

金屬加工製程之砂芯鑄造對於溫室氣體排放評析

王麒維^{1*} 曾韋斌¹ 葉啓輝¹ 魏鈺真²

¹大葉大學環境工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

²財團法人金屬工業研究發展中心

407273 台中市西屯區工業區三十七路 25 號

* chwang@mail.dyu.edu.tw

摘要

本研究旨在說明國內於淨零排放議題上之背景與挑戰，尤其是中小型企業在進行低碳轉型方面所面臨之問題。國際上對於淨零排放之趨勢以及碳邊境調整機制之重要性越趨高漲，其中尤以金屬加工製程對於溫室氣體排放之影響更為重視。砂芯鑄造製程是金屬加工製程中一重要步驟，其涉及大量燃料燃燒和氣體排放。根據 ISO 14064-1:2018 規範，砂芯鑄造可歸類為直接排放中之直接燃燒排放。砂芯鑄造中使用的燃料主要是天然氣，其排放可通過排放係數法計算。然而，該方法僅針對其燃料進行考量，製程中可能產生其他氣體排放的情況，若涉及製程之排放，其砂芯材料之燃燒等皆須要納入考量。因此，進一步之排放計算需要相關的實驗數據或測量來源。針對金屬製造過程中之砂芯鑄造製程所涉及之溫室氣體排放，本研究進一步提出其盤查與評析之方法。最後，於製程廢氣碳排鑑別之分析技術，本研究整理包括質譜儀和火焰離子化偵測器等。相關論點及成果盼可作為國內中小企業於淨零排放議題上之參考資訊，亦在砂芯鑄造盤查過程提供有效解決方案和管理方法，以期許減少溫室氣體排放。

關鍵詞：砂芯鑄造，ISO 14064-1，溫室氣體，二氧化碳

Evaluation and Analysis of Sand Casting in Metal Processing Process for Greenhouse Gas Emissions

CHI-WEI WANG^{1*}, WEI-BIN TSENG¹, CHI-HUI YEH¹ and YU-CHEN WEI²

¹ Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University

No. 168 University Road, Dacun, Changhua 515006, Taiwan, R. O. C.

² Metal Industries Research & Development Centre

No. 25 Gongyequ 37th Road, Xitun Dist., Taichung 407273, Taiwan, R. O. C.

* chwang@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

The aim of this study is to illustrate how to achieve net-zero emissions in Taiwan, particularly on the problems faced by small and medium-sized enterprises (SMEs) in their low-carbon transformation. The global trend towards net-zero emissions and the increasing importance of carbon border



adjustment mechanisms have set a benchmark, with particular emphasis on the impact of greenhouse gas emissions produced by metal processing. Sand core casting is an important step in metal processing, involving significant fuel combustion and gas emissions. According to the ISO 14064-1:2018 standard, sand core casting can be classified as direct combustion emissions within Category 1. The fuel primarily used in sand core casting is natural gas, and its emissions can be calculated using emission factors. However, this method only considers the fuel used, and it fails to account for other gas emissions that occur during the process. To make the study more complete, the combustion of sand core materials should also be taken into consideration. Therefore, further emission calculations require relevant experimental data or measurement sources. In response to the greenhouse gas emissions associated with sand core casting in the metal process, this study compiles methods including mass spectrometry and flame ionization detectors as the analysis techniques to identify carbon emissions in exhausting gases process. The relevant arguments and findings can serve as reference information for domestic SMEs on the issue of net-zero emissions, as well as provide effective solutions and management methods in the sand core casting investigation process so as to reduce greenhouse gas emissions.

