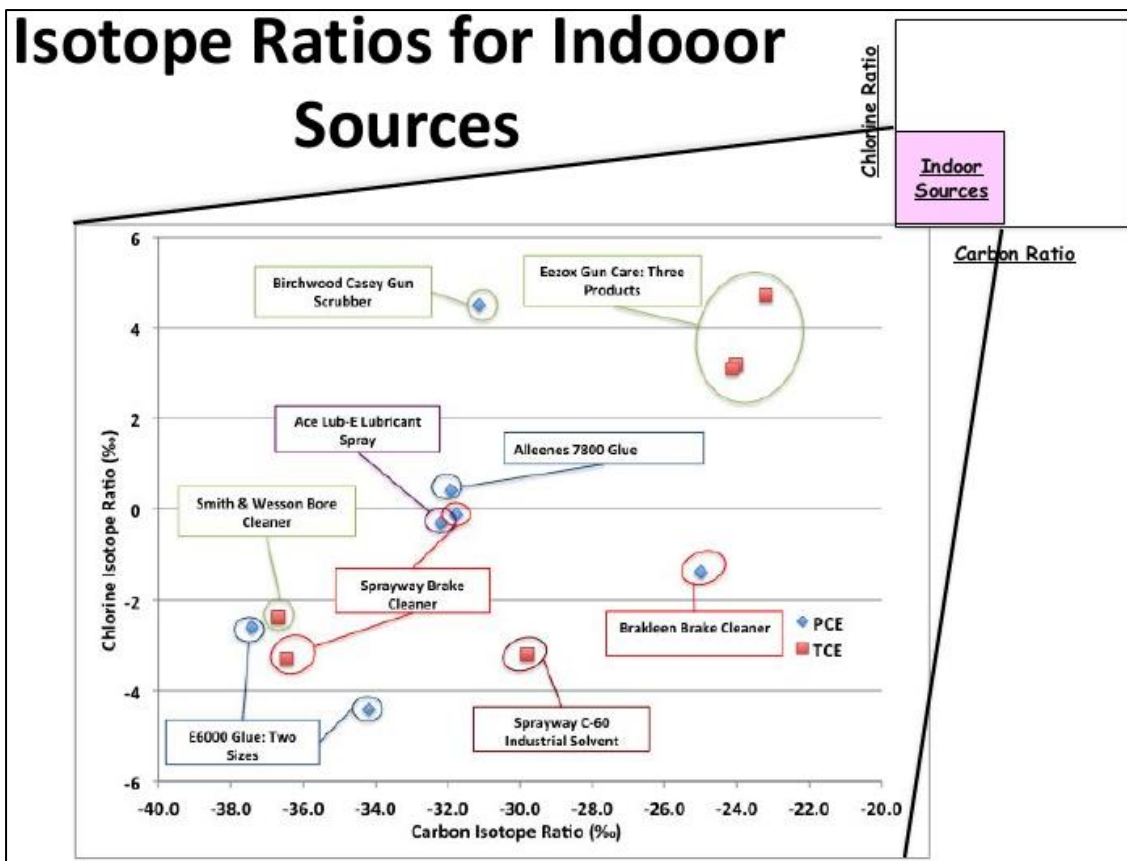


圖 8 運用穩定同位素比值於蒸氣入侵溯源鑑識案例

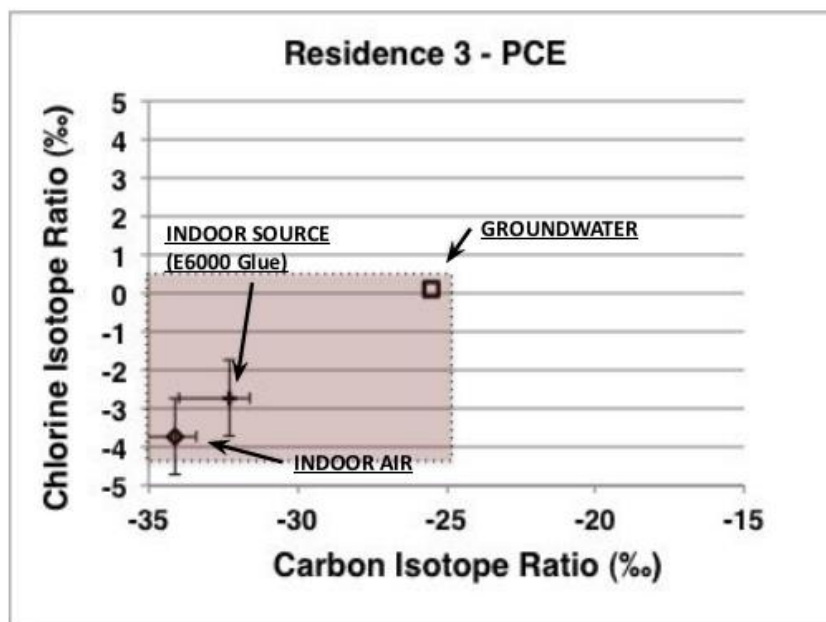


圖 9 室內氣體 PCE 來源鑑定結果

二、Workshop

「Advances in Applications, Techniques, and Interpretation in the Field of Environmental Forensics」講師為 Paul Philp，現為奧克拉荷馬大學榮譽退休教授，研究領域為地球化學與環境法醫，主要關注油氣、生油岩及污染物的成份及同位素分析，用於了解沉積環境、成熟度、生物降解作用與污染溯源等。「Compound-Specific Isotope Analysis (CSIA) as a Characterization Tool for Contaminated Sites」講師為 Daniel Bouchard，目前擔任 GHD 公司的現地復育和水文地質技術總監，參與許多需要深入探討污染物特徵分析的專案，以了解其來源、分佈和環境宿命，以利進行適當的現地復育工法。他已經從事特定化合物同位素分析(CSIA)方法研究超過 20 年，並作為顧問在多個專案中應用此方法。

