

中華環安衛科技協會

Chinese Environmental, Safety and Health Association



會刊

59

2026.June



★ 理事長的話

★ 專題報導

1. 空氣品質模式AERMOD與ISCST3應用於環境影響評估之模擬差異探討
2. 臺灣推動碳捕捉後封存 (CCS) 之法規建置與價值鏈布局
3. Organic Carbon Metabolism in Functional Microbiome for 2,4-Dichlorophenol Remediation
4. 智慧製造架構下機器人於石化製程安全管理實務應用研究
5. 淨零轉型下CCUS的重大事故危害與設備完整性
6. 終結盲目切片時代：「攝護腺健康指數」引領攝護腺癌精準檢測
7. 老化男性的荷爾蒙變化與攝護腺健康



理事長的話



吳忠信 | 國立高雄科技大學 副校長

各位先進、各位長官：

「中華環安衛科技協會」以服務公眾為己任，為社會提供環境保育、安全管理與健康促進等重要資訊之交流。本期會刊收錄七篇優秀文章，其中環境類為〈空氣品質模式 AERMOD 與 ISCST3 應用於環境影響評估之模擬差異探討〉和〈臺灣推動碳捕捉後封存 (CCS) 之法規建置與價值鏈布局〉，以及全英文的‘Organic Carbon Metabolism in Functional Microbiome for 2,4-Dichlorophenol Remediation’；安全類為〈智慧製造架構下機器人於石化製程安全管理實務應用研究〉和〈淨零轉型下 CCUS 的重大事故危害與設備完整性〉；健康類為〈終結盲目切片時代：「攝護腺健康指數」引領攝護腺癌精準檢測〉和〈老化男性的荷爾蒙變化與攝護腺健康〉。文章內容豐富且深具學術價值，提供讀者關於環境、安全及健康等領域的創新成果與重要知識。

在此也特別感念各位先進、長官長久以來的指導與鼓勵，因為有您的鼎力支持，本會方能穩健成長。誠摯祝福各位：駿程萬里，夏安。

Contents 目錄

■ 理事長的話 吳忠信	I
-------------	---

■ 專題報導

1. 空氣品質模式 AERMOD 與 ISCST3 應用於環境影響評估之模擬差異 探討	1
2. 臺灣推動碳捕捉後封存 (CCS) 之法規建置與價值鏈布局	13
3. Organic Carbon Metabolism in Functional Microbiome for 2,4-Dichlorophenol Remediation	27
4. 智慧製造架構下機器人於石化製程安全管理實務應用研究	75
5. 淨零轉型下 CCUS 的重大事故危害與設備完整性	96
6. 終結盲目切片時代：「攝護腺健康指數」引領攝護腺癌精準檢測	112
7. 老化男性的荷爾蒙變化與攝護腺健康	121

■ 會務動態

中華環安衛科技協會

第十五屆第三次理監事聯席會－會議紀錄	129
--------------------	-----

會刊編輯委員會

主任委員 | 吳忠信

會 址 | 高雄市前鎮區一心一路 243 號 4 樓之 1

總 編 輯 | 潘俊仁

聯 絡 處 | 高雄市三民區建工路 415 號

編 輯 | 黃嫻薰

電 話 | 07-3814526 轉 12205

版權所有，未經同意請勿轉載

空氣品質模式 AERMOD 與 ISCST3 應用於環境影響評估 之模擬差異探討

The Simulation Differences between AERMOD and ISCST3 Air Dispersion Models Applied in Environmental Impact Assessment

蘇靖雯，磐誠工程顧問股份有限公司 工程師

洪詩涵，磐誠工程顧問股份有限公司 經理

詹智全，磐誠工程顧問股份有限公司 副總

摘要

隨著環境保護意識提升，如何兼顧開發行為與環境永續已是各國政府與社會關注之課題。在我國環境影響評估中，廣泛應用各類模式進行影響預測，作為判斷環境可承受度與規劃保護對策之重要依據。在空氣品質影響評估部分，過去國內常採用高斯擴散模式 ISCST3 (Industrial Source Complex Short Term Dispersion Model) 作為模擬工具，但隨美國環保署公告 AERMOD (American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) 為優選模式後，環境部則逐步要求環境影響評估案件以 AERMOD 為空氣品質影響評估優先選用之模式。惟兩種模式於氣象資料處理及擴散機制等存在差異，可能導致有模擬結果不一致情事。

本研究以園區開發計畫為案例，分別以 ISCST3 與 AERMOD 進行施工期間汙染物濃度模擬，比較敏感受體點與最大增量濃度之差異；結果顯示在敏感受體點模擬結果，AERMOD 於粒狀汙染物、SO₂ 及 CO 模擬濃度多低於 ISCST3，在 NO₂ 部分顯著高於 ISCST3；而在最大增量濃度部分，AERMOD 於粒狀汙染物、SO₂ 及 CO 模擬濃度則多有高於 ISCST3 之情形；並由等濃度圖亦觀察到 AERMOD 近場偏高、遠場偏低之特徵。此結果顯示模式選用對環境影響評估結果之影響，並可作為後續研究與實務應用之參考。

【關鍵字】空氣品質模擬、環境影響評估、AERMOD、ISCST3、高斯擴散模式

一、前言

空氣品質模式在我國環境影響評估中扮演重要角色。過去環評案件常以 ISCST3 為主要模擬工具，但該模式於低風速或複雜地形條件下，模擬結果常與實測有落差[1]。為改善其不足，美國環保署於 2005 年公告 AERMOD 為取代 ISCST3 的推薦模式[2][3]。行政院環境保護署（現環境部，以下簡稱環境部）亦於 2022 年公告本土化版本，後續環評審查案亦開始採用 AERMOD 作為空氣品質模擬模式。

本研究以園區型開發計畫為案例，比較 ISCST3 與 AERMOD 模擬結果，探討兩者於敏感受體點及最大增量濃度之差異，並分析其在環境影響評估實務應用上之意涵。

二、方法

2.1 我國空氣品質模式相關規範

我國空氣品質模式之應用，主要依據環境影響評估制度與空氣汙染防制法等規範進行。依《開發行為環境影響評估作業準則》第 58 條規定，開發單位製作環境影響說明書時，如涉及需提出相關預測、分析及評估模式者，應依據評估技術規範辦理[4]。而以《開發行為環境影響評估作業準則》為法源，主管機關另訂有《空氣品質模式評估技術規範》，第 2 條明定：「辦理環境影響評估作業時，空氣品質模式之使用，應依本規範之規定辦理，本規範未規定者，依其他相關法令規定辦理」。而在《空氣品質模式評估技術規範》所認可之模式，環評過往以 ISCST3 及 CLINE4 為常用工具[5]。

另依《空氣汙染防制法》第 6 條第 4 項授權，環境部訂有《空氣品質模式模擬規範》，適用於同法第 6 條第 2 項、第 3 項及第 8 條第 2 項規定，申請新設或變更固定汙染源且排放量達一定規模者。《空氣品質模式模擬規範》中規定高斯類擴散模式應使用中央主管機關公告之模式[6]。而環境部於 2022 年 12 月 22 日以環署空字第 1111173069 號公告，建置 AERMOD 本土化版本、使用規範與技術文件，自 2023 年 1 月 1 日起，公私場所固定汙染源依空汙法相關規定申請設置許可時，若以高斯類擴散模式進行濃度增量模擬，應以

AERMOD 模式進行模式模擬濃度增量計算[7]。

綜上所述，目前我國固定污染源許可審查已明確要求以 AERMOD 作為高斯類擴散模式之選用模式；而在環境影響評估作業，雖《空氣品質模式評估技術規範》尚未修正，其認可之模式尚包括 ISCST3，然實務審查過程中，主管機關及審查委員多認為環評案件應準用環署空字第 1111173069 號公告之規範，故自 2023 年 1 月 1 日起，新申請案件多已被要求以 AERMOD 進行模擬。

2.2 高斯類擴散模式介紹

2.2.1 ISCST3 模式原理與應用範圍

ISCST3 係美國環保署所開發之穩態高斯擴散模式，廣泛應用於工業區各類污染源排放對周界空氣品質之影響評估。該模式以高斯擴散理論為基礎，假設大氣擴散於短時間內處於穩態，並依據大氣穩定度分類推估水平與垂直擴散係數。ISCST3 可處理多種排放源型態，包括點源、面源及線源，並能考量污染物在傳輸過程中之沉降、建築物下洗效應及地形高度差異等影響。模式輸入需求主要包含污染源參數（排放源高度、出口溫度、流速、排放率等）、氣象資料（風速、風向、混合層高度及穩定度分類）與受體點座標。

在我國環境影響評估作業中，ISCST3 曾作為環保主管機關審查所指定之選用模式，其適用範圍通常為地形相對平坦、距離數十公里內之短程擴散模擬。然而有研究顯示於複雜地形、低風速等情境下，ISCST3 之模擬結果可能偏離實際情況[1]。

2.2.2 AERMOD 模式原理與發展背景

AERMOD 係由美國氣象學會（American Meteorological Society, AMS）與美國環保署共同開發之穩態高斯擴散模式，於 2005 年美國環保署《空氣品質模式指引》（Guideline on Air Quality Models）修正案中，作為取代 ISCST3 的選用模式，於 2006 年 12 月 9 日正式公告修正案後，AERMOD 成為許可審查與空氣擴散模擬中推薦使用的高斯擴散模式[2][3]。

AERMOD 之設計核心在於更符合邊界層氣象理論，透過前處理程式 AERMET 整理逐時氣象資料，計算邊界層混合高度、摩擦速度與大氣穩定度

等參數，進而提升擴散模擬的物理基礎[8]。AERMOD 同樣能處理點源、面源與線源等多種排放源類型之擴散模擬，亦可在建築物下洗效應、地表粗糙度以及複雜地形等情境更精細地進行參數處理，比較如表 1 所示[9]，因此，AERMOD 在低風速或逆溫等不利氣象條件下，能較 ISCST3 更準確呈現污染物之傳輸與濃度分布。

表 1、ISCST3 與 AERMOD 模式特性比較

項目	ISCST3	AERMOD
排放源類型	點、線、面、體源	點、線、面、體源
擴散理論	水平與垂直皆採高斯分布	水平方向及垂直方向穩定時採高斯分布；垂直方向不穩定時採非高斯機率密度函數
大氣穩定度處理	依據 Pasquill Gifford 穩定度分類決定擴散係數	透過氣象資料計算邊界層湍流參數(摩擦速度、Monin Obukhov 長度、混合高度等)，以連續方式反映大氣狀態
建築物下洗	Huber Snyder、Scire-Schulman 演算法組合	PRIME 演算法
都市/鄉村設定	2種選項(都市/鄉村)	可依人口密度設定不同都市條件
地表特性	2種選項(都市/鄉村)	AERMET可設定地表特性參數(地表粗糙度、反照率、Bowen ratio)
混合層交互作用 (對流條件)	若煙流中心高於混合層，則地面濃度直接視為零	同時考慮直接下沉煙流、上升後再下沉煙流、穿透混合層後再傳輸煙流
混合層交互作用 (穩定條件)	假設混合層無窮高，不考慮反射	考慮近地表之機械混合層，並模擬煙流在高空混合層頂端反射

