

出國報告（出國類別：開會）

參加國際 AMPP 2025 年研討會

服務機關：台灣中油煉製研究所

姓名職稱：邱德俊工程師

派赴國家：美國

出國期間：114/04/05-/114/04/13

報告日期：114/05/13

摘要

中油公司擁有長達 7000 公里的管線，其中大部分佈於城市或人口稠密區域。近年來，氣候變遷和溫室氣體效應日益顯著，這使得中油公司的管線未來可能需要輸送不同比例的氫氣天然氣混合物以及碳捕捉的二氧化碳氣體。此外管線所處的地理環境也帶來了額外的挑戰，包括位於工業及科技發達地區，以及部分管線與高壓交流電力系統共用路徑。儘管目前管線已採用防蝕包覆及陰極防蝕系統進行保護，但在輸送新型氣體組合以及受到高壓交流電力系統干擾的情況下，管材仍可能遭受潛在的損傷，而交流干擾下的腐蝕更可能對管線造成嚴重的危害。本次參加 2025 AMPP 研討會，希望可以在參加論文及報告發表中，獲取相關的技術發展，主要的目的在深入分析輸送不同比例氫氣的天然氣、二氧化碳氣體及管線在交流干擾下各自可能產生的危害，以及共同作用下的危害加成程度。報告將依據多篇會議論文內容、相關文獻及自行現場檢測經驗、國際間的做法和相關案例，並針對中油公司的管線環境，提出可能的改善方案及具體的實施步驟。

美國運輸部管線與危險物質安全管理局 (PHMSA) 及 DNV 正在積極應對將氫氣混合到天然氣管線所帶來的安全挑戰。透過持續的研究、發布相關報告和文件。PHMSA 及 DNV 均致力於確保在推動氫能發展，雖然目前氫能的輸送或使用，仍未在國內形成政策或規劃，本公司為最大能源供應者，對於可能的應用，應朝向確保管線基礎設施和民眾公共安全得到充分保障的方向為最高原則。輸送氫能管線的安全疑慮，會隨著技術的進步和對氫能安全性的深入更了解而使應用的可能性增加。然而在管線氫能輸送的監督方法可能會不斷演變及加嚴，我們應該適應這一快速發展的領域。

氣候變遷是當前全球面臨的最嚴峻挑戰之一，對生態環境、經濟發展和社會穩定都帶來了巨大的威脅。減少溫室氣體排放是應對氣候變遷的核心，而碳捕捉、利用與封存 (CCUS) 技術被認為是實現大規模減排的重要手段之一。CCUS 技術透過捕捉工業生產過程中產生的二氧化碳，並將其輸送到地質構造中進行封存，從而有效地減少二氧化碳向大氣中的排放。隨著全球氣候變遷的日益嚴峻，碳捕捉、利用與封存 (CCUS) 技術作為一項重要的減排手段受到了廣泛關注。二氧化碳的管線輸送是 CCUS 產業鏈中不可或缺的環節，其安全性和可靠性對於 CCUS 技術的推廣應用至關重要；本公司及相關運營商和相關利益相關者應密切關注未

來使用及輸送規定及要求最新動態和指南，以確保其在將來管線氫能及二氧化碳輸送工程的安全及法規的符合。

目 次

一、 目的	4
二、 過程	5
三、 研討會重要議題及具體成效	6
四、 心得與建議	25
五、 結論	26
六、 附件	28

一、目的

AMPP 材料保護與性能協會(Association for Materials Protection and Performance, AMPP)為國際間組織最為龐大的腐蝕防制協會，該組織於 2021 年由國際腐蝕工程師協會(The National Association of Corrosion Engineers, NACE), 與塗層(Coating)保護協會(The Society for Protective Coatings, SSPC)合併而成立。該組織活躍於全球 130 個國家，會員達 4 萬人，本次在美國田納許維爾國際會議中心舉行 2025 AMPP 防蝕研討會。會議除大會外更分成多日不同主題、場次之研討會同時進行。本次主要參加的專題是管線在氣候變遷下輸送混氫及二氧化碳的風險及管線在高壓交流電下受到交流干擾腐蝕的檢測及危害防制技術，根據三項關心的議題，聽取多篇論文發表、參考已發表於期刊的文獻和實際於公司管線場域檢測的經驗，綜合整理，並以下列進行研討會心得說明。

- (一)、地下管線混氫天然氣的輸送
- (二)、二氧化碳管線運輸完整性
- (三)、交流干擾腐蝕對管線的影響與改善策略
- (四)、混氫天然氣及二氧化碳輸送管線在交流干擾的複合危害風險與因應策略

二、過程

日期	地點	詳細工作內容
4/5	台北-洛杉磯	啟程
4/6	洛杉磯-納許維爾	大會開幕及研討會
4/7-4/9	納許維爾會議中心	研討會
4/10-4/11	洛杉磯	返程(天候因素)
4/12-4/13	洛杉磯-桃園	返程

三、研討會重要議題及具體成效

本次研討會中，美國運輸部管線與危險物質安全管理局（PHMSA）綜合近年來的研究與調查，提出了在管理面上的建議。挪威船級社(DNV)則是對此進行了廣泛的研究。作為負責監督美國境內天然氣和危險液體管線安全的聯邦機構，對天然氣混氫管線的潛在影響高度重視。PHMSA 也積極進行相關研究，發布報告，並逐步制定或調整現有的法規，以確保在推廣氫能應用的同時，公共安全和環境保護得到充分保障。

本次主要參加的專題是管線在氣候變遷下輸入混氫及二氧化碳的風險及管線在高壓交流電下受到交流干擾腐蝕的檢測及危害防制技術，根據三項主關心的議題，在聽取多篇論文，參考已發表於期刊的文獻和實際於公司管線場域檢測的經驗，綜合整理，提出本報告。

(一) 地下管線混氫天然氣的輸送

隨著全球對能源轉型和減少碳排放的日益重視，氫能作為一種清潔能源載體受到了廣泛關注。將氫氣與現有的天然氣基礎設施混合輸送，被認為是一種在短期內降低碳排放、並逐步發展氫能經濟的潛在途徑。然而氫氣與天然氣在物理、化學性質上存在顯著差異，例如比重、分子量、分子的大小等，這對現有的天然氣管線系統的安全性、完整性和輸送效率產生了新的挑戰。

PHMSA 的研究工作旨在深入理解將氫氣混入現有天然氣管線可能帶來的各種安全隱憂和操作挑戰。主要重點包括以下幾個方面：

1.1 材料相容性與氫脆 (Material Compatibility and Hydrogen Embrittlement)

氫氣分子非常小，具有高滲透性，容易滲入金屬材料的晶格結構中，與金屬原子發生相互作用。在高壓環境下，這種相互作用可能導致管線材料氫脆現象，使得管線鋼材的延展性、抗拉強度和斷裂韌性降低，增加管線發生裂紋、洩漏甚至災難性破壞風險。不同的鋼材類型、製造技術、焊接品質、管線使用的時間以及氫氣的濃度和壓力等因素，都會影響材料對氫脆的敏感程度。

針對不同鋼材，PHMSA 主導了對美國境內常用於天然氣管線的不同鋼材（包括碳鋼、低合金鋼等）在不同氫氣濃度和壓力條件下的氫脆敏感性進行實驗室測試和分析。這些研究目的是在確定不同材料的氫脆限值、裂紋擴展速率以及疲勞