環境法醫聚焦在找出污染行為人，其困難之處在於，自然界存在的物質與污染物混合，以及風化作用，改變污染物原本的樣貌。想要成功鑑別污染源，有幾個關鍵的要素：(1)利用各種儀器取得指紋圖譜；(2)多方蒐集場址背景資訊；(3)了解污染物的特性及其製程；(4)了解污染物風化後的樣貌。在環境鑑識，最常使用的分析儀器為 GC、LC、GC/MS、LC/MS、GC/IRMS、LC/IRMS、GC/ICPMS 和 EA/IRMS 等。這些技術已發展數十年，而應用這些儀器之目的，均是為了全面取得指紋圖譜，並與可能洩漏源進行比對。穩定同位素比值分析已經是一個例行性取得指紋圖譜的工具，可以互補傳統分析方法。然而這些鑑識分析方法，與 EPA 方法有極大的差距。EPA 方法取得的數據，在環境鑑識領域，是沒有太大的作用，但是許多人卻經常錯誤地引用。其原因在於 EPA 方法是用來監測特定化合物的濃度，而

且許多鑑識成份並不涵蓋其中，而且這些鑑識化合物可能含量甚微，但是在溯源鑑識上扮演重要角色。最常見的例子是 TPH 分析，不論是 GRO、DRO 或是 VPH，都是屬於 TPH 的一部份，僅顯現一部份碳數範圍的化合物，不能代表全貌，因此容易造成誤判(如圖 10)。在國外，認證實驗室出具的檢測報告通常只提供濃度，並不顯示層析圖譜，而濃度對於污染比對分析是毫無幫助。