資料來源：US EPA. AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION. 2004

備註：環境部空氣品質模式支援中心已統一提供經 AERMET 前處理之氣象資料，可直接套用 SFC 與 PFL 檔進行模擬，故無需自行設定

2.3 案例選擇及參數設定

2.3.1 案例介紹

本研究案例選擇本公司近期執行之園區開發計畫環評為例，該園區位於雲林縣沿海地帶，開發面積近百公頃，主要規劃引進綜合性工業及低污染、低排放產業，以促進土地活化與地方經濟發展。

2.3.2 參數設定

施工期間分為整地排水工程及園區興建工程兩階段，每日施工時間為 8 小時，每月 22 日。汙染來源包含工地逸散揚塵與施工機具廢氣，其中逸散揚塵係依據環境部汙染源排放清冊（TEDS 12.0）之區域開發工程-工業排放係數，並考量灑水、路面鋪設鋼板等抑塵措施之削減效率，以總施工面積約為 1 公頃計算，粒狀汙染物排放量如表 2 所示；施工機具空氣汙染排放量則依據各工程階段之機具種類及數量，並參照美國環保署 Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Vol.2 Mobile Sources（以下簡稱 AP-42）機具排放係數進行估算[10]，施工期間各階段施工機具種類、數量及排放係數詳見表 3。因工程施工期間除施工機具汙染物排放外，須同時考量施工的逸散揚塵，將兩者納入考量為施工期間空氣汙染排放之尖峰量，詳如表 4 所示。

氣象資料取自環境部空氣品質模式支援中心[11]，由於 ISCST3 已非主管機關建議之高斯擴散模式，故僅提供至 2020 年之氣象資料，為降低氣象檔選用年份造成變異，本研究氣象資料採用嘉義地面氣象測站 2018 至 2020 年逐時觀測值，3 年間之風花圖如圖 1 所示。模擬範圍及網格則以開發基地為中心，取 10 公里×10 公里範圍，並設置 100 公尺間距之正方形網格，另額外針對鄰近敏感受體點，包括台西海口生活館、台西國中、台西國小、萬興公廟、崙豐漁港駐在所及台西鄉立幼兒園進行評估。在地形資料部分，ISCST3 採用平坦地形設定；而 AERMOD 則依模式使用規範輸入空氣品質模式支援中心提供之地形資料，另本研究並未考慮建築物下洗效應。

表 2、整地工程逸散粒狀汙染物排放量推估表

工程項目	汙染物	排放係數 公噸/公頃/月	施工面積 公頃	排放量 (70%去除) kg/月/公頃	排放量 (70%去除) g/sec/m ²
整地工程	TSP	0.944	1	283.20	4.47×10 ⁻⁵
	PM ₁₀	0.525		157.50	2.49×10 ⁻⁵
	PM _{2.5}	0.1049		31.47	4.97×10 ⁻⁶

表 3、各工程階段施工機具衍生之排放量推估表

工程內容	機具名稱	數量	排放量(g/hr/輛)					
			TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO
整地排水工程	推土機	3	75.0	75.0	69.0	0.7	575.8	306.4
	傾卸卡車	4	77.9	77.9	71.7	82.5	858.2	258.6
	灑水車	2	22.7	22.7	20.9	30.5	392.9	138.0
	平路機	1	27.7	27.7	25.5	39.0	324.4	68.5
	排放推估值小計(g/hr)		609.70	609.70	560.97	432.15	6270.35	2297.83
	排放推估值小計(g/sec)		0.169	0.169	0.156	0.120	1.742	0.638
	排放強度(g/sec/m ²)		1.69×10 ⁻⁵	1.69×10 ⁻⁵	1.56×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁴	6.38×10 ⁻⁵
園區廠房新建工程	打樁機	1	22.7	22.7	20.9	30.5	392.9	137.9
	裝載車	1	77.9	77.9	71.7	0.380	0.38	0.19
	混凝土預拌車	2	63.2	63.2	58.1	0.294	767.3	306.4
	混凝土泵浦	1	61.5	61.5	56.6	40.9	575.8	157.0
	吊車	1	50.7	50.7	46.60	62.3	570.7	157.0
	排放推估值小計(g/hr)		339.20	339.20	312.06	134.67	3074.42	1064.83
	排放推估值小計(g/sec)		0.094	0.094	0.087	0.037	0.854	0.296
	排放強度(g/sec/m ²)		9.42×10 ⁻⁶	9.42×10 ⁻⁶	8.67×10 ⁻⁶	3.74×10 ⁻⁶	8.54×10 ⁻⁵	2.96×10 ⁻⁵

資料來源：U.S.EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Vol.2 Mobile Sources

註：1.依據「面源排放量推估手冊 TED 12.0」，TSP/PM10/PM2.5 之比率為 1:1:0.92。

2.依據民國 109 年 3 月 20 日環署空字第 1090019185 號令修正發布之「移動污染源燃料成分管制標準」規定，硫含量已加嚴至 10ppmw，由於 U.S.EPA- AP-42 係數彙編（1985）中以含硫 0.22%為推估基準，於排放量推估中已適當修正。

表 4、施工工程空氣汙染物總排放量

項目類別		排放量(g/sec/m ²)					
		TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO _x	NO _x	CO
工區	裸露地	2.21×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁶	5.69×10 ⁻⁷	—	—	—
逸散	整地工程	4.47×10 ⁻⁵	2.49×10 ⁻⁵	4.97×10 ⁻⁶	—	—	—
施工機具	整地排水	1.69×10 ⁻⁵	1.69×10 ⁻⁵	1.56×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁴	6.38×10 ⁻⁵
總計		6.16×10 ⁻⁵	4.18×10 ⁻⁵	1.81×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁵	1.74×10 ⁻⁴	6.38×10 ⁻⁵

註：1.「—」表示無該計算數值。

2.不同施工階段之廢氣排放不重疊，總排放量取最大之工程排放進行加總。

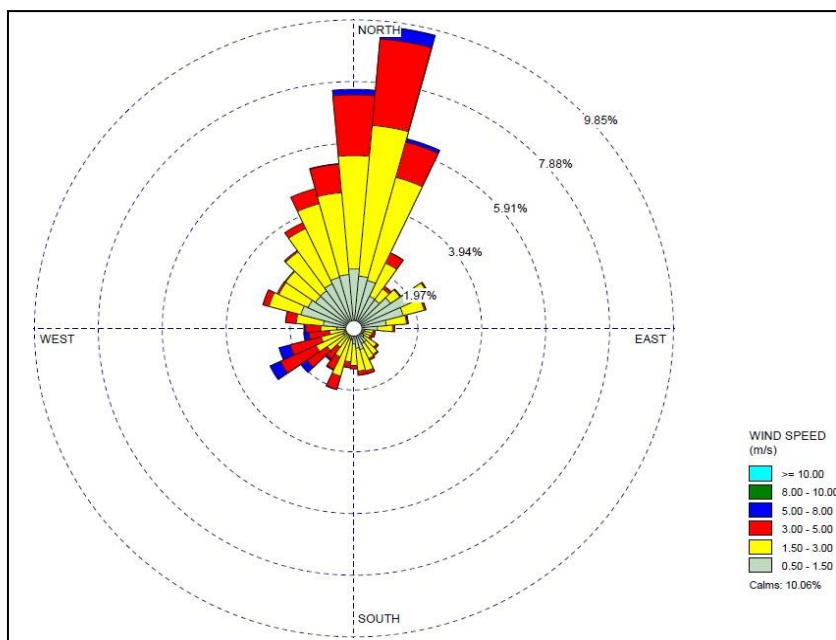


圖 1、嘉義氣象站 2018~2020 年風花圖

三、結果與討論

比較 AERMOD 及 ISCST3 之敏感點增量濃度模擬結果（如表 5），在 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂ 及 CO 部分，AERMOD 模擬濃度普遍低於 ISCST3，其中粒狀污染物（TSP、PM₁₀、PM_{2.5}）差異約介於-30.0 至-56.7%，SO₂ 及 CO 則介於-30.8 至-74.3%；然而在 NO₂ 模擬結果，AERMOD 多數情況高於 ISCST3，差異範圍介於-17.9%至125.0%。

在最大濃度比較方面（如表 6），TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 於 AERMOD 模擬濃度均高於 ISCST3，差異約介於 11.2%至 22.4%；CO 與 SO₂ 小時平均值則略低於 ISCST3，差異介於-8.8 至-8.9%；而 CO 與 SO₂ 八小時平均值及年平均値差異則分別為 4.4%及 22.4%；而在 NO₂ 部分，AERMOD 模擬濃度顯著高於 ISCST3，年均値差異為 305.3%，小時平均值則為 137.4%。

另由等濃度圖亦可觀察分布差異（如圖 2），以 PM_{2.5} 日平均值及 NO₂ 小時平均值為例，AERMOD 在排放源下風側近場濃度較 ISCST3 為高，但隨距離增加尾跡衰減較快，遠場濃度則低於 ISCST3。

綜上所述，在此案例中 AERMOD 在敏感受體點之模擬增量濃度多

低於 ISCST3，而在最大增量濃度則多高於 ISCST3 之模擬結果。以增量濃度等濃度分布圖來看，亦呈現近場濃度偏高，遠場濃度偏低之特徵，顯示對鄰近污染源排放位置之受體有更保守之模擬結果。

表 5、敏感受體點位增量濃度比較

項目 \ 位置		敏感受體點名稱					
		萬興公廟			崙豐漁港駐在所		
		ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異 百分比	ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異百分比
TSP	24小時值	0.090	0.039	-56.7%	0.101	0.048	-52.5%
	年平均值	0.015	0.008	-46.7%	0.018	0.011	-38.9%
PM ₁₀	日平均值	0.061	0.027	-55.7%	0.069	0.033	-52.2%
	年平均值	0.010	0.006	-40.0%	0.012	0.008	-33.3%
PM _{2.5}	日平均值	0.026	0.012	-53.8%	0.030	0.014	-53.3%
	年平均值	0.004	0.002	-50.0%	0.005	0.003	-40.0%
NO ₂	小時平均值	0.525	0.640	+21.9%	0.505	0.706	+39.8%
	年平均值	0.007	0.012	+71.4%	0.008	0.017	+112.5%
SO ₂	小時平均值	0.087	0.032	-63.2%	0.085	0.035	-58.8%
	年平均值	0.0011	0.0006	-45.5%	0.0013	0.0008	-38.5%
CO	小時平均值	1.058	0.386	-63.5%	1.027	0.439	-57.3%
	八小時平均值	0.229	0.093	-59.4%	0.264	0.121	-54.2%

註：1.TSP、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，NO₂、SO₂ 及 CO 單位為 ppb。