壽命。

此種管線產生氫脆的機制是對氫原子與金屬微觀結構相互作用的基礎科學研究，以更深入地理解氫脆的發生機制，從而更準確地預測和評估氫脆的風險；也研究壓力、溫度、氫氣濃度、應力狀態、以及管線使用歷史等因素對氫脆的影響程度，並為制定安全輸送參數提供科學依據。在檢測上使用線上檢測 (In-Line Inspection, ILI) 工具，作成當管線出現不同異常指示(Indicator)時執行適用性評估，也評估現有的管線內部檢測工具，如例如磁粉探傷、超音波檢測等方法，是否可以執行檢測由氫脆引起的微小裂紋和缺陷方面的能力，並嘗試研究開發適用於氫氣環境的新型檢測技術。除了金屬材料，PHMSA 也關注氫氣與管線系統中使用的密封元件、墊片、塗層、以及其他非金屬組件的相容性，確保這些組件在氫氣或混氫氣環境下不會發生劣化、膨脹、收縮或失效，導致洩漏或其他安全問題。

對於現有管線的適用性評估 (Pipeline Suitability Assessment)也是關注的重點，美國擁有龐大的天然氣管線網絡，將這些現有管線改造用於輸送氫氣或混氫天然氣，被認為是降低氫能基礎設施建設成本和縮短部署時間的有效途徑，此點與本公司管線的狀況相同。然而，並非所有現有的天然氣管線都適合輸送氫氣。在考慮例用現有天然氣管線輸送氫氣或混氫天然氣時必須分析現有的管線完整性管理數據，包括管線的材料、製造記錄、焊接記錄、腐蝕歷史、維護記錄以及以往的事務數據，以評估不同管線的潛在適用性。

由於為了快速評估管線的再利用於氫氣或混氫天然氣輸送，使用數值模擬評估模型是一項新的技術，這些模擬程式能夠考慮材料特性、輸送條件、以及氫氣濃度等因素，協助管線業者評估其管線輸送氫氣的潛在風險。一旦評估既有的天然氣或油料管線不完全符合氫氣輸送要求，業界及學術單位亦研究需要進行哪些改造或改善，例如更換特定的管段、加強焊接接頭、升級密封系統、以及降低壓力控制和增加安全保護系統等。這類數值模擬評估模型軟體工具，也應該可以提供管線運營者評估其現有管線輸送氫氣的相容性，並識別潛在的風險和所需的減緩措施。

1.2 輸氫及混氫天然氣洩漏檢測與識別 (Leak Detection and Identification) 輸氫及混氫天然氣洩漏檢測與識別是管線或輸送基礎設備必要的基本，氫氣具有密度低、擴散速度快、以及火焰幾乎不可見等特性，這使得氫氣洩漏的檢測和識別比天然氣洩漏

更具挑戰性。有效的洩漏檢測系統對於確保管線安全至關重要。PHMSA 正在評估現有的天然氣管線洩漏檢測技術，例如光學成像、超音波檢測、氣體感測器等技術及工具在檢測氫氣和混氫氣洩漏方面的靈敏度和可靠性。透過實驗和模型模擬研究氫氣和混氫天然氣在不同條件下的洩漏和擴散行為，以便更好判斷洩漏的模式和影響範圍；研究如何提高洩漏檢測系統的準確性，降低由於環境因素或其他干擾導致的誤報率。

1.3 現有的天然氣管線更新再利用 (Repurposing Existing Pipelines)於輸送純氫或混氫氣，將現有的天然氣管線改造用更新再利用被認為是發展氫能基礎設施的關鍵策略。然而這需要仔細評估技術可行性、經濟成本和安全風險，這些研究主要是評估各種將現有天然氣管線更新改造為氫氣管線的技術和程序，包括管線的清洗、內部檢查、維修、以及必要的組件更換，此種管線更新對比新建氫氣管線和改造現有管線的成本效益。

1.4 管線風險評估

輸送氫氣或混氫氣的管線系統可能面臨與純天然氣管線不同的風險。全面的風險評估對於識別潛在的危險並制定有效的減緩措施至關重要。這些風險包括前述的氫脆、火焰的不可見、燃燒速度快、以及潛在的洩漏點等，PHMSA 更新其管線風險評估流程，納入氫氣特有的風險因素，制定了定量風險評估方法來預測氫氣管線事故發生的頻率和潛在後果，提供更好地進行風險管理和決策步驟。除了風險評估外，對於風險減緩策略的開發，如研究和開發針對氫氣管線洩漏、火災和爆炸等風險的減緩策略，開發更有效的洩漏檢測系統、防火和防爆設計、以及制定有效的緊急應變程序。

1.5 混氫天然氣管線領域的研究成果和相對關係人監督

目前 PHMSA 透過發布研究報告、技術文件等方式，向大眾和業者分享其在天然氣混氫管線領域的研究成果和監督的考量。一些重要的報告和文件，本公司亦應該取得，這些文件亦可能為我國氫能管線的法規制定來源，文件包括：

- PHMSA R&D Program and Ongoing Hydrogen Research (PHMSA 研發項目與持續的氫能研究)：這份文件概述了 PHMSA 在氫能管線安全領域的研發計劃，包括與氫氣及混合氫氣相關的項目。它整合了研究目標、方法和預期成果，展現 PHMSA 強調對確保氫能安全運輸的承諾。

- FY 2021-2022 Pipeline Safety R&D Update Report (2021-2022 財政年度管線安全研究發展更新報告)：這份提交給國會的報告總結 PHMSA 的各項研發項目進展情況，其中包含了與氫氣及混合氫氣相關的研究。報告重點介紹了研究的關鍵發現及對管線安全監督的潛在影響因子。

- Stakeholder Communications: Hydrogen (利益相關者溝通：氫能)：PHMSA 網站上的專頁提供了關於 PHMSA 氫氣管線相關活動的資訊，包括研究進展、監督考量以及與利益相關者的溝通記錄。

- PI-24-0001 | PHMSA - Department of Transportation (PI-24-0001 | PHMSA - 美國運輸部)：這份文件確認 PHMSA 對於透過天然氣管線設施輸送氣體，包括氫氣和天然氣的混合物的監督權限。確認了 PHMSA 對於確保這些運輸活動安全的監督責任。

在研討的論文中可以了解 PHMSA 要求與監督的方法，目前 PHMSA 對於氫氣管線的監督主要依據美國現有的天然氣管線安全法規 (DOT 49 CFR Part 192)。根據這些法規，氫氣被視為一種“易燃氣體”進行監督。然而，由於氫氣與天然氣在性質上的差異，現有的法規在某些方面可能不足以完全涵蓋氫氣和混氫天然氣管線運輸的獨特安全挑戰。

PHMSA 對於天然氣混氫管線監督方法可以概括為以下幾個方面：

- 基於現有的法規的監督：目前氫氣和天然氣的混氫氣體在管線中運輸時，仍然受到 49 CFR Part 192 的約束。運營商及業者需要遵守關於管線設計、建設、輸送、維護和緊急應變等方面的要求。

- 數據收集與分析：PHMSA 正在積極收集關於氫氣混合到天然氣管線的現狀和未來計劃的資訊，以填補目前關於這種做法所需的關鍵數據。這包括混合比例、管線材料、輸送壓力以及潛在的安全問題等。