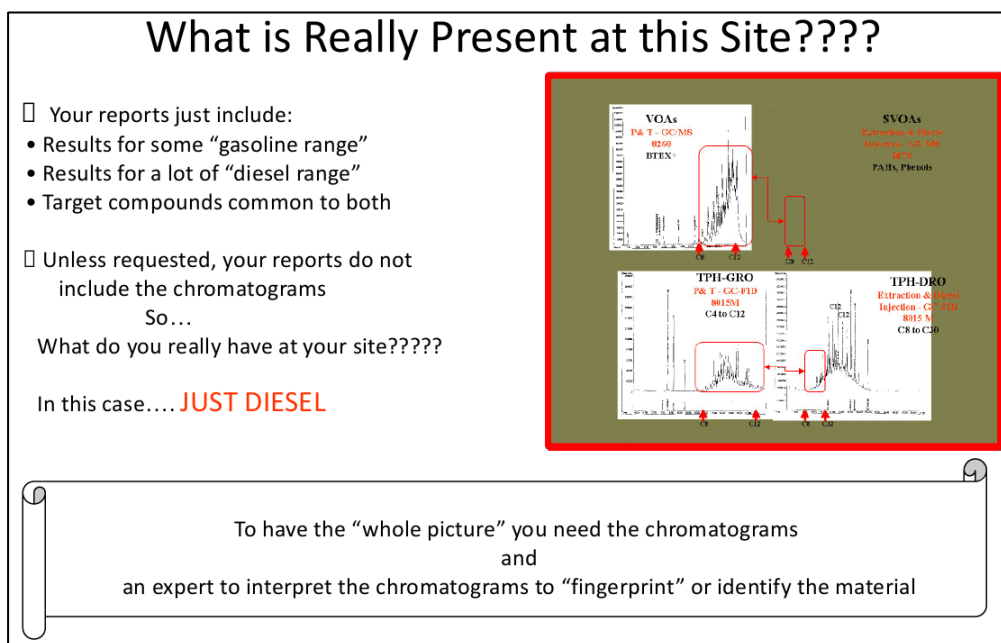


圖 10 油品鑑識必須取得指紋圖譜全貌

油品風化作用以揮發、溶解和生物降解為主，但是近幾年的研究指出，光氧化也有顯著效應。光氧化會產生各種酸、醇、過氧酸和環氧化合物等具有官能基的化合物，而且其中許多化合物可能更具有毒性。根據文獻指出，支鏈烷、取代基愈多的芳香烴、含硫脂肪族化合物較容易受到光氧化作用。

不同來源的汽油通常具有非常相似的層析圖譜，使得區分這些樣品變得困難。此外，汽油不含生物指標化合物，進一步限制溯源鑑識的可能性。雖然如此，利用汽油成份中不同化合物的比值，可能有助於區分不同的汽油，特別是當它們經由不同的煉油製程生產時。因此了解汽油生產過程，對於汽油鑑識至關重要。汽

油生產是一個複雜的過程。早期的汽油是直接蒸餾餾分，因此其圖譜容易與凝結油(Condensate)混淆。汽油是來自不同製程的混合物，例如：(1)輕直餾石腦油(Light straight run naphtha)，作為基礎成分。(2)烷化油(Alkylate)，含有支鏈烷烴，提高辛烷值(圖 11)。(3)重組油(Reformate)，富含芳香烴(圖 12)，提高辛烷值。(4)催化裂解油(Catalytic cracking)，將原油轉化為烯烴和芳香烴。