2.差異百分比=(AERMOD 模擬濃度-ISCST3 模擬濃度)÷ISCST3 模擬濃度。

表 5、敏感受體點位增量濃度比較（續 1）

項目 \ 位置		敏感受體點名稱					
		台西鄉立幼兒園			基地內(台西海口生活館)		
		ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異百分比	ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異百分比
TSP	24小時值	0.147	0.074	-49.7%	0.681	0.299	-56.1%
	年平均值	0.035	0.024	-31.4%	0.172	0.083	-51.7%
PM ₁₀	日平均值	0.100	0.051	-49.0%	0.462	0.203	-56.1%
	年平均值	0.024	0.016	-33.3%	0.116	0.056	-51.7%
PM _{2.5}	日平均值	0.043	0.022	-48.8%	0.200	0.088	-56.0%
	年平均值	0.010	0.007	-30.0%	0.050	0.024	-52.0%
NO ₂	小時平均值	0.811	0.991	+22.2%	3.513	2.883	-17.9%
	年平均值	0.016	0.036	+125.0%	0.079	0.125	+58.2%
SO ₂	小時平均值	0.136	0.049	-64.0%	0.556	0.143	-74.3%
	年平均值	0.0026	0.0018	-30.8%	0.013	0.006	-53.8%
CO	小時平均值	1.656	0.602	-63.6%	6.755	1.753	-74.0%
	八小時平均值	0.378	0.175	-53.7%	1.847	0.782	-57.7%

註：1.TSP、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，NO₂、SO₂ 及 CO 單位為 ppb。

2.差異百分比=(AERMOD 模擬濃度-ISCST3 模擬濃度)÷ISCST3 模擬濃度

表 5、敏感受體點位增量濃度比較（續 2）

項目 \ 位置		敏感受體點名稱					
		台西國中			台西國小		
		ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異百分比	ISCST3 模擬濃度	AERMOD 模擬濃度	差異百分比
TSP	24小時值	0.110	0.072	-34.5%	0.088	0.058	-34.1%
	年平均値	0.024	0.018	-25.0%	0.019	0.014	-26.3%
PM ₁₀	日平均値	0.075	0.049	-34.7%	0.059	0.039	-33.9%
	年平均値	0.017	0.012	-29.4%	0.013	0.009	-30.8%
PM _{2.5}	日平均値	0.032	0.021	-34.4%	0.026	0.017	-34.6%
	年平均値	0.007	0.005	-28.6%	0.006	0.004	-33.3%
NO ₂	小時平均値	0.653	1.129	+72.9%	0.526	0.858	+63.1%
	年平均値	0.011	0.026	+136.4%	0.009	0.021	+133.3%
SO ₂	小時平均値	0.109	0.056	-48.6%	0.087	0.043	-50.6%
	年平均値	0.0018	0.0013	-27.8%	0.0014	0.0010	-28.6%
CO	小時平均値	1.322	0.680	-48.6%	1.053	0.518	-50.8%
	八小時平均値	0.273	0.170	-37.7%	0.222	0.137	-38.3%

註：1.TSP、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，NO₂、SO₂ 及 CO 單位為 ppb。

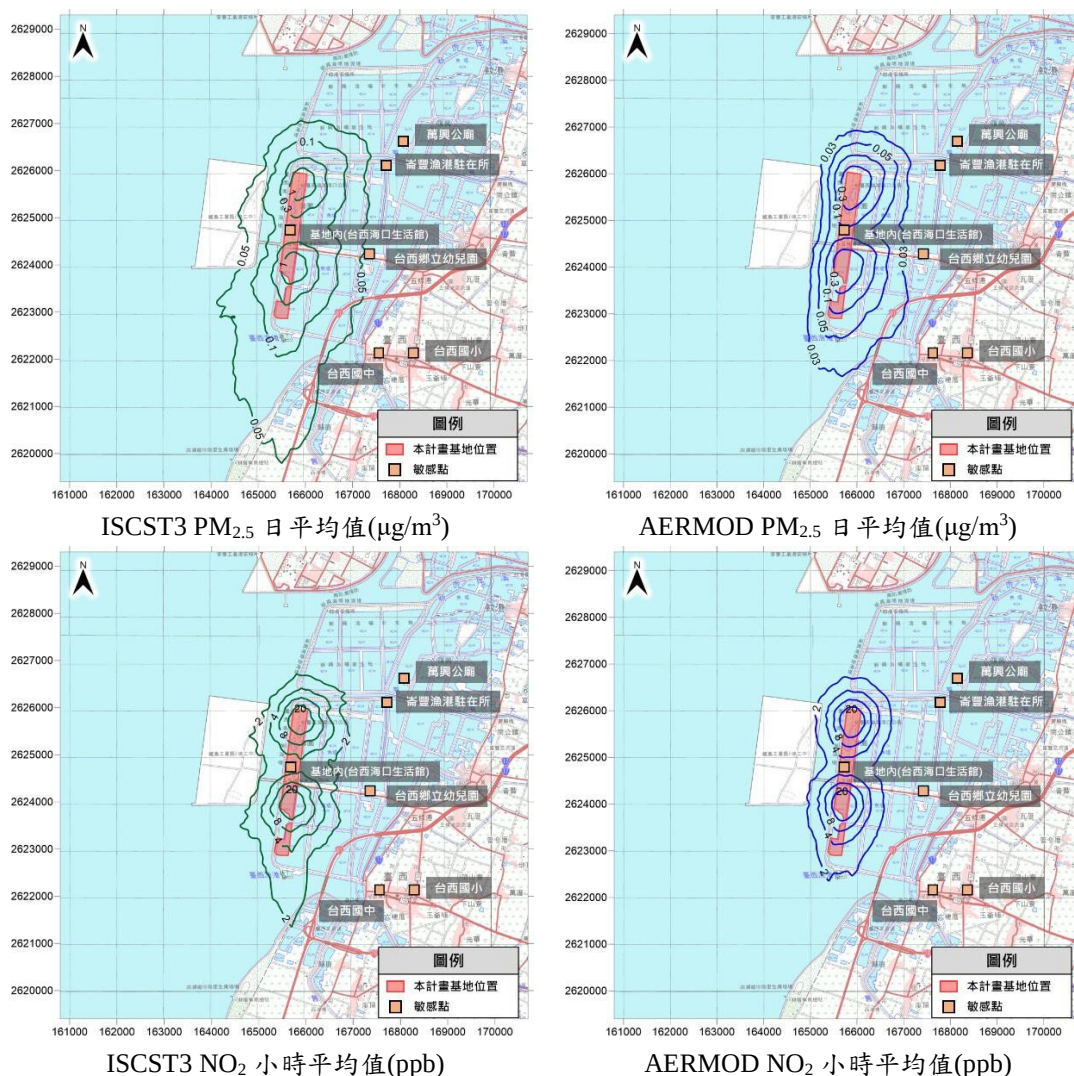
2.差異百分比=(AERMOD 模擬濃度 - ISCST3 模擬濃度) ÷ ISCST3 模擬濃度。

表 6、ISCST3 及 AERMOD 最大增量濃度及位置比較

汙染物項目		ISCST3 最大增量濃度		AERMOD 最大增量濃度		差異 (%)
		濃度	地點	濃度	地點	
TSP	24小時值	28.995	(165900, 2625700)	32.241	(165900, 2625700)	11.2%
	年平均値	10.926	(165900, 2625700)	13.356	(165900, 2625700)	22.2%
PM ₁₀	日平均値	19.675	(165900, 2625700)	21.914	(165900, 2625700)	11.4%
	年平均値	7.414	(165900, 2625700)	9.078	(165900, 2625700)	22.4%
PM _{2.5}	日平均値	8.520	(165900, 2625700)	9.489	(165900, 2625700)	11.4%
	年平均値	3.211	(165900, 2625700)	3.931	(165900, 2625700)	22.4%
NO ₂	小時平均値	119.290	(165700, 2625900)	283.227	(165687, 2623952)	137.4%
	年平均値	4.959	(165900, 2625700)	20.098	(165900, 2625700)	305.3%
SO ₂	小時平均値	15.409	(165700, 2625900)	14.039	(165687, 2623952)	-8.9%
	年平均値	0.814	(165900, 2625700)	0.996	(165900, 2625700)	22.4%
CO	小時平均値	187.258	(165700, 2625900)	170.759	(165687, 2623952)	-8.8%
	八小時平均値	73.39	(165900, 2625700)	76.602	(165900, 2625700)	4.4%

註：1.TSP、PM₁₀ 及 PM_{2.5} 單位為 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，NO₂、SO₂ 及 CO 單位為 ppb。

2.差異百分比=(AERMOD 模擬濃度 - ISCST3 模擬濃度) ÷ ISCST3 模擬濃度。



四、結論與建議

本研究以園區開發計畫為案例，比較 ISCST3 與 AERMOD 模式之模擬差異。結果顯示，在敏感受體點模擬結果，AERMOD 於粒狀污染物、SO₂ 及 CO 模擬濃度多有低於 ISCST3，在 NO₂ 部分顯著高於 ISCST3；而在最大增量濃度部分，AERMOD 於粒狀污染物、SO₂ 及 CO 模擬濃度則多有高於 ISCST3 之情形。由等濃度圖與敏感受體點分析顯示 AERMOD 在排放源近場模擬濃度較高，遠場則較低，對鄰近污染源排放位置之受體有更保守之模擬結果。尤其對 NO₂ 之濃度在敏感受體點及最大增量濃度皆呈現較高之濃度。

然而，本研究僅以單一案例且未在地形資料上統一輸入，仍存有一定不確定性。後續研究可針對不同地形與氣象條件之案例進行比較，並配合監測數據驗證，以更全面評估模式差異之合理性與適用範圍，進一步建立後續研究之參考。

參考文獻

- [1] Faulkner WB, Shaw BW, Grosch T. Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source. Journal of the Air & Waste Management Association. 2008 Oct 1;58(10):1288–96.
- [2] US EPA. Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions [Internet]. 2005 Nov [cited 2025 Sept 26]. Available from: https://www.federalregister.gov/documents/2005/11/09/05-21627/revision-to-the-guideline-on-air-quality-models-adoption-of-a-preferred-general-purpose-flat-and?utm_source=chatgpt.com
- [3] US EPA O. Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models [Internet]. 2016 [cited 2025 Sept 26]. Available from: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
- [4] 行政院環境保護署。開發行為環境影響評估作業準則。中華民國 110 年 2 月 2 日環署綜字第 1101004742 號令修正發布。
- [5] 行政院環境保護署。空氣品質模式評估技術規範。中華民國 87 年 7 月 28 日環署綜字第 0050373 號公告修正發布。
- [6] 行政院環境保護署。空氣品質模式模擬規範。中華民國 110 年 12 月 20 日環署空字第 1101171976 號公告修正發布。
- [7] 行政院環境保護署。環署空字第 1111173069 號函。中華民國 111 年 12 月