- 謹慎的監督態度：由於氫氣的獨特安全特性，特別是在封閉空間內的可燃性風險，一些利益相關者敦促 PHMSA 對於在天然氣下游業者管線系統(地區型天然氣公司)中混合氫氣採取謹慎的態度。PHMSA 權衡氫能的潛在益處與確保公共安全的責任。

- 法規更新與制定：隨著對氫氣和混氫管線運輸安全性的了解不斷深入，PHMSA 會在未來更新現有的法規或制定新的、專門針對氫氣管線運輸的法規。這

包括對材料選擇、設計標準、洩漏檢測要求、以及緊急應變計劃的具體要求。

- 與業者和研究機構的合作：PHMSA 積極與管線業者團體、研究機構、以及其他政府部門合作，共同推動氫能管線安全的研究和標準制定工作。

1.6 歐洲混氫天然氣管線及發展

在歐洲，清潔能源的使用可為國際氫能使用的領先者。DNV（挪威船級社）在混氫天然氣管線輸送領域進行了廣泛的研究，DNV 也制定了相關的標準和指南，確保氫氣在現有和新建天然氣基礎設施中安全可靠地輸送。本次研討會中 DNV 提出的報告內容概述如下：

- 材料相容性: DNV 對於氫氣與不同管線材料（特別是鋼材）的相容性進行深入研究，以評估氫脆（Hydrogen Embrittlement）的風險。氫脆可能導致管線材料的強度和延展性下降，增加洩漏或破裂的風險。

- 管線的再利用 (Repurposing): 由於新建氫氣管線成本高昂，DNV 重視研究將現有的天然氣管線改善用於輸送氫氣或混氫天然氣的可行性。這包括評估現有管線的完整性、需要進行的更新以及相關的成本效益。

- 安全風險評估: DNV 開發了結構化的風險評估流程，以應對氫氣在設備、材料、建築物和周邊環境中帶來的特定危險。這包括洩漏檢測、緊急應變和風險減緩策略。

- 混合比例的影響: DNV 研究不同氫氣混合比例對現有天然氣管線系統的影響，包括管線材料、壓縮機、測量設備以及終端用戶設備的適用性。

- 全尺寸測試: DNV 在其位於英國 Spadeadam 的研究測試中心建立了高壓氫氣測試設施，進行全尺寸的管線和設備測試，以驗證氫氣輸送的安全性與可靠性。該設施能夠模擬天然氣網絡中的各種運行條件，並測試不同氫氣混合比例下的性能。

- 國際合作: DNV 與全球的能源公司、研究機構和政府部門如 PHMSA 合作，共同推動氫能技術的發展和標準的制定。

DNV 對於管線輸送氫能氣體制定了一系列標準、指南和推薦指導 (Recommended Practices)，以確保氫氣和混氫天然氣的安全輸送。

- DNV-SE-0657: Re-qualification of pipeline systems for transport of hydrogen and carbon dioxide: 該標準提供了對現有管線系統進行重新評估以輸送氫氣和二氧化碳

的指南，涵蓋了評估過程、安全要求和必要的更新措施。

- Transportation of hydrogen gas in offshore pipelines: H2Pipe (Joint Industry Project): DNV 進行了一項產業間合作共同研究項目，旨在開發世界上首個關於在現有和新建海上管線中輸送氫氣的指南。

- DNV-ST-J301: 該標準的內容及要求超越 ISO 22734 的要求為氫能系統的設計和安全提供更保守但依然可以執行的指導。

- Repurposing onshore pipelines for hydrogen: Guiding operators through the re-evaluation process (Whitepaper): 探討了將陸上天然氣更新改造用於氫氣輸送的研究進展、現有標準以及業界面臨的挑戰，並提供了一個評估更新既有管線可行性的流程。

- Navigating hydrogen standards (Article): DNV 強調了氫能產業發展中標準的重要性，並介紹了 DNV 在制定相關標準和指南方面的工作。

1.6.1 DNV 正在進行的研究項目:

- 英國 FutureGrid 項目: DNV 正在與英國國家天然氣輸送公司 (National Gas Transmission, NGT) 合作，在其 Spadeadam 設施中建立世界首個氫氣管線研究設施，測試高達 100% 氫氣在現有天然氣管網中的安全可靠輸送能力。

- 加拿大氫氣混合可行性研究: DNV 正在為加拿大的 Enbridge 和 FortisBC Energy 進行氫氣混合可行性研究，以確定現有天然氣管線基礎設施可以安全輸送的氫氣比例，並為制定相關的規範和標準及基礎。

- 韓國氫氣混合可行性評估: DNV 受韓國天然氣公司(KOGAS) 委託，評估將氫氣混合到韓國國內天然氣輸送網絡中的可行性，包括管線的適用性、氫氣注入設施的建設和運營以及相關的監管要求。

由報告中似乎看到 DNV 在混氫天然氣管線輸送領域扮演著重要的角色，其研究工作涵蓋了材料科學、管線完整性、安全風險評估以及標準制定等多個方面，為安全有效地利用現有天然氣基礎設施輸送低碳氫氣做出了重要貢獻。DNV 在混氫天然氣管線輸送領域的研究重點涵蓋了多個關鍵方面，概述如下：

1.6.2 材料相容性(Material Compatibility)與氫脆(Hydrogen Embrittlement):

氫氣容易滲透到金屬材料的晶界中，與金屬原子相互作用，尤其是在高壓環境下。這種相互作用可能導致氫脆現象，使得金屬材料的延展性和抗拉強度降低，

增加管線發生裂紋、洩漏甚至斷裂的風險。不同的鋼材種類、製造技術、焊接技術以及管線的使用年限都會影響其對氫脆的敏感性。對各種常用於天然氣管線的鋼材，DNV 進行了廣泛的測試和分析，評估它們在不同氫氣濃度和壓力下的氫脆敏感性。這包括碳鋼、低合金鋼、以及一些不鏽鋼。深入理解氫原子與金屬微觀結構的交互作用機制，以更準確地預測和評估氫脆的風險。研究壓力、溫度、氫氣純度、應力狀態等因素對氫脆的影響程度，為管線的設計提供依據。DNV 研究開發預防氫脆的措施，例如選擇合適的材料、控制焊接品質、優化陰極保護策略，以及在必要時進行管線的退火處理等。

1.6.3 管線的再利用 (Repurposing of Pipelines)

全新鋪設氫氣管線的成本非常高昂且耗時。因此，將現有的天然氣管線改造用於輸送氫氣或混氫天然氣被認為是一種更經濟高效的途徑。然而，這需要仔細評估現有管線的狀況是否適合輸送氫氣。DNV 開發了評估現有天然氣管線是否適合輸送氫氣的流程和標準，包括對管線的材料、焊接、腐蝕狀況、設計壓力等進行詳細檢查和測試。DNV 制定了關於天然氣管線再利用的標準和指南，例如 DNV-SE-0657，指導運營商安全有效地完成改造過程。

1.6.4 安全風險評估 (Safety Risk Assessment):

氫氣具有易燃、易洩漏、以及燃燒速度快等特性，與天然氣相比，其安全風險有所不同，因此混氫天然氣管線的運行進行全面的安全風險評估至關重要。基於此一重要性 DNV 開發了模擬氫氣和混氫天然氣洩漏後的擴散行為模型，考慮了氫氣的低密度和高擴散性，以便更準確地預測危險區域，也研究不同氫氣混合比例下，氣體的燃燒特性、爆炸極限、以及火焰傳播速度，評估潛在的火災和爆炸風險。DNV 開發了系統的風險識別和評估方法，例如 HAZID (Hazard Identification) 和 HAZOP (Hazard and Operability Study)，用於識別混氫天然氣管線運行中可能出現的危險和操作問題。