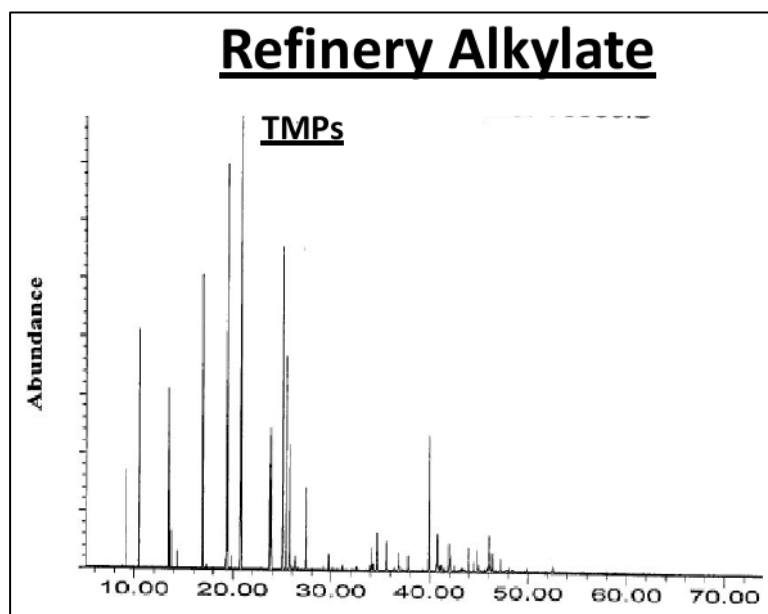


圖 11 烷化油氣相層析圖譜

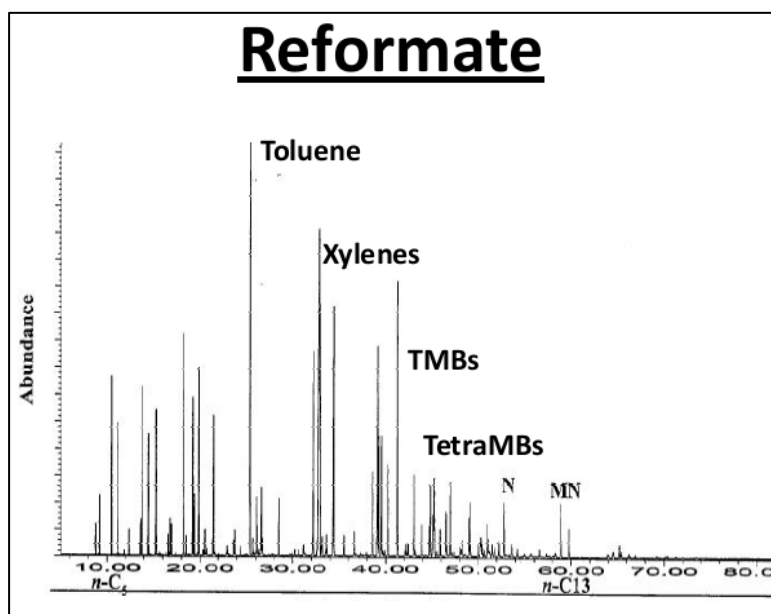


圖 12 重組油氣相層析圖譜

2,2,4-三甲基戊烷(iso-octane, 異辛烷)的辛烷值為 100，而正庚烷(n-heptane)的辛烷值為 0。汽油的辛烷值是透過引擎測量，並與異辛烷與正庚烷的混合物進行比較，以確定其抗爆震能力。該混合物中異辛烷的體積百分比即為燃料的辛烷值。不同化合物的組合 可能產生相同的辛烷值。90 %異辛烷加上 10 %正庚烷的混合燃料，其辛烷值為 90。不同煉廠生產相同辛烷值的汽油，其組成成份的相對含量也可能不同，如圖 13 所示。