22 日。

- [8] US EPA. AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION. 2004.
- [9] US EPA. AERMOD: Latest Features and Evaluation Results. 2003.
- [10] US EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Fourth Edition. Vol. 2 Mobile Sources. 1985.
- [11] 環境部。空氣品質模式支援中心 [Internet]. [cited 2025 Sept 26]. Available from: <https://aqmc.moenv.gov.tw/index.html>

臺灣推動碳捕捉後封存 (CCS) 之法規建置與價值鏈布局

Regulatory development and value chain strategy for carbon capture and storage (CCS) in Taiwan

吳柏璋，國立臺灣大學環境工程學研究所 博士後研究員

劉雅瑄，國立臺灣大學地質科學系 教授

摘要

在全球淨零排放趨勢下，碳捕捉後封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 逐漸成為高碳排與難減排部門的重要負碳選項。對臺灣而言，電力、鋼鐵、石化與水泥等產業排放高度集中，使 CCS 具備作為中長期負碳工具的發展潛力。本文從國際發展經驗出發，整理美國、英國、挪威與日本等國在制度設計、基礎設施建置與政策支持上的主要作法，並進一步聚焦臺灣現階段 CCS 法規建置與價值鏈發展重點。我國已依《氣候變遷因應法》第 39 條推進《二氧化碳捕捉後封存管理辦法》草案，逐步建立涵蓋場址選定、探勘、環評、封存核准、注入營運、關井與後監測責任之生命週期管理架構。在價值鏈方面，臺灣碳源群聚明確，具備以樞紐與群集模式整合捕捉、運輸與封存系統之條件，惟前期基礎設施、場址調查、監測制度與財務支持機制仍待持續完備。地下封存活動除涉及技術與法規問題外，亦高度關聯資訊透明、風險溝通與社會信任。整體而言，CCS 在臺灣的意義，不僅在於提供產業負碳工具，更在於促進法制、監測、基礎設施與治理能力的同步發展。

【關鍵字】 碳捕捉後封存、淨零排放、法規建置、價值鏈、社會溝通

一、前言

全球氣候治理持續朝控制升溫 1.5°C 的方向推進，淨零排放已成為各國能源轉型與產業政策的重要目標。對臺灣而言，這項趨勢不僅涉及環境責任，也直接關聯產業競爭力、能源安全與國際供應鏈調適。隨著「2050 淨零排放」成為國家政策願景，碳捕捉、利用與封存（CCUS）已被納入關鍵戰略（國家發展委員會，2022），顯示其在中長期減碳路徑中的地位逐漸明確。依現行淨零政策與相關技術研析，地質封存能力的建立已被視為支撐難減排部門轉型的重要基礎工作，顯示 CCS 在臺灣並非邊緣性技術，而是與產業負碳與能源轉型密切相關的制度議題。

臺灣二氧化碳排放來源具有高度集中性，主要來自電力、鋼鐵、石化與水泥等高耗能產業。這些部門的排放有一部分直接來自燃料燃燒與高溫製程本身，也有一部分來自化學反應或原料轉換過程，因此即使持續提升能源效率、擴大再生能源使用並推動製程改善，仍難以在短期內完全消除。換言之，部分排放並非僅靠節能或電力替代即可處理，而必須搭配其他負碳工具。CCS 的技術功能，即在於處理這類較難以透過現有措施大幅削減的排放量。其基本流程包括自排放源捕捉二氧化碳、進行分離與壓縮，之後經由管線或船舶運輸至封存場址，再注入深部鹽水層或枯竭油氣藏等地下地質構造，以進行長期封存。

CCS 並非單一設備或單一製程改善措施，而是一項涉及地質調查、基礎設施、風險監測、制度審查、財務規劃與社會溝通的系統工程。其推動條件不僅取決於技術成熟度，也與法規架構是否清楚、責任分工是否明確、投資風險能否合理配置，以及社會對地下封存活動的理解程度密切相關。基於此，本文認為，臺灣推動 CCS 的關鍵，不在於單一技術設備的導入，而在於建立可支撐場址選定、探勘審查、注入監測、責任移轉與社會溝通的整體治理架構。相較於已進入大規模商業化部署的國家，臺灣目前更需要的是一條符合本土地質條件、產業分布與治理能力的推進路徑。本文據此整理國際制度經驗，並從法規建置、價值鏈佈局與資訊透明三個面向，提出臺灣現階段較具可操作性的發展方向。

二、國際發展經驗與制度啟示

2.1 全球 CCS 部署與推動模式

根據全球碳捕捉與封存研究所（Global CCS Institute, GCCSI）資料，截至 2025 年 7 月，全球 CCS 計畫總數已達 734 個，每年可捕捉二氧化碳量約 5.13 億噸（GCCSI, 2025）。此一規模顯示，CCS 已由早期示範逐步走向商業化部署，並開始形成跨產業、跨區域的基礎設施網絡。

各國推動 CCS 的方式具有明顯差異，大致可歸納為兩類主要路徑。一類較偏向市場誘因導向，由政府透過稅務減免、碳定價或補助工具，鼓勵企業投資並形成商業模式。另一類則較偏向政府主導，由公部門先投入制度建置、基礎設施規劃與示範資源，再逐步引導民間參與。

美國與加拿大因具備較大的陸域空間與成熟油氣產業基礎，政策上較偏向以前者為主。例如美國 45Q 稅收抵免條款，透過對合格封存案件提供每噸一定額度的支持，強化企業投入意願（USDOE, 2024）。此類制度的核心，在於利用財務誘因縮短新興負碳技術與市場接受之間的距離。

歐洲國家則更重視樞紐（Hub）與群集（Cluster）模式，其主要驅動力在於規模經濟、風險分攤，以及許多工業區缺乏便利的現地封存地點（The CCUS Hub, 2023）。在此架構下，挪威 Northern Lights 計畫即為代表案例，其透過開放式船運與海域封存系統，逐步建立跨境二氧化碳接收與封存能力（OED, 2020）。英國 East Coast Cluster 則代表以產業群聚、共享基礎設施與政策工具支撐商業化部署的模式（Ove Arup & Partners Ltd, 2025）。以英國為例，其制度設計除著重於共用運輸與封存設施外，也利用差價合約（Contract for Difference, CfD）穩定投資預期。當市場碳價或負碳收益不足以支撐 CCS 投資時，差價合約可由政府提供差額補貼，使計畫在較長回收期間內仍具備可預測的收益基礎（DESNZ, 2024）。

綜合主要國家經驗可見，CCS 商業模式的形成通常並非單靠封存行為本身，而是結合政策誘因、服務收費機制與替代收益來源共同支撐。如圖 1 所示，相關模式可能由碳稅、補助等政策工具啟動，進一步發展為封存服務或運

輸與封存服務（T&S service）之收費機制，並在部分情境下搭配跨境協議、綠色產品溢價或其他收益來源。這說明 CCS 推動不僅涉及技術與場址問題，也高度關聯投資可行性與制度設計。

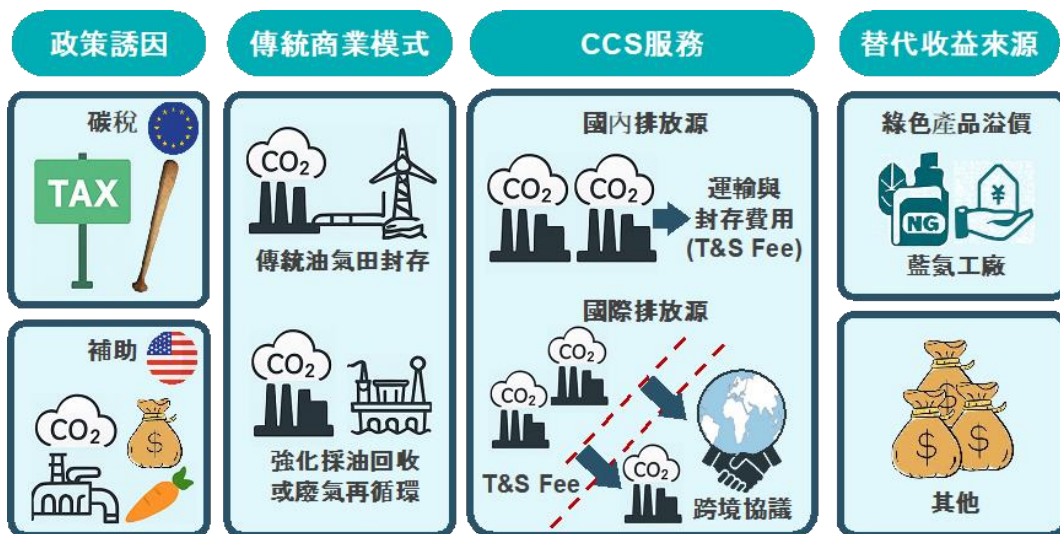


圖 1、國際 CCS 商業模式之收入來源與激勵機制構成邏輯

2.2 日本經驗對臺灣的參考價值

日本在地理條件、人口密度與社會接受度議題上，與臺灣較為接近，因此其經驗特別具有參考價值。日本於 2024 年通過《二氧化碳儲集事業法》，為 CCS 商業化部署建立法律基礎。日本苫小牧示範計畫則於 2016 年至 2019 年間完成約 30 萬噸二氧化碳的海床下注入，並透過連續的微震與海洋環境監測，累積封存安全、監測制度與社會溝通的實證經驗（JCCS, 2020）。

日本苫小牧示範計畫的工程架構涵蓋含二氧化碳氣體的供應來源、分離回收與注入設備、管線輸送、注入井、觀測井，以及海域下方之封存層與遮蔽層配置（圖 2）。此一系統顯示，CCS 示範不僅是將二氧化碳注入地下，而是必須同時處理排放源端回收、地面設施配置、井位設計、地下儲層條件與監測系統建置。特別是圖中儲留層與遮蔽層的配置關係，以及觀測井與壓入井並行的設計，更突顯封存作業須建立在地質封閉性與持續監測能力之上。

對臺灣而言，日本案例的重要性在於，它所處理的不僅是封存技術本身，也包括高人口密度地區如何面對場址風險、監測資料公開與社會溝通等問題。這些面向與臺灣未來推動 CCS 時可能遭遇的制度與治理課題具有相當高的相似性。綜合上述經驗，臺灣現階段較難直接複製美國以市場誘因驅動的大規模部署模式，因其前提在於成熟的油氣基礎與完整的價格誘因體系。相較之下，臺灣較適合參考日本在法制建置、示範驗證與監測制度上的推進方式，同時借鏡英國與挪威在群聚佈局、共用基礎設施與政策支持工具上的制度設計。對臺灣較具可行性的方向，不是直接追求全面商業化，而是在制度、場址、監測與價值鏈條件逐步成熟後，再推進更大尺度的部署。