Key Words: sand casting, ISO 14064-1, greenhouse gases, carbon dioxide

一、前言

鑑於全球淨零排放意識與歐美碳關稅設立趨勢，我國於 2022 年 3 月正式公布「台灣 2050 淨零排放路徑藍圖」，目前已有許多國內領頭企業著手進行相關改進措施。然而，我國中小型企業時常作為國內領頭企業之上、下游廠商，並提供產品核心關鍵服務，因此於淨零排放框架下探討產業合作組織之碳排情形或產品生命週期時，其多數中小企業亦無法置身於外。惟中小企業於執行低碳轉型常礙於組織不夠完整、人員不足、資本額不大等問題，面對淨零排放議題之人才培育、組織盤查、製程升級與企業轉型較為困難。國際碳關稅設立之中，以歐盟之碳邊境調整機制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM）最為矚目，其主要係為鼓勵產品於生產國即進行減碳，並避免產業於歐盟地區付出高昂之碳成本，導致排碳大戶轉而到排碳管制較為寬鬆之國家生產，亦所謂之碳洩漏（Carbon leakage）。CBAM 執行上明訂出口國產品之碳含量，且若超過進口國之規範，進口商就必須另外購買 CBAM 憑證（CBAM Certificate）。目前 CBAM 初步規劃第一階段納管水泥、鋼鐵、鋁、肥料、電力等五大高碳排產業，係因上述產業之碳排放量約占歐盟碳交易市場 45%。根據國內經濟部統計，CBAM 管制水泥、電力、肥料、鋼鐵、鋁等 248 項產品中，我國就包含了 212 項，其中又以鋼鐵、金屬製品為主 [2, 3]。若進一步探討鋼鐵、金屬製造業，金屬加工鑄造亦是其中一重要之程序，且產品製程分工上又多以中小企業為主。我國非鐵金屬鑄造業時常使用鋁、

銅、鋅（合金）錠及回收廢金屬作為原料，此一導致各產業之污染排放特性依製造程序與設備不同而異。綜觀上述可知，國內製造部門為我國出口主要結構之一，考量到國際間淨零碳排趨勢與產業需求，並為了因應未來將實施之 CBAM 與溫室氣體盤查，以有利於未來國際終端客戶要求提供溫室氣體盤查數據時，得以適當因應，因此建立國內金屬加工製程之砂芯鑄造對於溫室氣體排放相關參數研究有其之重要性。

二、溫室氣體管理

2015 年我國通過「溫室氣體減量及管理法」，立法目的是為因應氣候變遷、善盡環境責任，而 2022 年由經濟部制定了「2050 淨零排放路徑規劃」，並以「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」四大策略，結合「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎，輔以「十二項關鍵戰略」，專注於能源、產業、生活轉型政策預期增長的重要領域制定行動計畫，落實淨零轉型目標 [2]。由此國家政策可見環境保育及永續發展之規劃刻不容緩。大型跨國企業與國內污染排放重點納管企業因具有完善制度、人才資源以及企業責任，因此對於此波浪潮早已部屬相關規劃。反觀國內多數中小型企業則受限於多方因素，面對淨零排放浪潮起步較為緩慢。

執行溫室氣體盤查可明確了解溫室氣體之排放量，亦可進一步發掘未來溫室氣體減量空間與機會，因此多數已開發



國家視溫室氣體盤查做為推動減量之基礎。溫室氣體盤查作業即為協助產業掌握溫室氣體排放現況，以完成溫室氣體盤查清冊。因此執行溫室氣體盤查作業可作為產業溫室氣體管理推動之基礎，亦為產業自身規劃溫室氣體管理之第一步。第二步則是規畫將生命週期評估納入一產品或服務之產品碳足跡，以更加明確產業服務項目之碳排情形。圖 1 即為 ISO 14064-1:2018 組織型溫室氣體盤查與 ISO 14067 產品碳足跡簡易流程圖。

國內推動產業溫室氣體盤查作業，目前主要係參考國際標準化組織之 ISO 14064-1；2018 組織層級溫室氣體排放減量與移除之量化與報告附指引之規範，並依據條文規範逐步計算類別 1-6 之溫室氣體排放。ISO 14064-1；2018 是針對產業溫室氣體排放量之量化報告，該報告可作為溫室氣體排放之基礎架構，基於其規範框架之下，再向上疊加產業及政府法規等要求。一般而言，溫室氣體包含有二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亞氮 (N₂O)、氫氟碳化物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆) 及三氟化氮 (NF₃) 等七大項目，其排放方式根據 ISO 14064-1；2018 可分為以下 6 個類別 (舊版 ISO 14064-1 為三大範疇) [3]：