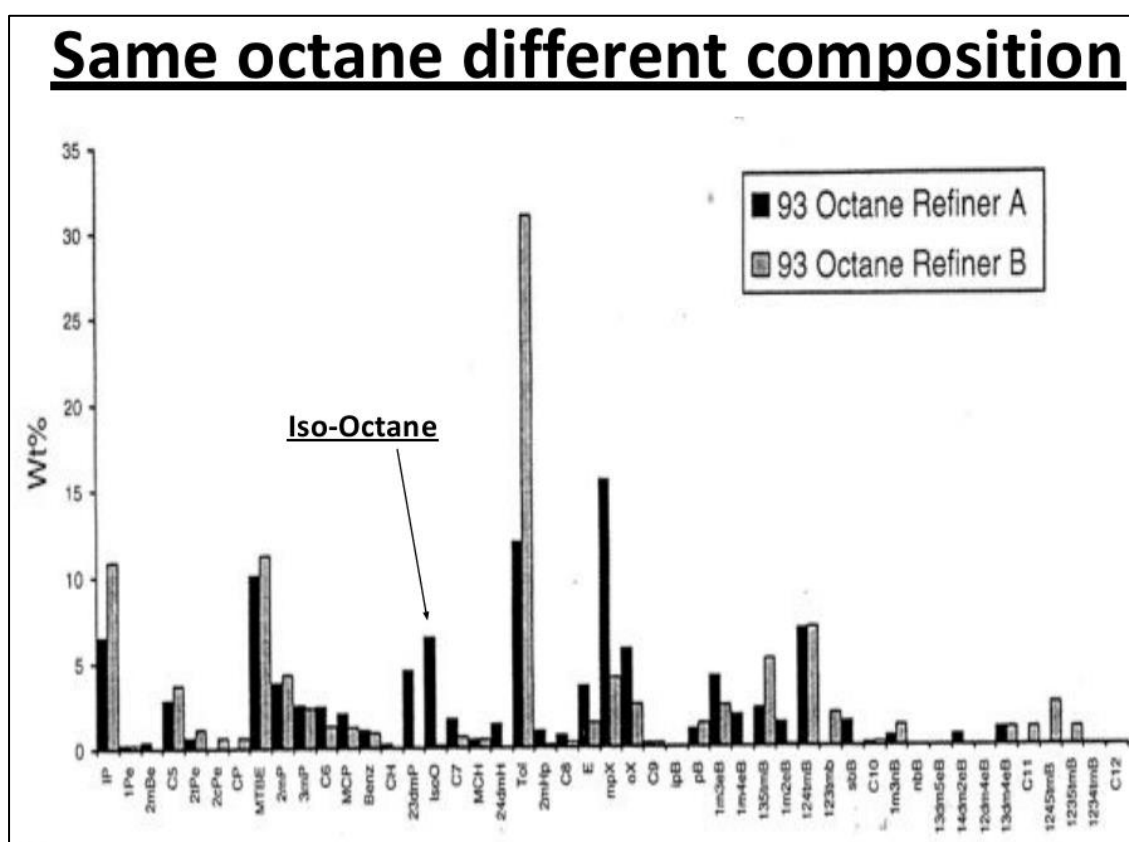


圖 13 相同辛烷值汽油中部份組成成份的相對含量

柴油與汽油不同之處在於含有生物標誌物。柴油通常是較直接的蒸餾餾分，其中某些化合物，特別是含硫化合物，會被去除。這是由於與硫含量相關的法規所致。這也意味著脫硫柴油在脫硫過程中會產生較高含量的萘烷(Decalins)。柴油通常以 $n\text{-C}_{10}$ 至 $n\text{-C}_{24}$ 範圍內的正烷烴為主，這些成份很容易透過自然衰減過程而逐漸消失。

幾乎所有的有機污染物都源自化石燃料(石油、天然氣、煤炭)。**化石燃料**中的碳來源於大氣中的 CO_2 ，而氫主要來源於 H_2O 。在光合作用過程中，發生同位素分餾，較輕的同位素更易被優先吸收。光合作用過程中分餾的程度取決於多個因素，例如：海洋或陸生環境、 C_3 植物與 C_4 植物類型、溫度、日照強度與水深等。由於物種的不斷多樣化，地質年代以來同位素組成發生了變化。 CO_2 的同位素值變得更重，這是因為較輕的 CO_2 被優先吸收，因此，原油的同位素比值也相應變得更重。

在1980年代初期，氣相層譜/穩定同位素比質譜儀(GC/IRMS)成為商業化儀器，可分析化合物的穩定同位素比值，在污染溯源和自然衰減監測扮演相當重要的角色。穩定同位素比值可用於鑑識分析，是因為分化作用(Fractionation)會造成數值差異。分化作用包含兩種機制：Equilibrium isotope effect 和 Kinetic isotope effect。Equilibrium isotope effect 指在化學平衡條件下，不同同位素在兩相(如液-氣、固-液)之間分佈不同，主要受到鍵振動頻率和熱力學因素影響。例如在水-蒸氣系統中，較輕的同位素(^1H 、 ^{16}O)更容易留在液態水中，因為 $^{18}\text{O}-\text{H}$ 鍵比 $^{16}\text{O}-\text{H}$ 鍵更強，需要更多能量才能進入氣相，所以會傾向存在於蒸氣相中。Kinetic isotope effect 發生在不可逆反應中，由於較輕的同位素之間鍵能較弱，容易斷鍵，因此產物會富集較輕的同位素富集。