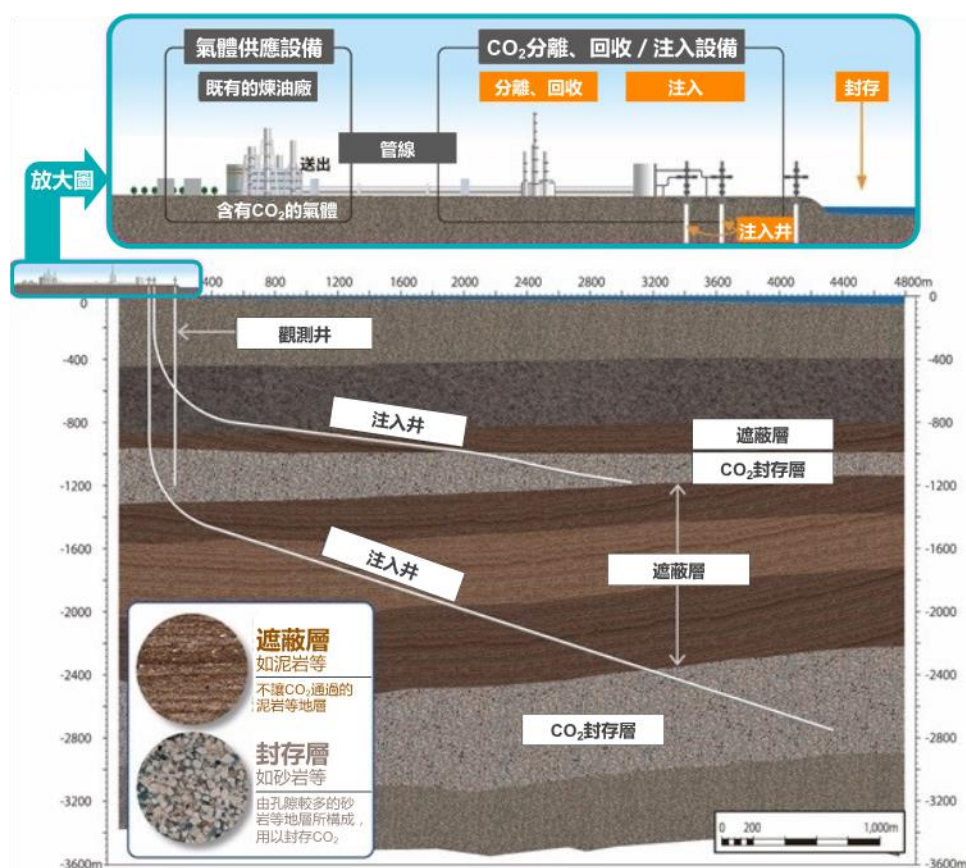


圖 2、日本苦小牧 CCS 示範計畫之地面設施、注入井配置與地下封存層示意圖（圖片修改自 JCCS, 2022）

三、臺灣 CCS 法規建置的進展

3.1 法制基礎與母法授權來源

臺灣 CCS 法規建置的法源基礎，來自《氣候變遷因應法》第 39 條。依該條規定，事業辦理二氧化碳捕捉後之封存，應向中央主管機關提出試驗計畫或執行計畫申請核准。據此，環境部於 2025 年 12 月 22 日正式預告《二氧化碳捕捉後封存管理辦法》草案，標誌地下封存已由技術討論逐步進入制度化管理階段。草案總說明亦明確指出，其目的在於確保二氧化碳捕捉後能於地下儲集層長期穩定封存，並據以建立封存核准與管理之制度基礎。

就制度設計而言，草案並非僅針對單一封存行為設置申請程序，而是以生命週期管理為主軸，將探勘、封存核准、營運監測、補救應變、封井及封井後監測等事項納入同一治理架構。其核心意義，在於將封存活動視為具長期風險管理特性的地下利用行為，而非一次性工程許可。也因此，辦法內容不僅處理核准前的資格、文件與審查程序，也涵蓋核准後的監測申報、資訊公開、財務安全、異常應變與監測義務解除等安排。

此外，草案所處理者主要為封存核准及管理事項，但探勘、土地或海域使用、環境影響評估及相關基礎設施，仍需與其他既有法規共同銜接。換言之，現階段臺灣 CCS 法制建置已開始形成以《氣候變遷因應法》授權為核心、並由管理辦法具體化執行要求的基本架構。

3.2 場址選定、探勘與前期審查

在整體制度中，前期審查的重點不在於直接核准封存，而在於先確認場址是否具備進一步開發的基礎條件。草案明定，事業申請封存核准前，應先取得中央主管機關同意之地質探勘文件。其制度意義，在於以探勘作為前置程序，先確認場址具備封存適宜性，並避免後續開發衝突。

依草案內容，申請同意探勘文件時，除基本申請資料外，尚須提出地質探勘計畫書、土地使用相關文件、環境敏感地區查詢結果、財力證明，以及具地質封存探勘與封存潛能評估之專業技術與經驗證明。地質探勘計畫書本身亦須包含探勘場址範圍、地質背景資料、封存調查規劃、鑽井工程與井下測試規劃、

工程進度與經費規劃等內容。若探勘場址不在公告封存潛力區內，並須補充選址理由、替代方案比較及初步封存潛能評估。這些要求顯示，前期探勘並非僅為取得局部地質資料，而是為後續封存核准建立場址適宜性與方法論的基礎。

因此，前期審查的核心可歸納為兩個層面。一是確認場址是否具有可支撐封存之地質潛力，二是確認探勘與後續開發是否具備基本安全性、技術能力與執行條件。這也使地質探勘不只是技術作業，而成為封存治理鏈條中的第一道制度門檻。

3.3 環評銜接、封存核准與審查程序

在完成探勘後，制度即由前期場址驗證進入正式封存核准程序。草案明定，申請封存核准時，應檢具試驗計畫或執行計畫、土地使用相關文件、環境影響評估審查通過文件、財力證明、專業技術及經驗證明，以及封存或封井後監測之環境損害責任保險或財務保證文件等。試驗計畫或執行計畫則須載明封存區位、方法、目標量、地質探勘調查結果、環境衝擊與風險評估、可行性評估、環境監測規劃、補救措施及緊急應變計畫、封井規劃與財務安全規劃等。可見封存核准所審查者，並不限於是否可以灌注，而是對場址、方法、風險、監測及後續責任進行整體性審查。

從程序上看，草案將審查區分為形式審查與實質審查，並設有補正、准駁與期限規定，同時明定封存核准文件之應記載事項及有效期限。封存核准最長為十年，展延亦有次數與期間限制。這種制度設計反映的並非一次核准後即永久有效，而是將封存活動置於持續可檢核、可更新的行政監理框架下。

因此，封存核准程序的重點，不只是使事業取得法定許可，而在於透過文件要求與審查程序，將場址安全、環境風險、技術可行性與財務責任等事項一併納入核准判斷。這也使環評、封存核准與後續監理之間形成連續關係，而非彼此分離的行政程序。

3.4 注入營運、監測機制與後監測責任

在取得封存核准後，制度即進入營運監理階段。草案要求事業依核准內容執行封存，並於封存期間持續進行環境監測、定期申報紀錄，且在封存及封井

後監測期間，須將封存場址現況影像、地表二氧化碳濃度通量、地層壓力與溫度，以及地震監測等即時資訊上傳至指定網站。草案並另要求事業設置網路平臺並公開指定資訊，以落實資訊透明與公眾監督。由此可見，監測在制度中的角色，不僅是技術管理手段，也是封存期間持續受監理與公開檢視的重要基礎。

草案同時將異常情形、補救措施與緊急應變納入制度核心。若異常情形達到停止灌注條件，事業應停止封存作業，依核定之補救措施及緊急應變計畫執行，並於二十四小時內通報中央主管機關。經確認異常排除，且監測數值符合規範後，始得申請恢復封存作業。這顯示封存營運並非依核准後固定不變地持續執行，而是必須在動態監測與異常應變機制下運作。

至於封井與後續責任，草案規定，達封存目標量後應提出封存完工報告並執行封井；在特定情況下，中央主管機關亦得命事業封井。完成封井後，事業仍須進入封井後監測階段，原則上監測至少二十年，並須提送監測完工報告，經審核通過後始得解除監測義務。封存及封井後監測期間，事業並應依核准之財務安全規劃執行，按年提送財務報表，且應保存申報或備查紀錄三十年，以利後續查核及責任釐清。換言之，草案所建構者並非只到封存核准為止，而是一套延伸至封井後監測與責任管理的長期制度架構。

四、價值鏈佈局與經濟條件

4.1 碳源分布與群聚特徵

臺灣 CCS 發展在空間配置上具有一定優勢。依據環境部資訊平台資料（環境部氣候變遷署，2014），全臺 562 家直接排放廠家總排放量約 2.1 億噸二氧化碳當量，其中前 22 大廠家占總量 81.9%，主要集中於高雄小港、台中龍井、雲林麥寮，以及北部林口與大潭等地（圖 3）。此一排放源分布具有明顯的群聚特徵，為後續以區域化方式規劃捕捉、運輸與封存系統提供了空間基礎。

4.2 捕捉、運輸與封存的整合需求

目前國內較具可行性的捕捉技術以燃燒後化學吸收法為主，例如胺液吸收。此類技術具備與既有排放源整合的優勢，但其能耗與成本負擔仍相對顯著。依現有評估，捕捉端成本約占整體 CCS 價值鏈總成本七成左右，因此成為影

響經濟可行性的主要因素。就國內推動條件而言，捕捉端是否能順利導入，除技術成熟度外，也與後續運輸與封存系統能否接續密切相關。

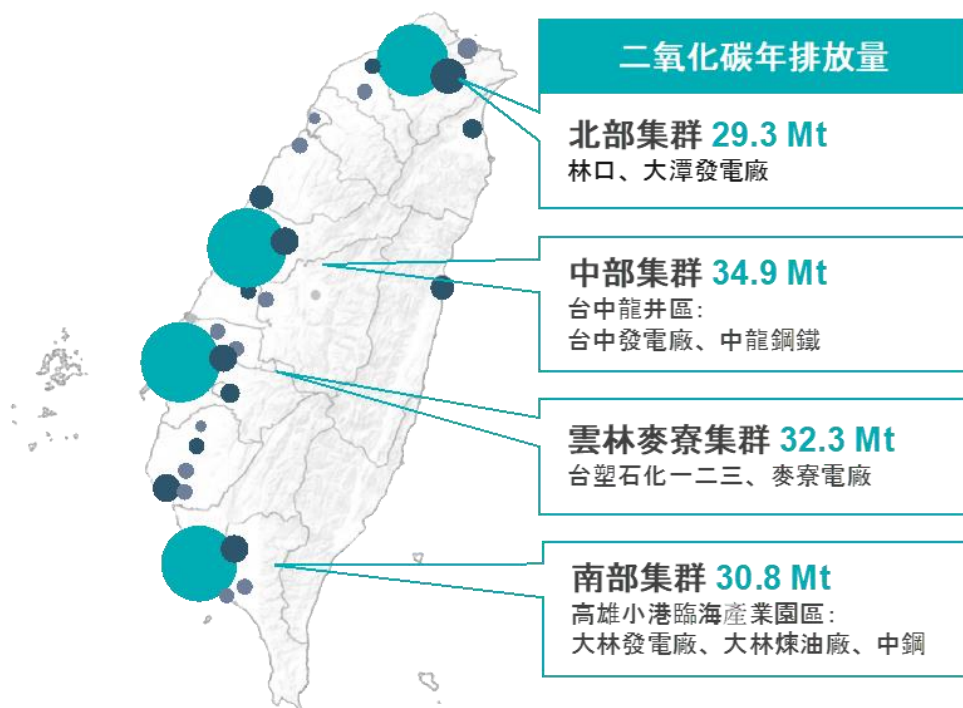


圖 3、臺灣二氧化碳直接排放源之地理分布示意圖

如圖 4、A 所示，臺灣不同區域較適合採取不同運輸模式。北部與中西部排放源距潛在封存區較近，且可沿既有工業與沿海空間帶進行規劃，因此較適合優先評估陸上或沿岸管線輸送。相較之下，南部高排放源雖然群聚明確，但若以長距離陸上管線銜接中西部或近海封存區，將面臨較高的土地協調、人口密集區避讓與沿線社會風險，因此較適合在港區完成液化與裝載，再以船舶運輸至封存樞紐附近海域，之後透過短程海底管線進行灌注。此一差異化配置並非單純的技術選擇，而是區域空間條件與社會可行性共同作用下的結果。