範疇一：直接排放

類別 1 之直接溫室氣體排放 (例如：固定或移動燃燒源、製

程排放源、逸散排放源、化糞池等。)

範疇二：能源間接排放

類別 2 之能源間接溫室氣體排放 (例如：企業外購之電力、蒸氣、熱能等輸入能源間接排放。)

範疇三：其它間接排放

類別 3 之運輸間接溫室氣體排放 (例如：上下游配送、員工通勤、客戶拜訪等。)

類別 4 之組織使用產品間接溫室氣體排放 (例如：供應商產品或服務之排放。)

類別 5 之組織生產產品間接溫室氣體排放 (例如：使用組織所生產產品造成之排放。)

類別 6 之其他間接溫室氣體排放。

然而，ISO 14064-1；2018 條文規範之排放源範圍非常廣泛，舉凡是燃燒煤及燃燒油等燃料之設備、使用液化天然氣之瓦斯爐等固定能源排放、製程中排放、燃料使用之交通工具等移動源排放及逸散排放源 (如化糞池、冷媒逸散等) 皆涵蓋其中。

一般而言，執行產業溫室氣體盤查管理程序可依序分為高階主管承諾、成立推動組織、邊界設定、擬定基準年、排放量量化、建立盤查清冊、數據品質管理、程序文件化、盤查報告書製作、內部查證 (如圖 1 所示)。執行過程以持續