經過 30 年的發展，針對特定化合物的穩定同位素比值分析(CSIA)的技術已相當成熟，可用來獲取傳統濃度分析無法揭露的關鍵資訊，除了可作為輔助判斷的環境法醫鑑識工具，鑑別污染源(圖 14)，也可用於監測污染物的去除過程。透過穩定同位素比值分析(如 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 、 $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$)，可區分污染物的濃度降低是由於降解，還是稀釋或擴散所造成的，用來確定自然衰減正在發生。若污染物濃度降低，但穩定同位素比值未改變，則可能是稀釋、吸附或擴散作用，而非真正的降

解。這有助於避免誤判，確保污染場址整治工法的有效性。同位素分餾效應可用於量化降解速率，評估污染物的去除程度。例如，較輕的碳同位素(^{12}C)通常較容易參與反應，導致殘餘污染物中富集較重的碳同位素(^{13}C)，這一變化可用來計算降解程度。CSIA 可用於區別污染物是通過生物降解作用、化學反應(氧化、光解)還是物理過程(吸附、揮發)去除，例如硝酸鹽(NO_3^-)的氮同位素比值($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)變化，可用來判斷是否發生脫氮作用。

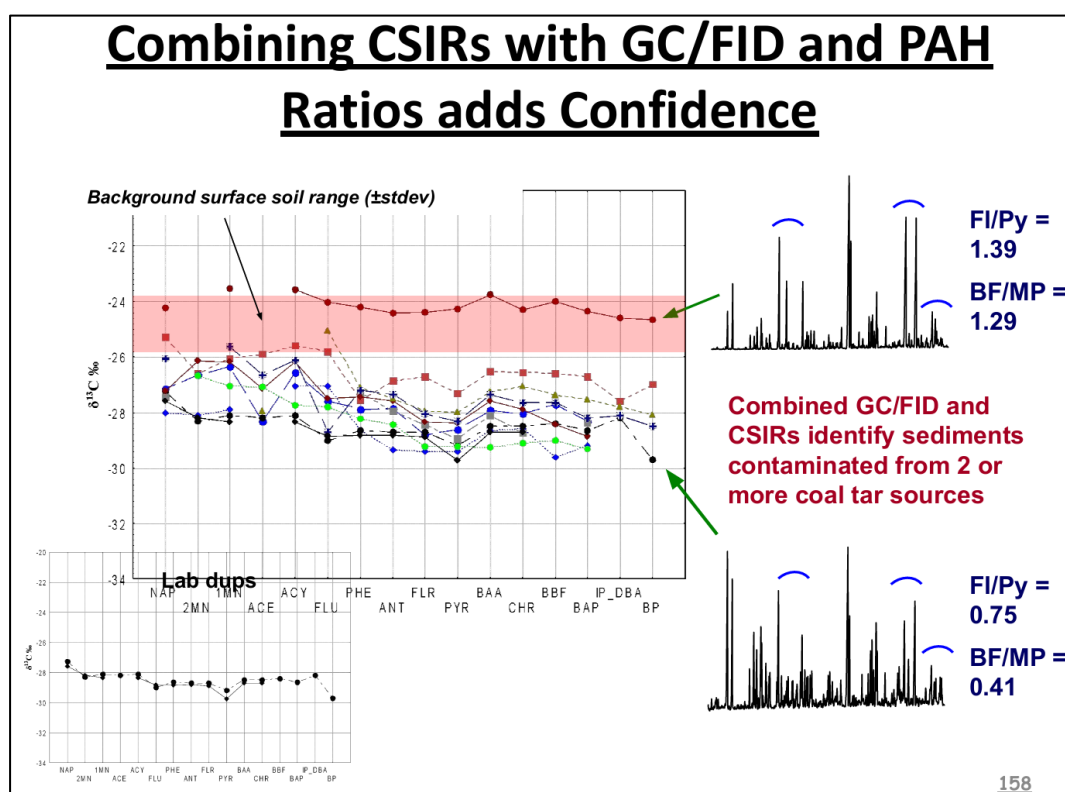


圖 14 結合穩定同位素比值分析可提升環境污染鑑識的可信度

三、全氟及多氟烷基物質((Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)