除運輸配置外，封存端條件亦直接影響整體系統規劃。如圖 4、B 所示，碳封存適宜性並不僅取決於是否存在深部地層，而須同時具備可作為儲集層的地層條件，以及足以抑制二氧化碳向上逸散的蓋層配置。依現有制度與技術研析，場址評估應確認儲集層、蓋層與斷層條件，並檢視封存能力、地質穩定性及潛在洩漏風險；在前期篩選上，亦應排除活動斷層等高風險區域。為建立上

述判斷基礎，場址篩選階段需整合既有油氣井、震測與海域地質圖資，必要時補充二維地震調查；場址選定階段則需進一步透過三維地震調查建立地下模型，並藉由探勘井與岩心分析驗證儲層、蓋層及斷層條件。換言之，封存場址是否適宜，關鍵不在於距離排放源遠近，而在於其是否同時具備足夠灌注深度、良好封閉性與長期封存安全。

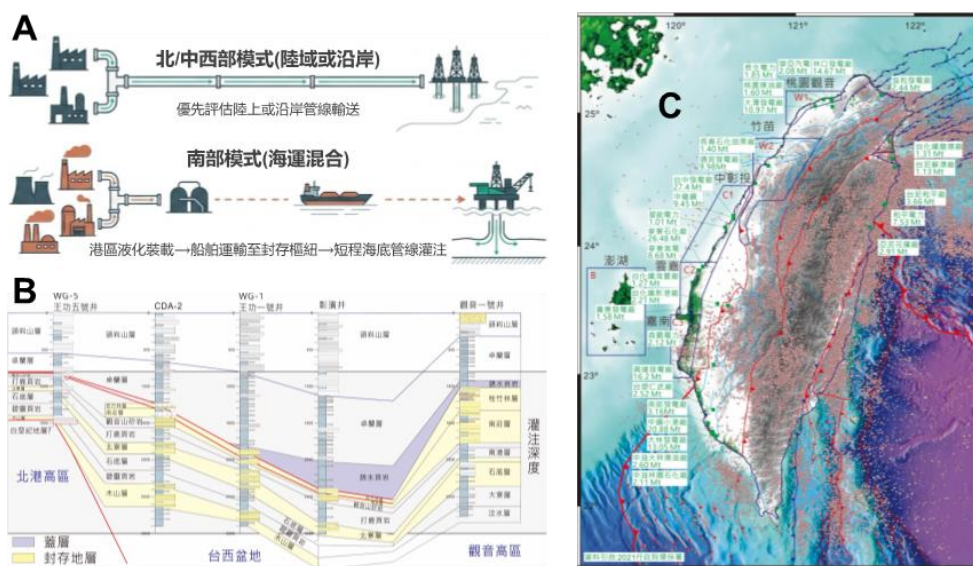


圖 4、臺灣 CCS 系統整體配置示意圖：(A)區域碳源集群運輸模式；(B)碳封存地層特性分布（由國立臺灣大學地質科學系陳文山教授提供）；(C)碳源、地震帶及潛在封存場址空間配置（由國立臺灣大學地質科學系陳文山教授提供）

從區域配置角度觀察，如圖 4、C 所示，臺灣主要排放源集中於西部工業與能源設施周邊，潛在封存區位則與近海構造帶及西部沉積盆地分布密切相關。值得注意的是，場址配置不僅涉及碳源與海域距離，也涉及構造條件與地震風險分布。對位處構造活動明顯且斷層發育的區域而言，場址選擇須特別審慎，不能僅以運輸便利性或地理接近性作為優先依據。這也表示，臺灣 CCS 之整合需求並非單純將捕捉、運輸與封存三個環節線性串接，而是必須在碳源群聚、區域運輸方式、灌注深度、地層封閉性與地震風險之間進行整體配置與判斷。

4.3 財務條件與政策支持

CCS 屬於前期投資需求高、回收期較長的基礎設施型負碳措施，原因在於其推動並非止於排放源端的捕捉設備建置，而是必須同時涵蓋壓縮、運輸、注入、監測與後監測等多個環節。從排放源到封存場址之間，尚需有可銜接的運輸系統、穩定可用的儲層、具備長期監測能力的場址設施，以及相應的審查、責任保證與管理制度。這些條件多需在正式營運前即完成相當程度的投入，因此 CCS 具有典型的基礎設施特徵。

對臺灣而言，財務問題的核心並不只是成本高，而在於投資條件尚未成熟。首先，CCS 需要捕捉端、運輸端與封存端同步規劃，單一環節無法獨立形成穩定的商業模式。其次，場址調查、監測系統、責任保證與後監測安排，皆屬於前期即須投入的必要條件，但相關收益機制與成本回收路徑仍有待制度化。再者，CCS 涉及長期監理與責任安排，投資人關注的不僅是工程成本，也包括法規穩定性、許可程序可預測性與政策支持是否具有延續性。

因此，CCS 早期推動通常需要政策工具介入，以降低市場尚未成熟時的部署風險。國際經驗顯示，常見作法包括以差價合約穩定收益預期、以補助或共同投資方式分攤前期投入，或由公部門先行建置部分共用型運輸與封存設施。這些措施的共同目的，不在於永久取代市場，而在於協助跨越初期投入大、風險高、收益不明確的階段。

對臺灣而言，較具可行性的方向，應是採取分階段推動策略。其一，先透過示範驗證與場址調查累積必要資料，降低技術與監理不確定性。其二，依排放源分布與潛在場址條件，逐步形成區域性的運輸與封存配置。其三，配合碳定價、財務誘因與公共投資安排，建立較具可預測性的投資環境。如此方能使 CCS 由政策規劃逐步走向可執行、可融資、可持續擴展的部署路徑。

五、社會溝通與治理條件

CCS 的技術活動發生於地下深層，且風險判讀涉及長時間尺度，因此社會對地層穩定性、誘發地震、地下水與海洋環境影響等議題具有較高敏感性。這些關切不宜被視為推動過程中的附帶問題，而應納入制度設計與治理安排之

中。對臺灣而言，國土利用密度高，地方社會對大型基礎設施的風險感知通常更為直接，因此場址相關資訊若不足，疑慮往往容易擴大。

在國家 2050 淨零轉型架構中，「公正轉型」已成為核心原則之一。就 CCS 而言，其重點在於資訊公開、程序參與與風險溝通。國際案例顯示，常態化溝通窗口、地方參與機制與監測資訊公開，有助於降低資訊不對稱，並提升監管正當性。這並非僅為爭取支持，而是因為地下封存活動本身就涉及公共安全、空間使用與長期環境管理，因此需要具備更高程度的透明度與解釋義務（林軒如等人，2024）。

如圖 5 所示，我國 CCUS 社會溝通機制並非單一宣導工作，而是由資訊透明化與知識轉譯、在地脈絡分析與利害關係人盤點、風險管理與效益共享、利害關係人參與式雙向溝通，以及成效評估與回饋修正等多個面向所構成。其推動邏輯具有明顯的階段性。前期重點在於建立透明資訊、理解場址背景與在地脈絡，並盤點不同群體的關注議題與影響程度，以奠定信任與溝通基礎。中期則透過在地聯絡員、社區諮詢委員會、分眾說明會、焦點座談、工作坊與社群互動等方式，形成持續性的雙向溝通，並同步建立第三方驗證、緊急應變、在地就業與社區回饋等配套，以回應地方對風險與效益分配的關切。後期則需透過活動參與回饋、媒體與社群互動數據，以及民意變化追蹤等方式，檢視社會溝通成效，並作為後續調整依據。

在此脈絡下，資訊揭露不應只停留在法規條文要求，而需要有具體載體與持續更新機制。環境部已著手規劃 CCS 管理平台網站，未來將納入封存場址相關監測資訊的視覺化呈現，包括微震紀錄、井底壓力變化、土壤氣體濃度與現場影像等內容。其重點不只是公布資料，而是將原本偏技術性的監測結果，轉譯為可理解、可追蹤、可對照的公共資訊。這類平台的作用，在國際案例中已有可借鏡之處。例如日本苫小牧計畫即曾透過地方政府與執行單位的網站、電子公告欄與定期更新資料，持續公開注入量、井下壓力與溫度，以及地震與微震監測結果，藉此回應地方居民對安全性與透明度的關切（JCCS, 2020）。對臺灣而言，若未來能以類似方式建立固定揭露與查詢機制，不僅有助於提升社會對監測制度的理解，也有助於將封存場址管理逐步納入更穩定的公共治理