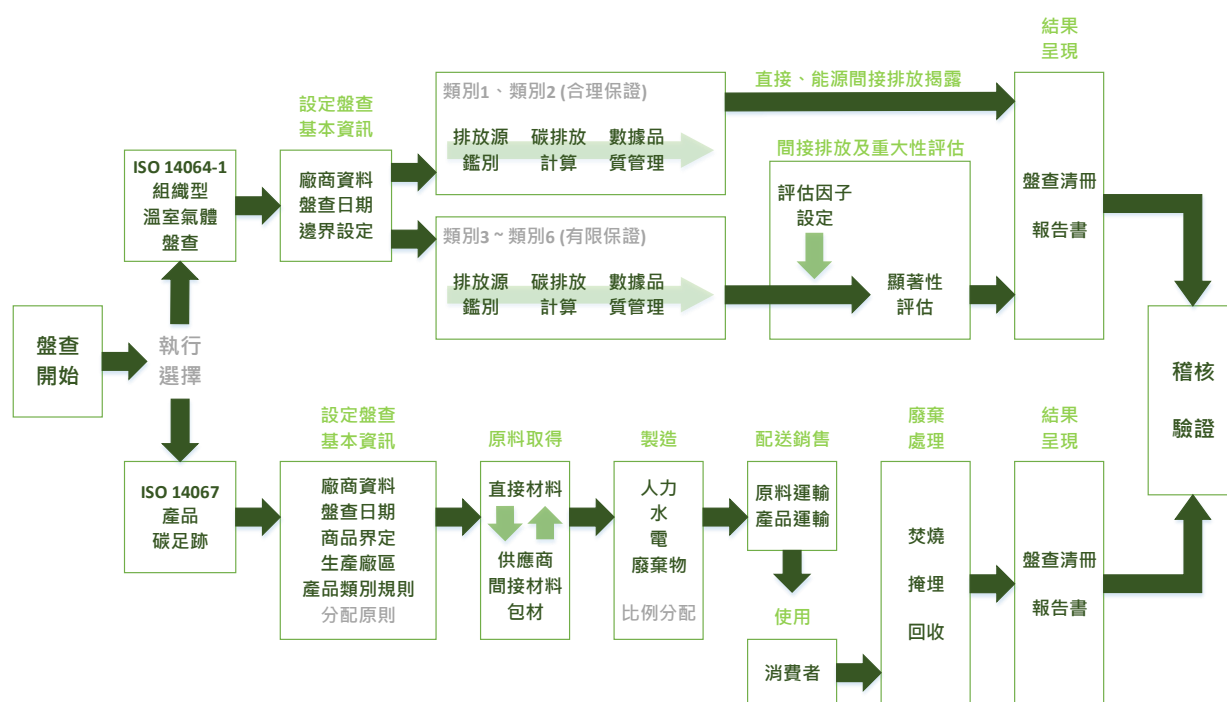


圖 1. ISO 14064-1:2018 組織型溫室氣體盤查與 ISO 14067 產品碳足跡簡易流程圖



改善為宗旨，並納入第三方查證與清冊登入，作為外部稽核。由此可知，ISO 14064-1；2018 建議於產業執行溫室氣體盤查作業之第一步為獲得高階主管承諾，而後方可成立推動組織，並於確認盤查目的、邊界、與基準年後，始得進行盤查作業。然而，針對國內普遍缺乏溫室氣體盤查經驗與溫室氣體盤查技術人員之中小企業，執行上述盤查步驟實為困難。因此，本研究基於前述 ISO 14064-1；2018 之各項規範與精神，建議中小企業執行溫室氣體盤查可以工作場域勘查、溫室氣體盤查認知、組織低碳工作圈、啟動實質盤查程序及報告書建立與減碳策略擬定五大面向著手(如圖 2 具體溫室氣體盤查規劃所示)，逐步完成 ISO 14064-1；2018 組織層級溫室氣體盤查項目。而後，組織亦可進一步進入第二階段之產業之產品碳足跡建立。國際標準組織於 2018 年即公告制定 ISO 14067 規範準則，並以該準則之生命週期概念架構碳足跡量化流程。ISO 14067 為一組織之產品或服務於生命週期階段之碳排放量計算與溝通方法，其包括各種生命週期階段之分析，由原料之提取和加工、製造、配銷，到產品使用階段和產品壽命終止廢棄階段之處理方式，共計有五大步驟。其中，組織之產品從原料採集到製造、包裝、行銷、消費者使用及生命終結處理 (End-of-life treatment) 的過程，同時也可稱為搖籃到墳墓 (Cradle-to-Grave)。另外常見之評估模式亦包含有搖籃到大門 (Cradle-to-Gate) 及大門到大門 (Gate-to-Gate) 等，後兩者皆不包含產品配送、使用與生命終結處理這三階段之評估。

三、砂芯鑄造之溫室氣體盤查評析

(一) 砂芯鑄造製程之溫室氣體盤查

根據國內經濟部統計，CBAM 管制水泥、電力、肥料、鋼鐵、鋁等 248 項產品中，我國就包含 212 項，其中又以鋼鐵、金屬製品為主。在鋼鐵、金屬製造業之中，金屬加工鑄造是一重要之程序，國內許多金屬加工之中小企業皆有該項製作業，且我國非鐵金屬鑄造業時常使用鋁、銅、鋅(合金)錠及回收廢金屬作為原料，導致各產業之污染排放特性依製造程序與設備不同而異。鑄造產業因涉及燃燒，因此具有排放大量 CO₂ 與其他污染物至大氣之潛勢 [9]。一般而言，傳統之砂芯鑄造 (Sand casting) 程序為先將模具 (Mold preparation) 與金屬 (Metal preparation) 備妥再進行澆灌 (Casting)，最後對鑄件加工 (Finishing)，方可完成成品。