1.6.5 混合比例的影響 (Impact of Blending Ratios):

在現有天然氣管線中混合不同比例的氫氣，會對管線的運行、終端用戶的設備、以及整體的能源系統產生影響。了解這些影響對於安全有效地推廣混氫技術相當重要。

研究不同氫氣混合比例對管線的壓力降、流量特性、以及壓縮機性能的影響；

評估現有的天然氣計量設備是否適用於混氫天然氣，以及是否需要開發新的計量和監測技術；研究不同氫氣混合比例對家用燃氣器具（如鍋爐、爐具）和對工業用燃燒設備的影響，確定哪些設備可以直接使用混氫氣，哪些需要進行更新或更換；分析氫氣混合對天然氣燃燒特性的影響，例如火焰穩定性、NO_x 排放等；評估不同氫氣混合比例的氣體與現有天然氣的互換性，確保用戶設備的安全和正常運行。

(二) 二氧化碳管線完整性

本次參加研討會另一目的是學習及深入了解輸送二氧化碳氣體管線的安全及限制。

氣候變遷是當前全球面臨的最嚴峻挑戰之一，對生態環境、經濟發展和社會穩定都帶來了巨大的威脅。減少溫室氣體排放是應對氣候變遷的核心，而碳捕捉、利用與封存（CCUS）技術被認為是實現大規模減排的重要手段之一。CCUS 技術透過捕捉工業生產過程中產生的二氧化碳，並將其輸送到地質構造中進行封存，從而有效地減少二氧化碳向大氣中的排放。隨著全球氣候變遷的日益嚴峻，碳捕捉、利用與封存（CCUS）技術作為一項重要的減碳手段受到了廣泛關注。二氧化碳的管線輸送是 CCUS 產業鏈中不可或缺的環節，其安全性和可靠性對於 CCUS 技術的推廣應用至關重要。本次研討會中對二氧化碳管線的安全或完整性篇章不多，因此報告也綜合了多部份關於二氧化碳管線運輸的研究成果，深入探討了二氧化碳管線運輸的背景與挑戰、地下管線在 CCUS 中的重要性、二氧化碳的最佳輸送方式、二氧化碳輸送時雜質的分類及影響、二氧化碳管線運輸的安全與風險分析、二氧化碳輸送規範的製定及指南、二氧化碳管線洩漏案例分析以及未來二氧化碳管線運輸的安全與風險分析、二氧化碳輸送規範的發展向。

二氧化碳管線運輸面臨的挑戰，包括二氧化碳的物理化學特性、雜質的影響以及腐蝕等問題。地下管線在 CCUS 中為的輸送方式之候選項目之一，也就是說不同二氧化碳輸送方式各有其優缺點。本報告中討論了二氧化碳流體中可能存在各種雜質的分類、雜質來源及其含有雜質的二氧化碳輸送對管線材料的影響，並對應力腐蝕開裂、水合物形成等潛在風險進行了評估。為了確保二氧化碳管線的安全，介紹了二氧化碳管線運輸的安全風險分析方法、二氧化碳管線運輸規範的

制定。也根據美國運輸部 (DOT) PHMSA 資料庫中二氧化碳管線洩漏案例的分析、二氧化碳管線運輸的實務經驗，介紹未來的二氧化碳管線輸送的建議。

2.管線運輸的背景與挑戰

2.1 二氧化碳管線運輸規範

在各種二氧化碳運輸方式中，管線運輸以其輸送能力大、運作成本低、環境影響小等優勢，成為大規模、長距離二氧化碳運輸的首選方式。二氧化碳管線運輸規範的製定是確保二氧化碳管線安全可靠運作的重要基礎。不同的國家和地區，以及不同的組織機構，都制定了相應的二氧化碳管線運輸規範和指南。這些規範和指南涵蓋了二氧化碳的組成要求、管線材料的選擇、管線的設計、建造、運作和維護等多個面向。

DNV-RP-F104 (2021)是 DNV 發布的關於二氧化碳管線運輸的建議實務。該規範提供了在 CC(U)S 背景下預期的典型二氧化碳組成的指導，並詳細說明了二氧化碳中可能影響管線運輸的各種雜質成分，以及這些雜質對陸上和海上管線的安全性、完整性和可操作性的影響。DNV 於 2023 年設立了一個新的聯合業界共同研究計畫，旨在根據二氧化碳運輸領域的最新研究成果和經驗，對當前的二氧化碳規範建議進行修訂，以促進二氧化碳規範的製定。

2.2 二氧化碳運輸方式

二氧化碳的運輸方式有多種，包括管線運輸、船舶運輸、鐵路運輸和公路運輸。不同的運輸方式各有其特點和適用範圍，選擇合適的運輸方式對於降低二氧化碳運輸成本、提高運輸效率以及減少環境影響至關重要。

管線輸送是目前應用最廣泛的、也是被認為最具發展潛力的二氧化碳運輸方式。它具有輸送能力大、運作成本低、環境影響小等優點，適用於大規模、長距離的二氧化碳運輸。船舶運輸在海上二氧化碳運輸上具有優勢，可實現大規模二氧化碳的遠距離運輸。然而，船舶運輸受天氣和海況的影響較大，運輸的穩定性和可靠性相對較差。鐵路運輸是一種較靈活的二氧化碳運輸方式，可依需求調整運輸路線。但鐵路運輸的輸送能力有限，運輸成本相對較高。公路運輸是最靈活的二氧化碳運輸方式，但其輸送能力最小，運輸成本最高，只適用於小規模、短距離的二氧化碳運輸。

2.3 二氧化碳管線材質

管線材質的選擇是二氧化碳管線設計的關鍵問題。由於二氧化碳在有水的情況下會形成具有腐蝕性的碳酸，因此管材需要具備良好的耐腐蝕性。此外管線材料還需要具備足夠的強度和韌性，以承受二氧化碳的輸送壓力和溫度。

碳鋼是二氧化碳管線建設中最常用的材料，因為它具有成本低、強度高等優點。然而，碳鋼在二氧化碳環境中存在腐蝕的風險，特別是在存在水和某些雜質的情況下。因此，需要採取有效的腐蝕控制措施，如添加腐蝕抑制劑、採用管內塗層等，以確保碳鋼管的安全運作。

除了碳鋼之外，一些合金鋼和不銹鋼也被用於二氧化碳管線的建造。這些材料具有更好的耐腐蝕性能，但成本也相對較高。在實際工程中，需要綜合考慮材料的成本、性能、適用範圍等因素，選擇最適合的管材。

2.4 二氧化碳管線運輸的挑戰

二氧化碳管線運輸面臨許多挑戰，這些挑戰主要來自於二氧化碳的物理化學特性、二氧化碳流體中的雜質以及二氧化碳運輸過程中的安全風險。

2.4.1 的物理化學特性上，二氧化碳在不同的溫度和壓力條件下會呈現不同的相態，這對管線的設計和運作帶來了複雜性。例如，超臨界二氧化碳具有密度接近液體、黏度接近氣體的特性，這使得其在管線中的流動行為與傳統的液體或氣體不同。但是二氧化碳流體中常含有各種雜質，如水、硫化氫、二氧化硫、氮氧化物等。這些雜質可能對管線材料產生腐蝕，降低管線的強度和韌性，甚至導致管線失效。一旦管線出現損傷，形成二氧化碳的洩漏可能對環境和人體健康造成潛在的風險。高濃度的二氧化碳會取代空氣中的氧氣，導致人員窒息。此外二氧化碳的洩漏還可能引發其他安全事故，如火災和爆炸。