框架。

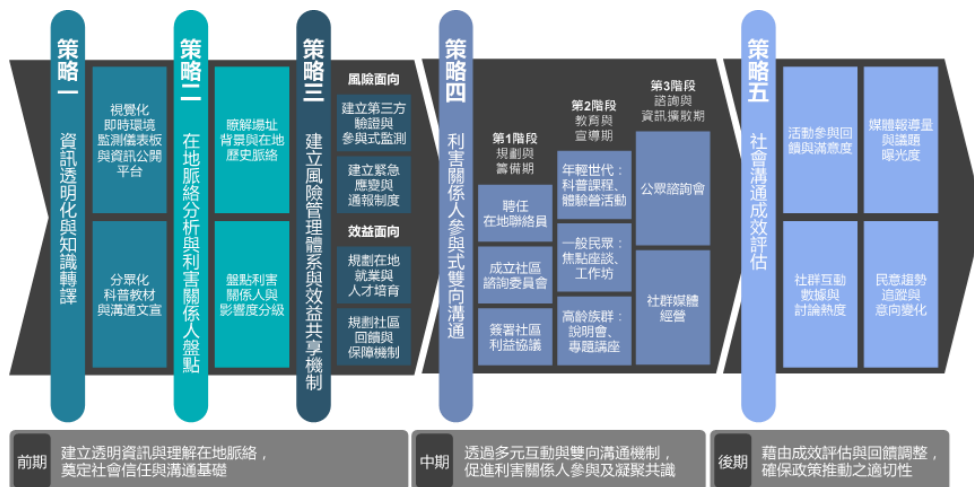


圖 5、臺灣公正轉型下 CCS 社會溝通機制示意圖

六、結論

臺灣碳捕捉後封存發展已逐步由概念評估轉向制度建置。從法規草案、場址評估、價值鏈配置到監測與資訊公開規劃，現階段已開始形成較完整的治理框架。未來隨著試驗計畫與制度細部設計持續推進，臺灣 CCS 可望由政策研議進一步走向工程實證與落地應用。綜合而言，臺灣推動 CCS 較具可行性的路徑，並非直接追求大規模商業化部署，而是應依序完成三項基礎工作。第一，建立與本地質條件相符的場址探勘、監測與責任移轉制度。第二，依碳源群聚特性規劃區域化的運輸與封存配置，逐步形成可銜接的價值鏈。第三，將資訊透明與社會溝通納入場址治理架構，而非視為技術推動之外的附屬工作。其共同核心，在於使封存活動同時具備制度可核准性、工程可執行性與社會可接受性。若此三者能同步推進，則 CCS 較有可能由制度建置階段穩健銜接至工程實證與後續部署，並成為臺灣淨零轉型下具操作性的治理工具。

參考文獻

Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) (2024). CCUS Business Models. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-ccus-business-models>

Global CCS Institute (GCCSI) (2025). Global Status of CCS 2025.

<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2025/10/Global-Status-of-CCS-2025-report-9-October.pdf>

Japan CCS Co., Ltd. (JCCS) (2020). Overview of Tomakomai CCS Demonstration Project. https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/09/Tomakomai-CCS-Demonstration-Project-Achievements-and-Future-Outlook_Shoichi-Ishii.pdf

Japan CCS Co., Ltd. (JCCS) (2022). 苫小牧における CCS 大規模実証試験ご説明資料. <https://www.env.go.jp/content/000081046.pdf>

Norwegian Ministry of Petroleum and Energy (OED) (2020). Longship – Carbon capture and storage. <https://www.regjeringen.no/contentassets/943cb244091d4b2fb3782f395d69b05b/en-gb/pdfs/stm201920200033000engpdfs.pdf>

Ove Arup & Partners Ltd. (2025). Carbon Capture & Storage in the UK: Accelerating Towards the Merchant Model. https://oeuk.org.uk/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2025/04/OEUK-CCUS-Market-Transition-Report-2025-j6pqfr.pdf

The CCUS Hub (2023). The CCUS Hub Playbook. https://ccushub.ogci.com/wp-content/uploads/2023/06/CCUS-Playbook_EN_2023.pdf

United States Department of Energy (USDOE) (2024). DOE's Carbon Management Strategy. <https://www.energy.gov/hgeo/does-carbon-management-strategy>

林軒如、尤晴韻、陳柏誼（2024）。碳捕存之國內外社會溝通案例與推動策略研析。台灣經濟研究月刊，47(11)，47–56。

國家發展委員會（2022）。臺灣 2050 淨零轉型公正轉型（Just Transition）關鍵戰略行動計畫（核定本）。

環境部氣候變遷署（2014）。事業溫室氣體排放量資訊平台，公開資訊及查詢。

https://ghgregistry.moenv.gov.tw/epa_ghg/Accession/PublicInformation.aspx

Organic Carbon Metabolism in Functional Microbiome for 2,4-Dichlorophenol Remediation

Chang-Lung Han

Carbon Neutral & Energy Research Center, National Kaohsiung University of Science and
Technology¹

Jiunn-Jyi Lay*

Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung University of
Science and Technology²

Abstract

The functional microbiome (FMb) exhibited high efficiency in degrading 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP), with sucrose serving as the organic carbon source. In batch experiments, sucrose concentrations of 1000–2000 mg/L and an initial 2,4-DCP concentration of 50 mg/L resulted in a reduction of 2,4-DCP from 55 mg/L to 20 mg/L within 15 days. Simultaneously, total organic carbon (TOC) decreased from 1645 mg/L to 960 mg/L, highlighting the consortium's strong degradation capacity. Optimal conditions (40 mg/L sucrose and 663 mg/L 2,4-DCP) achieved a maximum degradation rate of 0.39 day⁻¹, demonstrating its ability to handle high pollution loads. Environmental parameters shifted significantly during the process, with pH dropping from 8.0 to 5.5 and stabilizing at 5.8, while oxidation-reduction potential (ORP) declined from 10 mV to -160 mV, reflecting active microbial metabolism. Microbial community analysis identified Proteobacteria (75%) and Firmicutes (15%) as dominant phyla, with *Pseudomonas* (20%) and *Acinetobacter* (40%) playing key roles in pollutant removal. These findings reveal the FMb's potential for

¹ No.1, University Rd., Yanchao Dist., Kaohsiung City 824, Taiwan, ROC.
Tel: +886 7 601 1000 ext.32392; Fax: +886 7 601 1821
Email: dragon@nkust.edu.tw

² No.1, University Rd., Yanchao Dist., Kaohsiung City 824, Taiwan, ROC.
Tel: +886 7 601 1000 ext.32323; Fax: +886 7 601 1061
Email: lay@nkust.edu.tw

efficient chlorinated pollutant degradation and its applicability in bioremediation technologies.

Keywords: Bioremediation strategies, functional specialization, microbial diversity, nitrogen and sulfur cycling, structural heterogeneity

1. Introduction

2,4-DCP represents a pervasive organic contaminant that has emerged as a critical environmental concern due to its widespread presence in industrial applications, including pesticides, dyes, and wood preservatives. The compound's inherent toxicity combined with its remarkable environmental persistence poses substantial threats to both ecological systems and human health, establishing its remediation as a paramount challenge in contemporary environmental science (Montenegro-Ayo et al., 2021). The urgency of addressing this contamination stems not merely from its immediate toxic effects, but from its capacity to bioaccumulate and disrupt natural processes across multiple environmental compartments.

The advent of FMb-based approaches has revolutionized our understanding of pollutant degradation mechanisms. These sophisticated biological systems demonstrate remarkable capability in decomposing toxic organic compounds through intricate metabolic pathways while simultaneously contributing to carbon neutrality objectives (Lay et al., 2024). The significance of comprehending how functional microbiomes regulate organic carbon metabolism during contaminant breakdown cannot be overstated, as this knowledge forms the foundation for advancing bioremediation technologies and optimizing their operational efficiency. Recent investigations have illuminated the potential of microorganisms in pollution management, with Deng et al. (2022) exploring fungal contributions to 2,4-DCP degradation, thereby underscoring the vast potential inherent in microbial systems for environmental restoration.

The complexity of microbial degradation processes becomes particularly evident when examining anaerobic systems. Lin et al. (2024) demonstrated that anaerobic microorganisms possess the capacity to decompose organic pollutants through diverse biochemical processes, including nitrification, denitrification, desulfurization, and dechlorination. However, the precise biochemical mechanisms

underlying dechlorination remain enigmatic, representing a significant knowledge gap that continues to challenge researchers. The application of next-generation sequencing technologies has enabled unprecedented insights into microbial community structures, revealing dominant phyla such as Bacteroidota, Firmicutes, and Proteobacteria as key players in the co-metabolism of 2,4-DCP and organic matter. Specific taxa, including *Proteiniphilum* and *Clostridiales*, contribute significantly to metabolic activity (Lay et al., 2024), while low-abundance groups like Planctomycetota and Actinobacteriota, despite their limited representation, may play essential roles in maintaining functional diversity within microbial communities.

Environmental parameters exert profound influence on microbial degradation efficiency, with organic carbon supplementation emerging as a particularly effective enhancement strategy. Wang and Sun (2020) reported that sucrose, when employed as a supplemental carbon source, effectively accelerates 2,4-DCP degradation by providing additional carbon resources, stimulating microbial growth, and promoting the expression of enzymes essential for chlorinated compound breakdown. The optimization of carbon source supplementation strategies remains complex, as evidenced by varying responses to different organic substrates. Wang et al. (2020) observed improved sludge performance with sucrose addition, while Peng et al. (2022) demonstrated that low concentrations of acetic and propionic acids enhanced anaerobic ammonium oxidation, whereas higher levels favored heterotrophic denitrification. Pan et al. (2023) further highlighted how carbon source selection fundamentally affects microbial communities and metabolic patterns in denitrification systems.

The critical role of ORP and pH in governing microbial metabolic activity has gained increasing recognition. Zhai et al. (2024) suggested that nanoplastics could inhibit microbial performance by altering ORP conditions, while Vongvichiankul et al. (2017) emphasized the fundamental importance of these environmental variables

in influencing microbial activity and anaerobic digestion efficiency. Despite their acknowledged significance, the regulatory mechanisms governing these parameters remain poorly understood. Questions persist regarding how ORP fluctuations affect microbial metabolic activity and community structure, as well as whether microbial metabolic pathways undergo significant modifications under varying pH conditions (Rocha-Meneses et al., 2022). The interactive effects of additional environmental factors, including temperature and oxygen concentration, on microbial degradation efficiency require further clarification to optimize degradation technologies under diverse environmental conditions (Dhali et al., 2024).

Current investigations have revealed several critical knowledge gaps and research challenges that impede the advancement of microbial degradation technologies. Zhang et al. (2022) identified substantial deficiencies in comprehending enzyme functions, microbial responses to carbon sources, and the toxicity profiles of intermediate degradation products. The translation of laboratory-scale research findings to practical environmental applications encounters numerous obstacles, particularly within pollutant management contexts. Hafiz Adeel Ahmad et al. (2022) emphasized concerns surrounding emerging contaminants including pharmaceuticals and persistent organic pollutants, which present unique challenges due to their minimal concentrations yet profound ecosystem toxicity. These contaminants infiltrate aquatic environments extensively, compromising both ecological integrity and human health, while systematic evaluations remain constrained, especially regarding microbial degradation strategies across diverse aquatic systems.

The extrapolation of laboratory-validated capabilities to field-scale implementations constitutes another substantial challenge. Gonçalves et al. (2022) underscored pollution concerns stemming from pesticide utilization in major agricultural regions, observing that although bioremediation techniques provide viable solutions, practical deployment demands meticulous consideration of site-

specific characteristics and pesticide classifications. Advanced approaches including nano-bioremediation and enzymatic applications facilitate large-scale implementation yet retain inherent constraints. The progression from laboratory-scale technologies to field applications requires novel public policies and legislative structures to enable collaborative initiatives.