圖 2. 具體溫室氣體盤查規劃流程

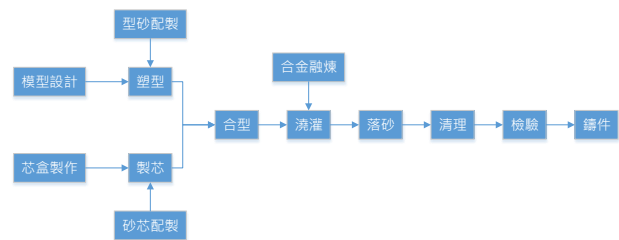


圖 3. 砂芯鑄型技術流程圖

如圖 3 所示之砂芯鑄型技術流程圖，其細部項目包含有模型與芯盒設計製作、製型與製芯、合型、澆灌、落砂、清理(清除模型外之餘砂與鑄型後之餘砂)、檢驗、鑄件等八大步驟。生產過程形成之空氣污染物包含懸浮微粒 (Particulate matter, PM)、有害空氣污染物 (Hazardous Air Pollutants, HAP)、揮發性有機化合物 (Volatile organic compound, VOC)、一氧化碳 (CO)、金屬氧化物 (MO_x)、氮氧化物 (NO_x)、碳氫化合物 (HC) 及二氧化硫 (SO₂) [9]。其中如 Šehić-Mušić et al. [11] 研究指出於傳統金屬鑄造廠停留一小時內可測得之 CO₂ 最高值為 11.9%。廠內鍋爐室可測得之 CO (3.25 ± 0.50 ppm)、CO₂ (11.24 ± 0.03%)、NO (89.74 ± 1.15 ppm)、NO₂ (0.30 ± 0.35 ppm)、NO_x (89.00 ± 1.15 ppm) 及 SO₂ (41.25 ± 33.63 ppm)。目前國內現行法規針對鑄造業空氣污染排放標準僅針對粒狀污染物、硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳以及戴奧辛制定空氣污染物排放標準。由於淨零排放為近年興起之議題，是故國內鑄造產業對於相關碳排放及污染物之背景數據較為缺乏，且對於碳排放和污染物之減量與控制技術所投入知資源也較少。

根據 ISO 14064-1:2018 條文規範，砂芯鑄造程序應可歸類為類別 1 直接排放之中，若再細分項目可依計算方式列為直接燃燒排放或製程排放。由於砂芯鑄造過程中，會使用大量燃料進行燃燒行為，以提高機台模具溫度對砂芯材進行鑄



造。國內多數自動砂芯鑄造機使用之燃料多為天然氣，因此針對此部分探討其溫室氣體排放，可以天然氣之直接燃燒之使用量歸類於直接燃燒排放（圖 4 為國產砂芯鑄造機範例及直接排放熱點示意圖）。直接燃燒排放計算方式可藉由聯合國政府間氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）提供之天然氣燃燒參數，以 ISO 14064-1:2018 計算方法之中排放係數法求得（即天然氣使用量乘以 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 之各別排放係數，而後將三者分別乘以各自之全球暖化潛勢值（Global warming potential, GWP）相加，可得二氧化碳當量（Carbon dioxide equivalent, CO_2e ），如下式（1）所示，

$$\begin{aligned} & \text{天然氣使用量(公升)} \times \text{CO}_2 \text{ 排放係數(噸/公升)} \times \text{GWP}_{\text{CO}_2} \\ & + \text{天然氣使用量(公升)} \times \text{CH}_4 \text{ 排放量(噸/公升)} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \\ & + \text{天然氣使用量(公升)} \times \text{N}_2\text{O 排放量(噸/公升)} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} \\ & = \text{CO}_2\text{e (噸)} \end{aligned} \quad (1)$$

因此這部分涉及之燃燒產生氣體包含有 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 。然而上述之計算方式未考量其他排放因子，諸如外購電力之使用、原料取得之排放等等，因此需於其他類別計算時另外納入考量，方可完整呈現其碳排數據。反之，若進一步考量燃燒過程中其他可能物質之釋出（例如砂芯材之燃燒導致額外製成廢氣產生），進而造成溫室氣體之排放，該部分即可歸類為類別 1 之製程產生排放。進行製程產生排放計算，除了上述天然氣直接燃燒使用排放係數法計算外，則另需要相關實驗方法或檢測以提供有效數據做為計算依據來源。