2.4.2 氣體中雜質是形成管線安全危害風險的來源，二氧化碳流體中的雜質來自二氧化碳的捕捉過程。不同的二氧化碳捕捉技術和不同的捕捉對象，會導致二氧化碳流體中的雜質種類和含量差異很大。二氧化碳可以捕捉的來源有從化石燃料燃燒產生的煙氣中捕捉的二氧化碳，可能含有 SO_x、NO_x、顆粒物等雜質；從水泥、鋼鐵、化學等工業工廠生產過程中捕捉的二氧化碳，氣體中可能含有製程所產生的特定雜質；天然氣的使用及處理過程中捕捉的二氧化碳，此種二氧化碳可能含有 H₂S 等雜質；從生物質燃燒過程中捕捉的二氧化碳，此種二氧

化碳可能含有有機酸等雜質；另外從空氣中直接捕捉的二氧化碳，純度較高，雜質含量則相對較低。

2.4.3 碳流體中雜質的性質和對二氧化碳管線的影響，可以將二氧化碳流體中的雜質分為以下幾類：

- 酸性雜質：如二氧化碳, SO_x , NO_x 等，這些雜質溶於水後會形成酸，對管線產生腐蝕。
- 腐蝕性氣體：如 H_2S ，即使在無水條件下，也會對某些金屬產生腐蝕。
- 引起應力腐蝕開裂(SCC)的物質：如 CO ，某些濃度會促進鋼的應力腐蝕開裂。
- 惰性氣體：如 N_2 , Ar 等，這些氣體不會與管材發生反應，但會降低二氧化碳的輸送效率。
- 水：水是二氧化碳管線中最常見的雜質，它會與二氧化碳反應生成碳酸，從而對管線產生腐蝕。
- 氧氣(O_2)

氧氣會促進金屬的氧化反應，進而加速管線的腐蝕。氧氣也會與某些雜質反應，生成更具腐蝕性的物質。

對於二氧化碳流體中雜質控制在安全的前提題下就必須要對二氧化碳流體中的雜質進行嚴格的控制，例如在二氧化碳進入管線之前，需要採用適當的技術來去除其中的雜質。常用的雜質去除技術包括吸收、吸附、膜分離，其次需要製定嚴格的二氧化碳品質標準，規定各種雜質的允許含量。

3.二氧化碳管線運輸的背景與挑戰

3.1 二氧化碳管線的經濟性

二氧化碳管線的建造和營運成本是影響 CCUS 計畫經濟性的重要因素。管線建造成本主要包括材料成本、施工成本、土地購置成本等，而營運成本則包括能源消耗成本、維護成本、管理成本等。管線的輸送能力是影響其經濟性的關鍵參數。輸送能力越大，單位輸送成本越低，規模經濟越明顯。因此在二氧化碳管線的設計中，需要綜合考慮二氧化碳的捕捉量、輸送距離、輸送壓力等因素，以實現最佳的經濟效益。

此外管線的利用率也是影響其經濟性的重要因素。管線的利用率越高，分攤

到單位二氧化碳輸送量的成本越低。因此在二氧化碳管線的規劃中，需要充分考慮未來的二氧化碳輸送需求，以提高管線的利用率。

3.2 二氧化碳管線運輸的可持續性

二氧化碳管線運輸的可持續性是二氧化碳管線建設和運作中需要考慮的重要議題。永續性包括環境永續性、經濟永續性和社會永續性。二氧化碳管線的建設和運作需要盡可能減少對環境的影響。這包括減少土地佔用、降低能源消耗、減少溫室氣體排放、防止土壤和水污染等。二氧化碳管線的建設和運作需要具有經濟上的可行性。這包括降低建設和營運成本、提高管線利用率、實現合理的投資回報等。在社會永續性方面，二氧化碳管線的建設和運作需要得到社會的支持和認可。這包括保障公眾健康與安全、尊重當地居民的權益、促進當地經濟發展等，此項於本國應該是最為困難的一步。為達此一目標，需要在管線的設計、建造和運作過程中綜合考慮環境、經濟和社會因素，並採取相對應的措施及回饋。

4. 地下管線在 CCUS 中的重要性

地下管線是 CCUS 技術中二氧化碳運輸的關鍵基礎設施。它們連接二氧化碳的捕捉設施和封存地點，實現了二氧化碳的大模距離運輸。沒有完善的地下管線網絡，CCUS 技術的規模化應用將受到極大的限制。以地下管線輸送實現二氧化碳的大規模運輸，可滿足 CCUS 計畫對二氧化碳運輸量的需求，管線運輸的運作成本相對較低，可降低二氧化碳的運輸成本，提高 CCUS 計畫的經濟性。在管線地下輸送時，因管線運輸的二氧化碳洩漏率較低，減少二氧化碳運輸的環境影響。

若要使 CCUS 為未來的關鍵產業，地下管線不僅是二氧化碳運輸的基礎設施，完善的地下管線網路也是促進 CCUS 產業發展的重要因素，吸引投資：降低二氧化碳運輸成本，提高 CCUS 計畫的經濟性，進而吸引更多的投資進入 CCUS 領域。也因如此為 CCUS 技術的研發與應用提供平台，促進相關技術創新與產業升級。

4.1 地下管線的規劃

地下管線的規劃是二氧化碳管線建設的重要環節。合理的管線規劃可以降低建造成本、提高輸送效率、減少環境影響。地下管線的規劃需要考慮二氧化碳的捕捉量和封存量，使管線的輸送能力需要與二氧化碳的捕捉量和封存量相符；管線的輸送距離和路徑需要綜合考慮地形條件、土地利用、環境敏感區等因素；管

線的輸送壓力和溫度需要根據二氧化碳的相態和輸送效率來決定。

4.2 二氧化碳管線地下管線的建設

輸送二氧化碳地下管線的建造較一般管線更為複雜過程，包括管線的選材、設計、施工、安裝、測試等環節。在二氧化碳管線的建設中，需要特別注意管線材料的選擇：，即擇具有良好耐腐蝕性能和機械性能的管線材料；採取有效的防蝕措施，如塗層、陰極保護等，以延長管線的使用壽命。二氧化碳的品質對管線的焊縫影響極大，因此在管線的焊接要採用合適的焊接技術，確保焊道的品質；完工時要進行嚴格的管線測試，如水壓試驗、氣密性測試等，以確保管線的安全可靠性。

4.3 二氧化碳管線的運作與維護

地下管線的運作和維護是確保二氧化碳管線長期安全運作的重要環節。包括定期對管線進行巡檢(巡管)，及時發現和處理管線的異常情況；對管線的腐蝕情況進行監測，並採取相對應的防蝕措施。由於二氧化碳無色無味，亦不會燃燒出現火焰，一旦洩漏，可使人窒息，因此應該採用先進的洩漏檢測技術，及時發現並定位管線的洩漏。