PFAS 是一類廣泛應用、持久存在的化學物質，在環境中具有高度流動性，具有毒性，並且降解速度極其緩慢。由於其廣泛使用和環境持久性，許多 PFAS 在全球人類和動物的血液中被檢測到，並以低濃度存在於各種食品和環境中。PFAS 可在水、空氣、魚類和土壤中被發現，遍佈全國乃至全球各地。科學研究表明，暴露於環境中的某些 PFAS 可能與人類和動物的健康危害相關聯。PFAS 化學物質多達數千種，存在於許多不同的消費品、商業和工業產品中。

美國環保署和加州已收集了有關 PFAS 在環境中出現的資料，並採取措施保護公眾健康。美國環保署通過「未列管污染物監控規範」收集飲用水中出現 PFAS 的資料，並通過綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System, IRIS)過程評估了暴露於 PFAS 化合物的風險。基於這些資料，美國環保署制定了全國範圍內具有法律約束力的飲用水標準，以保護社區免受飲用水中 PFAS 的影響。美國環保署還根據「綜合環境反應、補償和責任法(CERCLA)」，也稱為超級基金法案，將兩種 PFAS 化合物指定為危險物質。加利福尼亞州要求在潛在污染源(包括機場、電鍍廠、垃圾填埋場、廢水處理設施和軍事基地)附近對飲用水井和地表水取水口進行採樣。加州還禁止在各種消費品中使用 PFAS，包括滅火泡沫、化妝品、大多數紡織品、紙質食品包裝和青少年產品，並對標注為可回收和可堆肥的產品中的 PFAS 設定了限制。

從 2002 至 2022 年，約有 85 篇文獻指出 PFAS 出現於室內和室外空氣中，例如 Fluorotelomer alcohol (FTOH)、Perfluoroalkane sulfonamide (FASA)和 Perfluoroalkane sulfonamido ethanol (FASE)等。室內空氣來源眾多，如圖 15 所示。

從理論上來講，PFAS 蒸氣入侵是可能存在的，可能具有較高土壤氣體 PFAS 濃度的場所包括：PFAS 生產設施、大量水成膜泡沫滅火劑(AFFF)洩漏到地下水的場址等，但是目前未知因素過多，難以進行有意義的評估。目前尚缺乏適合的空氣中 PFAS 採樣技術、需要能代表每種 PFAS 的亨利定律常數、吸入性毒性資料和吸入風險評估標準，而且實驗室分析技術仍在開發中，仍需要更多研究以瞭解 PFAS 在土壤蒸氣中的傳輸。