圖 4. 國產砂芯鑄造機範例及排放熱點示意圖

（二）製程廢氣碳排鑑別

製程廢氣碳排鑑別方面，現今已有多種分析技術被廣泛運用，包括層析儀、質譜儀（Mass spectrometer, MS）、紅外線光譜儀、雷射吸收光譜儀等。上述提及之技術可以快速且精確地測量不同的製程廢氣中的碳排放量，有助於碳排放的監測與管理，並且在未來之研究中得到更廣泛之應用。目前氣態化合物即時偵測技術，實際上大量被應用之技術，有以定量為主的光離子化偵測器（Photoionization detectors, PID）、火焰離子化偵測器（Flame ionization detector, FID）、鹵素選擇性偵測器（Halogen specific detector, XSD）[5]。具有定性功能之即時偵測器，則包含有傅立葉轉換紅外線光譜（Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR），但 FTIR 在測高感度時，需要較長光徑，所以有設備體積相對較大，在操作時需要較多人手，且有易受水氣干擾的問題。然而在有機混合氣體的鑑定上，市場上目前可運用的量測技術仍較為缺少，且準確度上也較為不足 [1]。近年來，由於四極柱式質譜儀（Quadrupole mass spectrometer）與飛行時間質譜儀（Time-of-flight mass spectrometry, TOFMS）技術之進步，直接膜進樣質譜儀（Direct inlet membrane introduction mass spectrometer, MIMS）也得以被實際商品化，並得以應用在氣體混合物鑑定等各種不同的領域上。以燃燒過程所關注之 3 種溫室氣體（ CO_2 、 CH_4 、 N_2O ）為主，其上述提及之儀器相關氣體分析方式亦整理於表 1 所示。此外，FID 作為通用之氣相層析儀（Gas chromatography, GC）偵測器，亦可增設鎳催化劑管（Nickel catalyst tube, NCT）作為輔助分析元件，利用鎳催化之特性產生甲烷化（Methanizer）反應，可達到同步分析多種溫室氣體（如 CO_2 與 CH_4 等）功效，同時亦可提升分析之感度。甲烷化裝置是 GC 中使用的一種設備，此處提及之鎳催化劑管可以幫助使用者檢測非常低濃度之 CO 和 CO_2 。該裝置由一個 FID 組成，前面增設一組氫化反應器，將 CO 和 CO_2 轉換為 CH_4 。甲烷化裝置中含有氫化催化劑，用以實現上述之化學轉換，而其中鎳元素就常用作為催化劑材。

本研究基於前述所提及之各項儀器方法，於實驗室已成功將 CO_2 與 CH_4 等氣體經氣體採樣袋採集樣品後，以 GC 之管柱分離，並由 FID/NCT 或 MS 檢測樣品中氣相化合物濃度（ CO_2 與 CH_4 之分析參考圖譜如圖 5 所示）。相關之分析條件如下所述：

GC/FID/NCT 操作條件建議



表 1. 溫室氣體分析方式整理

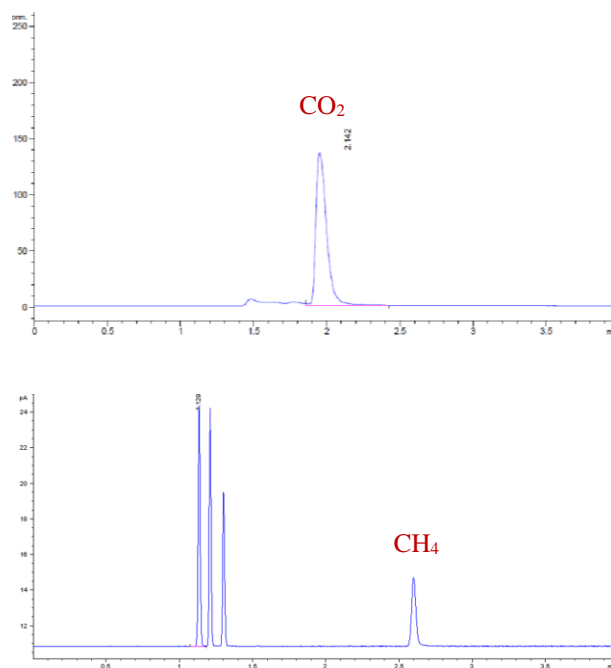
Topic	Instrument	Column	Ref.
Validation of an analytical method for nitrous oxide (N ₂ O) laughing gas by headspace gas chromatography coupled to mass spectrometry (HS-GC-MS): Forensic application to a lethal intoxication	GC/MS (Agilent 6890N /Agilent 5973)	Agilent Select Permanent Gases column (5°A PLOT capillary column and Porabond Q)	[7]
Determination of CH ₄ , CO ₂ and N ₂ O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS	GC/MS	CP-PoraPLOT Q-HT column	[6]
Anaerobic digestion affecting nitrous oxide and methane emissions from the composting process	GC/MS (Agilent 7820A /Agilent 5975)	CP-PoraPLOT Q-HT column	[4]
Solid phase microextraction-gas chromatographic-mass spectrometric determination of nitrous oxide evolution to measure denitrification in estuarine soils and sediments	GC/MS (ThermoFinnigan Trace/ Finnigan Polaris Q)	Rt-QPLOT column	[5]
High-Precision Measurement of N ₂ O Concentration in Ice Cores	GC/ μ -ECD/FID (Agilent 7890B/ G3440B-231)	porous-layer open tubular (PLOT) column	[10]
Catalytic role of conditioner CaO in nitrogen transformation during sewage sludge pyrolysis	FT-IR gas analyzer (Gasmeter DX4000)	-	[8]
Isotope Signatures of N ₂ O in a Mixed Microbial Population System: Constraints on N ₂ O Producing Pathways in Wastewater Treatment	FTIR spectroscopy (GASMET CX-4000)	-	[12]