(三)、交流干擾對管線腐蝕的影響與改善策略

隨著電力輸送網絡的擴張與再生能源併網需求的增加，高壓交流輸電線路（HVAC）與地下管線共用路徑現象日益普遍。然而，高壓輸電力線路運行時產生的電磁場會在鄰近金屬管線上誘導交流電壓與電流，進而引發交流干擾腐蝕（AC Corrosion）。此類腐蝕不僅威脅管線結構完整性，還可能導致安全事故。根據國際標準（如 ISO 18086），管線的交流電流密度需控制在 30 A/m²以下，電壓需低於 15 V（穩態條件）。

近年來，多項研究針對交流干擾的成因、監測技術及減緩策略進行探討。由於本公司在檢測管線時發現管線受到了不同程度影響，因此也特別參加三篇會議文獻的聽講及討論（C2025-00427、C2025-00381、C2025-00076），三篇內容包含交流干擾腐蝕的關鍵問題分析、現有技術的成效，並提出具體改善措施，以應用於受到干擾時管線管理實務。

3.1 交流干擾腐蝕的機理與風險

● 成因與影響

交流干擾腐蝕主要源於以下機制：

- 電磁感應：高壓輸電線路的交變電流在鄰近管線上誘發縱向電壓，形成交流電流。
- 電容耦合：管線與輸電線路之間的電容效應導致暫態電流累積。
- 傳導干擾：低土壤電阻率（如潮濕或含鹽土壤）因高壓電的不平衡電流或突波電流，因接地的特性，加劇電流洩漏，加速管線腐蝕。

若未有效控制，交流干擾可能導致局部腐蝕：高電流密度（如 $>100 \text{ A/m}^2$ ）使管線塗層缺陷處發生電化學腐蝕；管線觸摸電壓超標的安全風險（如 $>15 \text{ V}$ ）威脅人員安全；監測成本增加：減緩系統的電容效應，縮短陰極保護測量週期，降低檢測效率。

雖然對於交流干擾的管線失效案例並不常見，三篇論文分別提出講者所檢測的實例

- 新建 500 kV 輸電線路導致天然氣管線交流電流密度超標（最高 $1,500 \text{ A/m}^2$ ）。其解決方案是安裝平行鋅帶導線（25 英里）與 DC 去耦器，並在輸電線走廊外增設 4,500 英尺地下裸銅導線以抵消感應電壓，此法使管線感應電流密度降至 30 A/m^2 以下，改善的結果及檢測驗證顯示有效。
- 法國某能源走廊的三條天然氣管線受 225 kV 輸電線干擾，交流電壓達 200 V。其解決方案是調整輸電線相位排列（Phase Permutation），使感應電場相互抵消，結果感應電壓降低 4 倍，電流密度減少 80%，但需中斷輸電線運作，因此實施的難度高。

根據文獻案例，雖可作為參考的方案，對於管線面臨的交流干擾風險在預測有干擾機會時進行預防措施，具體改善措施與實務建議如下：

3.1.1 優化交流干擾減緩系統設計

- 分層減緩策略：

初級減緩：安裝平行導線與 DC 去耦器，降低縱向感應電壓。

次級減緩：在輸電線走廊外增設反向導線（Cancellation Wire），抵消殘餘電壓（圖 1）。

局部強化：針對低土壤電阻率區域，採用梯度控制墊（Gradient Control Mats）

分散電流。

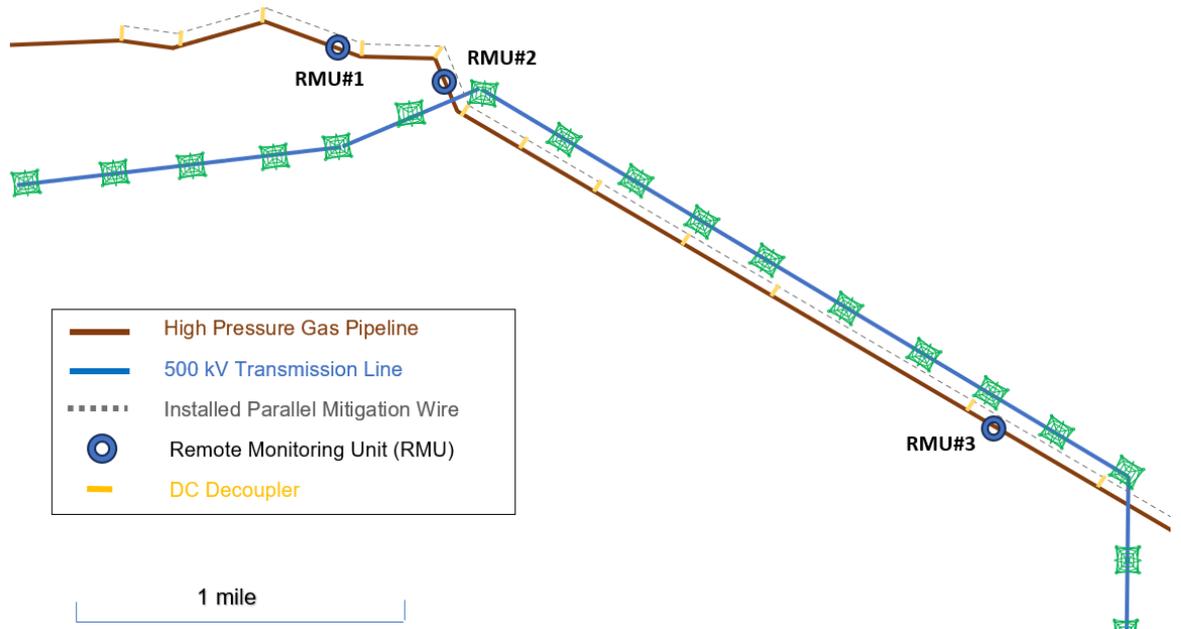


圖 1 反向導線（Cancellation Wire）的安裝(虛線)

- 動態模型驗證：

二篇論文均結合實地測量(如 Wenner 四電極法)與數值模擬(如 CRINOLINE Tool)，更新土壤分層模型與塗層參數，提高預測精度。

3.1.2 去耦器技術升級與設備替換

- 採用低電容去耦器，替換傳統 SSD 為新型 PCRX 解耦器，減少電容效應，縮短 CP 測量週期，優先替換高影響因子設備(如塗層劣化段)。

3.1.3 相位排列優化

與電力公司合作，評估輸電線相位調整可行性，利用對稱佈局降低感應電場。

3.1.4 強化監測與數據整合

- 遠端監測單元(RMU)安裝：

即時追蹤電流密度、管線電壓與腐蝕速率，建立預警限值(如 AC 密度 $>50 \text{ A/m}^2$ 觸發監測)，整合腐蝕試片(1 cm² Coupon)與電阻腐蝕量測技術，量化腐蝕速率(圖 2)。