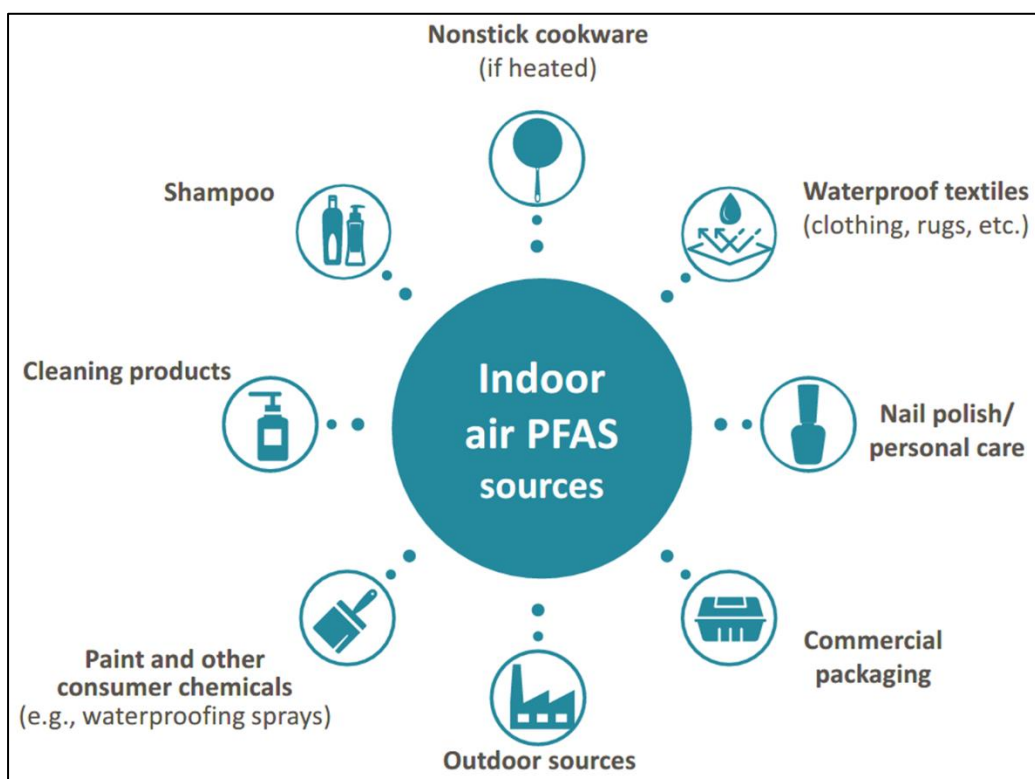


圖 15 室內空氣 PFAS 來源

肆、心得與建議

1. 環境健康與科學協會(The Association for Environmental Health and Sciences, AEHS)成立於 1990 年，是一個非營利、會員支持的組織。自 2009 年起，AEHS 每年於美國西岸與東岸各舉辦一場國際研討會，議題觸及地質、化學、生物、工程與政府法令等領域。本次出國計畫油品污染鑑識、氣相層析/穩定同位素比值質譜儀在環境領域之應用以及環境污染調查及分析等議題之資訊，並且發表一篇海報論文「Application of Mobile Laboratory for Petroleum Contamination Site」，介紹本公司在油品污染場址及因應污染事件之積極作為。
2. 此研討會有許多場次的主題與蒸氣入侵有關，探討的污染物幾乎是揮發性含氯有機物，這顯示在國外相當重視這些環境議題，降低對人類造成的健康風險。此外，不論是環境調查、鑑識分析或是整治技術等主題，許多圍繞在 PFAS 這類新興污染物上，表示這些化學品所造成的污染以及對環境生態有著嚴重的影響，引起許多關注。也發現許多環境檢測公司或是石油公司投入在發展 PFAS 和蒸氣入侵相關檢測方法及調查技術。雖然這些議題目前與本公司業務沒有直接相關，但是認識這類污染物的採樣、樣品處理和儀器分析方法，但是對推動本公司在土壤氣採樣及分析技術的研究也有所助益。
3. 相較氣相層析質譜儀，穩定同位素比值質譜儀是相當昂貴的儀器，通常國內環境檢測業者不會擁有這個檢測項目。但是在國外與揮發性或半揮發性有機物相關的環境污染調查、鑑識分析或是現地復育成效評估，除了經常使用的 GC/FID、GC/MS，也會搭配穩定同位素比值分析，綜合各種分析數據提升研判結果的可信度。即使如此，目前穩定同位素比值檢測項目仍不是常態且廣

泛使用，因此在事前需要充分與採樣人員溝通，討論採樣與保存方式以及採樣數量，才能確保分析數據具有可信度。比起法規管制成份檢測，穩定同位素比值分析單價較高，就 CSIA 來看，依據簡報者分享的資料，單一化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 δD 檢測費用分別是 150 和 160 美金。而每個樣品的 PCE 和 TCE 的 $\delta^{37}\text{C}$ 分析費用則高達 650 美金。

4. 此研討會大部分發表內容著重於工程實務方面的應用與案例分享，少數比較偏向學術研究。從歷年的研討會資料可發現，與油品污染相關的議題發表數量逐年減少，可能是經過數十年的發展，油品污染調查、分析、整治技術和法規制定已相當成熟，而含氯有機物、蒸氣入侵和 PFAS 所產生的問題還有許多需要克服的困難。透過參加此研討會，能學習不同領域的技術及真實應用案例，提升多元思考並拓展視野。建議本公司同仁可多參與由業界、政府機關及學界共同與會的國際研討會。