1. 注射口：溫度 140°C，以氣密性注射針直接注入不分流 (Splitless) 進樣，注射時間 5 秒鐘。
2. 偵測器：火焰離子化偵測器之溫度 300°C。
3. 管柱：SUPEL-Q PLOT 30.0 m \times 320 μ m \times 3.00 μ m
4. 載流氣體：氮氣，流率 7 mL/min。
5. 輔助氣體：氮氣，流率 25 mL/min。
6. 甲烷化器溫度：375°C。
7. 管柱溫度：50~70°C。
8. 分析時間：4.0 min。

GC/MS 操作條件建議

1. 注射口：溫度 23°C，以氣密性注射針直接注入不分流 (Splitless) 進樣，注射時間 5 秒鐘。
2. 載流氣體：氮氣，流率 7 mL/min。
3. 管柱：SUPEL-Q PLOT 30.0 m \times 320 μ m \times 3.00 μ m
4. 管柱溫度：23°C。
5. 分析時間：4.0 min。
6. 70 eV 電子撞擊游離。
7. 選擇分析離子：CH₄ m/z=15、CO₂ m/z=22 及 N₂O m/z=44。
8. 離子源溫度：200°C。
9. 傳輸線溫度：240°C。
10. 停留時間：CH₄、CO₂ 及 N₂O 分別約為 1.3、1.8 及 2.2 min。

本研究使用之方法其檢測範圍約可從 1 ppm 到 GC 連接偵測器之飽和上限值或管柱的負載上限值，分析狀況視進樣系統而定；分析過程使用惰性氣體稀釋氣體樣品，或採用較

圖 5. CO₂ 與 CH₄ 之分析參考圖譜

小之氣體進樣迴路，可以提高檢測濃度上限。可能產生之分析干擾則推測包含有 1. 高濃度和低濃度樣品或標準品交互分析時，會發生樣品交互污染，分析二個樣品過程之間應以載流氣體充分吹洗氣相層析儀之樣品迴路。2. 採樣袋以 60°C 至 80°C 下加熱 30 分鐘，可提高清洗效率，惟若使用採集濃度超過 200 ppm 樣品之採樣袋，可能因殘留影響檢測結果，不宜再清洗與重複使用。3. 對於成分複雜樣品，為避免檢測干擾，可使用 GC/MS 進行定性確認。



儀器分析所獲得之結果，可藉由建立檢量線得到其對應之質量，而後利用下列之式 (2) 計算，即可得知其 ppmV 濃度。

$$\text{Conc. (ppm, V/V)} = \frac{22.4 \times A}{\text{待測物莫耳質量} \times 10^3 \times V \times \frac{273}{273+t} \times \frac{P}{760}} \quad (2)$$