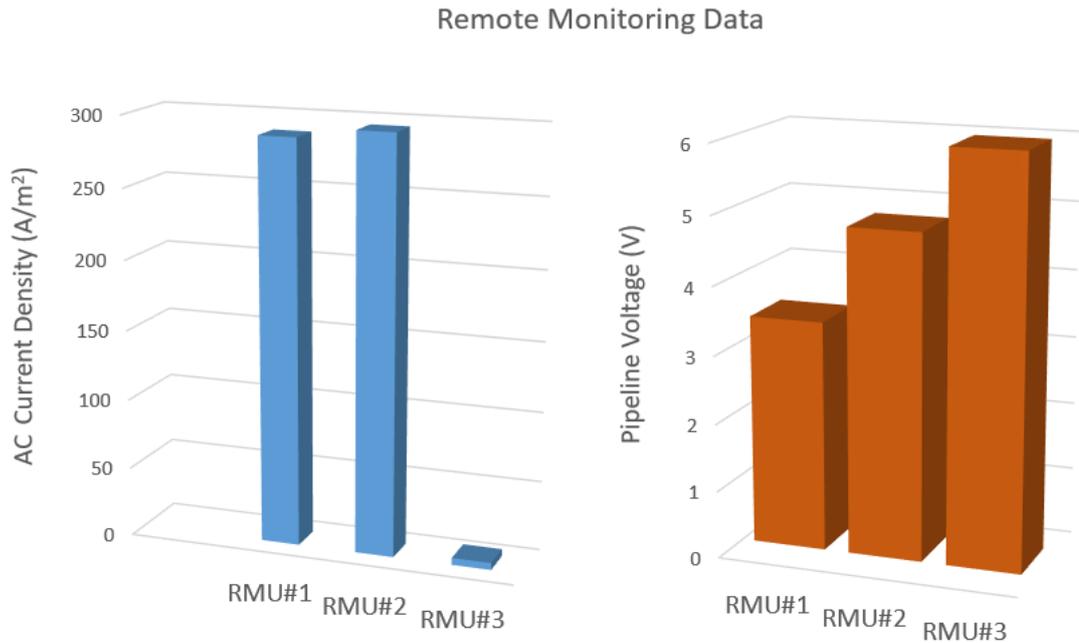


圖 1 遠端監測單元整合腐蝕試片與電阻腐蝕量測結果

- 週期性土壤檢測：

每年雨季後執行土壤電阻率測量，識別環境變化對減緩系統的影響。

3.1.5 跨領域合作與標準化

- 成立聯合工作小組：

管線與電力公司共同制定共同走廊設計規範，預留減緩措施空間（如輸電線相位調整緩衝區），參考 EN 50443 與 NACE SP0177 標準，統一風險評估流程。

3.1.6 案例經驗共享：

由於交流腐蝕的發生所展現案件不多，可是一旦受到超過限值，管線的腐蝕將加劇，危害極快極大，因此對於高壓交流電的干擾，各單位及機構宜建立交流干擾數據庫，收集土壤參數、減緩方案成效，相互支援未來專案決策。

交流干擾腐蝕是管線安全管理中的複雜挑戰，需結合技術創新、動態監測與跨領域協調。本文綜整三篇文獻的實證經驗，提出分層減緩、設備升級、數據驅動監測等具體策略。未來研究方向應聚焦於：

- 智慧減緩系統：開發自適應調控導線，動態抵消感應電壓。
- 標準化模型工具：推廣數值模擬軟體，降低分析門檻。
- 政策制定：推動法規強制要求電力與管線公司共路徑前干擾評估。

透過上述措施，可顯著降低交流干擾風險，確保管線系統的長期安全與經濟效益。

(四)、混氫天然氣及二氧化碳輸送管線交流干擾的複合危害風險與因應策略

本公司擁有長達 7000 公里的管線，其中大部分佈設於城市或人口稠密區域。近年來，氣候變遷和溫室氣體效應日益顯著，這使得本公司的管線未來可能需要輸送不同比例的氫氣天然氣混合物以及碳捕獲的二氧化碳氣體。此外管線所處的地理環境也帶來了額外的挑戰，包括位於工業及科技發達地區，以及部分管線與高壓交流電力系統共用路徑。儘管目前管線已採用防蝕包覆及陰極防蝕系統進行保護，但在輸送新型氣體組合以及受到高壓交流電力系統干擾的情況下，管材仍可能遭受潛在的損傷，而交流干擾下的腐蝕更可能對管線造成嚴重的危害。本報告旨在深入分析輸送不同比例氫氣的天然氣、二氧化碳氣體及管線在交流干擾下各自可能產生的危害，以及共同作用下的危害加成程度。

4.1 氫氣天然氣混合物輸送的潛在危害

4.1.1 氫脆現象：當氫氣滲入金屬材料時，會導致氫脆現象，或稱為氫攻擊裂紋。

氫的擴散會降低材料的強度和延伸率，進而增加管線產生起泡或裂紋的敏感性。雖然所有鋼管都可能受到氫脆的影響，但一般而言，高強度鋼（降伏強度 >100 ksi）更易於發生氫脆。低強度鋼通常只會損失延伸率。氫氣濃度和內部壓力波動是影響氫脆發生可能性的關鍵因素。現有的天然氣基礎設施管線大多採用低強度鋼管，這些材料發生氫脆的風險相對較低。然而，如果管線中存在類似裂紋的缺陷，則氫氣可能會加速這些缺陷的擴展。因此，在引入氫氣之前進行管線檢查以確保沒有缺陷存在至關重要。同時可能需要增加維護和檢查的頻率以及增強檢查的嚴格程度，以確保氫氣輸送的安全性。值得注意的是，輸送的氣體中若含有二氧化碳，可能會促進材料的氫脆現象。

4.1.2 氫氣洩漏：氫分子比甲烷分子小，這意味著透過管線接頭和管壁洩漏的可能性增加。甲烷也會發生洩漏，但在天然氣基礎設施中常用的管線中，氫的滲透速率是甲烷的四到五倍。在鋼管中洩漏更常發生在螺紋連接、機械接頭以及閥

件和儀器等管線組件處。隨著氫氣比例的增加，必須評估並可能更換管件、密封件、閥門和控制閥的適用性及其洩漏傾向。可能需要更多洩漏檢測監測和感測系統。

4.1.3 對管線組件的影響：隨著氫氣比例的增加，流量控制閥、壓力調節器等可能需要調整或更換。由於氫氣的熱值和體積流量特性，現有天然氣基礎設施的管線尺寸對於混合氫氣的流動應該足夠，僅能量密度略有降低。隨著氫氣混合比例的增加，所需的管線天然氣壓縮機的驅動功率將會增加。對於 100% 的氫氣，壓縮機的驅動功率將比天然氣增加了三倍。

4.2 二氧化碳氣體輸送的潛在危害

4.2.1 二氧化碳腐蝕：二氧化碳與水反應會形成碳酸 (H_2CO_3)，碳酸對碳鋼基礎設施具有腐蝕性。腐蝕速率受溫度、操作壓力、流動條件、水化學和二氧化碳分壓的影響。在濕氣系統和積水區域，腐蝕風險會增加。可能發生局部腐蝕，如點蝕、均勻腐蝕和流動時的沖蝕。捕獲的二氧化碳氣流中的雜質，如水、硫氧化物、氮氧化物和氧氣，會顯著加速腐蝕速率。即使是低濃度的雜質，如二氧化硫和二氧化氮，也可能導致形成具有高度腐蝕性的酸性物質 (H_2SO_4 和 HNO_3)。

4.2.2 材料相容性：純淨乾燥的二氧化碳通常被認為對碳鋼無腐蝕性。然而水的存在是腐蝕的主要問題。

4.2.3 操作的挑戰：二氧化碳釋放的風險包括因其比空氣重而導致的窒息。釋放時可能發生快速由液體到氣體和乾冰形成的相變，導致基礎設施脆化風險和冷蒸汽雲生成。高操作壓力（密相輸送壓力相通常高於 100Bar）可能對設計壓力較低的現有輸油及輸氣管線構成風險。

5. 交流干擾下的潛在危害

- 來自附近高壓電力線的交流干擾會在地下管線中感應出電流，導致加速腐蝕，即使在陰極保護存在的情況下也是如此。
- 交流腐蝕的機制包括陽極溶解和土壤環境的潛在鹼化。
- 交流干擾會透過改變直流電位來損害陰極保護系統的效力。
- 交流干擾會與氫脆產生加成效應，交流電會增加鋼材氫吸收。
- 交流干擾可能透過破壞保護層或促進離子遷移增強二氧化碳腐蝕。

四、心得與建議

氫氣、二氧化碳和交流干擾的共同存在可能引起危害的加成，可能會對管線鋼材造成高度侵蝕性的環境，導致腐蝕效應的協同加劇。二氧化碳的存在可能會促進氫脆或脆化。交流干擾會加速腐蝕速率並增加鋼材的氫吸收。這種多重應力因素的組合可能會顯著降低管線的完整性和使用壽命，增加洩漏和故障的風險。

4.1 目前的研究

目前有許多正在進行的研究項目和試驗計劃，評估將氫氣摻入天然氣管線的可行性和安全性。這些研究主要集中在材料的相容性、洩漏風險以及對現有管線基礎設施和終端用戶設備(家用戶)的影響。針對二氧化碳的運輸，研究主要集中在腐蝕機制、材料選擇以及確保長距離高壓運輸的安全措施。交流干擾對地下管線腐蝕的影響也受到廣泛關注。然而，針對氫氣、二氧化碳和交流干擾聯合作用下的管線完整性研究可能仍處於發展初期，需要更多實驗和現場測試工作全面了解這些複雜的相互作用。

4.2 國際間的參考做法

世界各國在氫氣和二氧化碳管線運輸方面採取了不同的方法。一些國家正在積極探索將氫氣摻入現有天然氣網路作為能源轉型的手段。例如歐洲的一些國家已經制定了氫氣摻混的標準和測試項目。對於純氫氣的運輸，正在開發新的專用管線，並對現有的天然氣管線進行改造以適應氫氣的特性。在二氧化碳運輸方面，北美在利用管線進行提高石油開採率方面擁有豐富的經驗。歐洲也在積極發展二氧化碳捕捉和儲存的基礎設施，包括長距離輸送管線。在人口稠密地區，國際間則是強調管線的選線應盡可能遠離人口集中區域，並採用嚴格的設計標準和安全措施。

4.3 可能的改善方案及步驟

針對本公司的管線環境，建議採取以下改善方案及步驟：

4.3.1 詳細的材料評估：對整個 7000 公里的管線網路進行詳細的材料評估，以確定

鋼材的等級、焊接類型以及是否存在任何已知的缺陷。這將有助於識別哪些管段可能更容易受到氫脆或二氧化碳腐蝕的影響。

4.3.2 全面的交流干擾檢測：在所有管線路徑上，特別是在與高壓電力系統共用路徑的區域，進行全面的交流干擾研究，以圖資化交流電壓和電流密度的分佈圖，這將有助於確定交流干擾的高風險區域，並為後續的減緩措施提供依據。

4.3.3 加強腐蝕監測：實施更頻繁和更嚴格的管線檢查，特別是對於輸送氫氣混合物的管線。採用先進的非破壞檢測（NDE）技術，如超音波檢測和磁粒檢測，以檢測缺陷並評估材料的完整性。對於輸送二氧化碳的管線，加強內部腐蝕監測計劃，使用腐蝕試片、電阻探頭(ER Probe)和超音波測試等方法。

4.3.4 優化陰極保護系統：評估現有的陰極保護系統在氫氣和二氧化碳環境下的有效性，並考慮交流干擾的影響。在交流干擾嚴重的區域，可能需要更負的保護電位或專門的控制策略。

4.3.5 實施交流干擾減緩措施：在交流干擾高風險區域，實施交流減緩措施，如安裝平行的接地導體、梯度控制網(Gradient Mat)和直流去耦器。

4.3.6 升級洩漏檢測系統：升級洩漏檢測監測和感測系統，考慮到氫氣更快的滲透速率。實施壓力、流量和氣體成分的即時監控系統。利用先進的洩漏檢測技術，包括音頻感測器和無人機熱影像檢測，無人機檢測技術計畫在 115 年建立。

4.3.7 制定具體的操作規定和緊急應變程序：針對氫氣混合物和二氧化碳的輸送，制定並實施具體的操作和維護規定，充分考慮到獨特的危害。制定專門針對人口稠密地區氫氣和二氧化碳洩漏事件的緊急應變計劃。

4.3.8 分階段進行材料升級：根據風險評估的結果，優先考慮對管線網路的高風險部分進行材料升級，例如，對於輸送氫氣的部分考慮使用抗氫脆能力更強的低強度鋼，以及對於容易發生二氧化碳腐蝕的區域考慮使用耐腐蝕合金鋼。

4.3.9 定期審查和調整：建立管線完整性管理計劃的定期審查和查核流程，以確保其有效性，並根據研究、攫取國際最佳實務指南以及公司內部的具體操作經驗進行調整。

五、結論

輸送氫氣天然氣混合物和捕捉的二氧化碳氣體，尤其是在存在交流干擾的人

口稠密地區，對本公司的管線基礎設施的確是複雜的挑戰。透過採取積極主動和多方面的管線完整性管理方法，包括詳細的材料評估、全面的交流干擾研究、加強腐蝕監測、優化陰極保護、實施交流干擾減緩措施、升級洩漏檢測系統、制定具體的操作規程和緊急應變程序以及分階段進行材料升級，本公司將可以確保其管線的安全及可靠營運，同時適應不斷比例的能源變化，持續學習和根據最新研究，做好最佳調整策略，以期在未來的能源轉型的長期奮鬥取得成功。

(六) 附件



附圖一 美國田納西州納許維爾會議中心展覽會場



附圖二 2025 AMPP 各專題研討會會場



附圖三 2025 AMPP 研討會台灣參加人員合影

Chemical reactions in CO₂

- o H₂O (electrolyte)
- o H₂S (strong reducing agent)
- o SO₂ (reducing/oxidizing agent)
- o O₂ (oxidizing agent)
- o NO₂ (strong oxidizing agent)

Other molecules not included

Reducing:
CO, H₂, NH₃,...

Oxidizing:
F, Cl, H₂O₂,...

Chemical kinetics

- o H₂S + NO₂ (strongest "chemical chain" reaction)
- o Temperature effects
- o Time

Acids/H-donors:
HCl, HCN, MeOH, HAc

Thermodynamics (equilibrium calculations)

Number	Chemical reactions	Gibbs Energy ΔG (kJ mol ⁻¹)			
		80 °C	25 °C	4 °C	-25 °C
1	SO ₂ + H ₂ O + NO ₂ → NO + H ₂ SO ₄ ↓	-531.7	-545.5	-551.0	-558.7
2	H ₂ S + 3NO ₂ → SO ₂ + H ₂ O + 3NO	-165.2	-149.7	-143.9	-135.9
3	2NO + O ₂ → 2NO ₂	-64.5	-72.6	-75.7	-79.7
4	3NO ₂ + H ₂ O → 2HNO ₃ ↓ + NO	24.4	15.3	11.8	7.0
5	H ₂ S + ½O ₂ → H ₂ O + S (solid) ↓	701.8	701.8	701.8	701.8

附圖四 管線二氧化碳輸送研討會場次簡報