Conc.：空氣中待測物之濃度 (ppm, v/v)；A：待測物之質量 (ng)；V：氣體採樣/注射量 (L)；t：採樣時之溫度 (°C)；P：採樣時之氣壓 (mmHg)。

四、結論與建議

本研究針對淨零排放議題之背景與挑戰，說明中小企業於低碳轉型方面所面臨之問題，其中尤以金屬加工製程之影響更為重要。砂芯鑄造製程是金屬加工製程中一重要步驟，其涉及大量燃料燃燒和氣體排放。本研究依據 ISO 14064-1:2018 規範，界定金屬加工製程中砂芯鑄造係由直接排放中之直接燃燒排放與製程排放。因此為避免忽略直接燃燒排放外所產生之溫室氣體影響，進一步之排放計算需要相關的實驗數據或測量來源。於研究中提出其盤查與評析之方法，並整理諸多鑑別方法包括質譜儀和火焰離子化偵測器等，初步建立建議分析程序。相關論點及成果可作為國內中小企業於淨零排放議題上之參考資訊，亦在砂芯鑄造盤查過程提供有效解決方案和管理方法，惟進一步之研究可實際於金屬加工廠內進行採樣分析，以未來建立盤查相關係數。

參考文獻

- 周宜成、陳宏達、張士元、涂茂園 (民 105)，PDMS 薄膜應用在揮發性有機物感測器的質傳擴散特性模擬，*化學*，74(4)，297-302。
- 國家發展委員會 (民 111)，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，國家發展委員會，台北。
- 楊聰榮、魏梅金 (民 112)，碳盤查成功關鍵祕笈：組織型溫室氣體盤查實務，頁 2-88，新陸書局，台北。
- Dietrich, M., M. Fongen and B. Foereid (2021) Anaerobic digestion affecting nitrous oxide and methane emissions from the composting process. *Bioresource Technology Reports*, 15(6), 100752.
- Drescher, S. R. and S. D. Brown (2006) Solid phase microextraction-gas chromatographic-mass spectrometric determination of nitrous oxide evolution to measure denitrification in estuarine soils and sediments. *Journal of Chromatography A*, 1133, 300-304.
- Ekeberg, D., B. Ognér, M. Fongen, E. J. Joner and T. Wickström (2004) Determination of CH₄, CO₂ and N₂O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS. *Journal of Environmental Monitoring*, 7, 621-623.
- Giuliani, N., J. Beyer, M. Augsbürger and V. Varlet (2015) Validation of an analytical method for nitrous oxide (N₂O) laughing gas by headspace gas chromatography coupled to mass spectrometry (HS-GC-MS): Forensic application to a lethal intoxication. *Journal of Chromatography B*, 983-984, 90-93.
- Liu, H., Q. Zhang, H. Hu, P. Liu, X. Hu, A. Li and H. Yao (2015) Catalytic role of conditioner CaO in nitrogen transformation during sewage sludge pyrolysis. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3), 2759-2766.
- Mane, P., V. Thombare, M. Mhaske and R. Bhambare (2014) Implementation of 802.11 N OFDM transmitter and receiver using FPGA. *International Journal of Engineering Technology and Advanced Engineering*, 4(4), 232-236.
- Ryu, Y., J. Ahn and J. W. Yang (2018) High-Precision Measurement of N₂O Concentration in Ice Cores. *Environmental Science and Technology*, 52(2), 731-738.
- Šehić-Mušić, N., Š. Goletić, D. Pihura, L. Mušić and K. Hasanović (2013) Effects of foundry industry on the environment. *Metalurgija*, 52(4), 533-536.
- Wunderlin, P., M. F. Lehmann, H. Siegrist, B. Tuzson, A. Joss, L. Emmenegger and J. Mohn (2013) Isotope signatures of N₂O in a mixed microbial population system: constraints on N₂O producing pathways in wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*, 47(3), 1339-1348.

收件：112.07.17 修正：112.07.31 接受：112.08.21