Long-term consequences of microbial degradation for carbon neutrality necessitate thorough investigation. While FMbs have exhibited capacity to enhance carbon transformation during pollutant remediation, ambiguities persist concerning whether these processes generate additional greenhouse gases, including methane or nitrous oxide. Moreover, the carbon sequestration efficiency of microbial degradation mechanisms must be rigorously evaluated to establish their potential contribution to comprehensive carbon neutrality goals. Systematic assessments of these extended impacts will clarify the position of microbial degradation technologies within global climate change mitigation frameworks.

Despite comprehensive research on microbial degradation of chlorinated compounds, fundamental knowledge gaps continue to limit understanding of FMb applications in environmental restoration. Previous studies (Lay et al., 2024) have established individual microbial strains' ability to degrade 2,4-DCP, yet metabolic autonomy and co-metabolic relationships between organic carbon sources and target contaminants within complex microbial consortia remain insufficiently characterized. Dynamic correlations between environmental variables such as pH and ORP and microbial community architecture during pollutant degradation have not undergone systematic investigation, consequently restricting optimization approaches for practical implementations. Current research lacks integrated statistical modeling methodologies capable of predicting optimal conditions for maximizing degradation efficiency in FMbs, while the evolution from H₂-producing microbiomes to functionally specialized microbiomes and their distinctive metabolic competencies have garnered inadequate attention. Additionally, although functional

microbiomes demonstrate potential to facilitate carbon transformation during pollutant treatment, uncertainties endure regarding possible greenhouse gas emissions and carbon fixation effectiveness, constraining comprehension of their contribution to carbon neutrality aspirations.

Addressing these identified deficiencies, this investigation elucidates the mechanisms and efficiency of 2,4-DCP degradation by FMbs through systematic examination of external factors influencing remediation processes. The research employs central composite design and response surface methodology to quantify independent effects of sucrose and pollutant concentrations on degradation kinetics, while environmental parameter fluctuations and their correlation with microbial metabolic activity are systematically monitored. Predictive regression models are developed to identify optimal operating conditions, and comparative microbial community analysis using NGS reveals functional divergence between different microbiome systems. These integrated approaches provide a comprehensive framework for understanding microbiome-mediated pollutant degradation processes, evaluating their implications for carbon neutrality assessment, and supporting the advancement of remediation strategies for practical environmental applications.

2. Materials and Methods

2.1 Experimental Design for FMb Co-Metabolism in 2,4-DCP Biodegradation

This study conducted systematic batch experiments evaluating FMb degradation capability on 2,4-DCP through comprehensive experimental design incorporating preliminary screening trials and multi-stage optimization strategies. The research framework integrated theoretical C/N ratio principles with environmental relevance assessments, establishing sucrose-to-2,4-DCP ratios from 20:1 to 40:1 through molecular weight calculations and co-metabolic theory applications. Based on optimal C/N ratios ranging 10:1 to 30:1, sucrose ($C_{12}H_{22}O_{11}$,

42.1% carbon content) serves as primary metabolic substrate providing 80-90% total carbon sources, while 2,4-DCP ($C_6H_4Cl_2O$, 44.2% carbon content) functions as co-metabolic target compound. Industrial wastewater contamination profiles guided ratio optimization through systematic derivation and experimental validation.

Statistical analyses employed factorial screening designs followed by response surface methodology across expanded concentration ranges (sucrose: 50-2000 mg/L; 2,4-DCP: 50-800 mg/L), incorporating multiple control groups including carbon-free controls and alternative substrates to validate metabolic specificity. Initial experiments utilized 1000 mg/L sucrose and 50 mg/L 2,4-DCP concentrations, with enhanced supplementation reaching 2000 mg/L to maximize decomposition efficiency. Environmental parameter monitoring encompassed pH dynamics from initial 8.0 conditions, ORP fluctuations, and comprehensive metabolite quantification including total organic carbon, chloride, sulfate, and ammonium ions. Central composite design with rotatable configuration ensured robust statistical modeling, while NGS provided temporal microbial community analysis.

2.2 Development and Characterization of a Functional Microbiome

The FMb utilized in this study originated from a composite liquid sample (HMb) obtained from an anaerobic hydrogen fermenter, as detailed by Chou et al. (2008) and Huang et al. (2011). The fermenter, constructed from stainless steel with a 100-liter capacity, was equipped with advanced control systems for precise regulation of pH, temperature, and agitation. Additionally, instruments for monitoring wet gas flow and ORP were integrated, facilitating accurate assessment of biogas production and microbial activity.

The study employed heat treatment at 80°C for 3 hours to prepare inoculum (Lay et al., 2005), selectively inhibiting non-spore-forming microorganisms while preserving spore-forming anaerobic hydrogen-producing bacteria. This pretreatment

established a FMb containing *Clostridium* sp. and *Bacillus* sp. The fermenter operated at $40\pm1^{\circ}\text{C}$ and $\text{pH } 5.6\pm0.1$ under quasi-CSTR conditions with mixing speeds below 20 rpm. However, this heat treatment constituted inoculum preparation rather than experimental control design. The research lacked heat-killed controls to verify microbial-mediated degradation activity, potentially compromising conclusions regarding biotic versus abiotic degradation mechanisms. This methodological limitation affects the reliability of microbial degradation efficiency assessments.

The feedstock used for fermentation comprised 10% molasses with a chemical oxygen demand (COD) of approximately 80 g/L, supplemented with essential nutrients. A semi-continuous feeding strategy was employed to achieve a quasi-hydraulic retention time (HRT) of one day. The medium composition per liter included 200 g NH_4HCO_3 , 100 g KH_2PO_4 , 10 g $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1.0 g NaCl, 1.0 g $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1.0 g $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 1.5 g $\text{MnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, and 0.278 g FeCl_2 . Under pseudo-steady-state operation, the hydrogen production rate stabilized between 120 and 240 L/day. The chemical and biological properties of HMb are presented in Table 1 and illustrated in Fig. 1.

Over a maturation period of 120 days, the FMb underwent ecological succession, establishing stable community architecture dominated by Proteobacteria (75%) and Firmicutes (15%). During this timeframe, specialized functional guilds emerged, with *Pseudomonas* (20%) assuming primary degradation responsibilities while *Acinetobacter* (40%) facilitated synergistic metabolism. Environmental parameters shifted systematically from pH 8.0 to 5.8 and oxidation-reduction potential transitioned from 10 mV to -160 mV, activating anaerobic metabolic pathways. This 120-day maturation culminated in optimal degradation efficiency of 0.39 day^{-1} , demonstrating complete functional development.

2.3 Biogas Production Experiment Setup

The experiments were performed at 41 °C using a 120-mL glass bottle volume as a bioreactor simulator. A rotary cell culture apparatus with a rotation of 1.5 rpm was used for mixing the content of the bioreactor. Several bioreactors equipped with different environmental conditions were simultaneously operated. Each bioreactor was fully charged with appropriate quantities of sucrose and FMb as well as 1.0 mL of medium. The standard minimal medium for the cultures, slightly modified from Lay (2000), contained the same composition as described in the feedstock preparation. The pH of the bioreactor content was initially adjusted to approximately 8.0 with 1.0 N KOH because the spore germination of spore-forming hydrogen-producing microbiota is induced rapidly in an alkaline culture. The medium pH was allowed to drop during batch fermentation. Production of biogas was measured by the displacement of the water-lubricated plunger of 5-50 mL glass syringes (Lay et al., 1999).

2.4 Analysis and Decomposition Evaluation of 2,4-DCP in Liquid Samples

Quantitative analysis of 2,4-DCP in liquid samples can be conducted using GC-FID. Samples are filtered through a 0.45 µm membrane to eliminate particulates and diluted with methanol or acetonitrile if concentrations exceed the optimal detection range. Calibration is performed using standard solutions with concentrations between 0.1 and 10 mg/L. A DB-5 capillary column (30 m length, 0.25 mm inner diameter, 0.25 µm film thickness) is recommended for separation. The injection port and detector are set to 250°C and 280°C, respectively, with helium or nitrogen as the carrier gas at a flow rate of 1 mL/min. The temperature program starts at 50°C (held for 1 minute), increases by 10°C/min to 250°C, and is held for 5 minutes. A 2.0 µL sample is injected for analysis.

The analysis of sulfate ions (SO_4^{2-}) and ammonium ions (NH_4^+) in liquid samples is carried out using ion chromatography (IC). A sample volume of 1–5 mL is filtered through a 0.45 µm membrane to remove impurities. If the analyte

concentration exceeds the detection limit, the sample is diluted with deionized water. Calibration is achieved using standard solutions ranging from 0.1 to 10 mg/L. SO_4^{2-} is analyzed using an anion exchange column with a carbonate or bicarbonate buffer as the mobile phase, while NH_4^+ is measured with a cation exchange column and methanesulfonic acid or a similar buffer. The column temperature is maintained at 30°C , the flow rate is set at 1.0 mL/min, and detection is performed using a conductivity detector.

TOC in liquid samples is quantified using a SHIMADZU TOC analyzer. Initially, a sample volume of 10–50 mL is filtered through a $0.45\ \mu\text{m}$ membrane to remove particulates, thereby protecting the instrument from potential damage. Should the TOC concentration exceed the measurable range of 0.1–1000 mg/L, the sample is appropriately diluted with deionized water to ensure accurate measurements. Calibration curves are constructed using standard solutions at concentrations of 0.1, 1, 5, 10, and 50 mg/L, facilitating precise quantification.

To uphold the scientific validity and reliability of the experimental results, this study implemented several control groups. The negative controls comprise a sterilization control, where the medium is autoclaved at 121°C for 15 minutes prior to the addition of equal concentrations of 2,4-DCP (50 mg/L) and sucrose (1000–2000 mg/L). This step eliminates the influence of non-biochemical reactions on pollutant removal. Additionally, a non-inoculated control assesses the contributions of indigenous microorganisms, while substrate controls feature a no-carbon setup, consisting solely of functional microbial communities and 2,4-DCP, to evaluate the necessity of added carbon sources. All control groups were cultivated under identical environmental conditions, with regular monitoring of 2,4-DCP concentration, TOC, pH, and ORP parameters.

In this study, the degradation of 2,4-DCP by FMb was evaluated using TOC analysis. This method entails measuring the TOC of samples both before and after

treatment, with the difference indicating the level of 2,4-DCP decomposition. To accurately assess removal efficiency, the theoretical TOC contribution of 2,4-DCP was also calculated. This theoretical TOC was derived from its molecular formula, $C_6H_4Cl_2O$, which has a molecular weight of 163.0 g/mol. The carbon content was calculated as $(6 \times 12.01) / 163.0$, yielding a value of 44.2%. This percentage is essential for determining the theoretical TOC based on the concentration of 2,4-DCP in the sample as follows:

$$\text{Theoretical TOC (mg/L)} = 2,4\text{-DCP (mg/L)} \times 0.442 \quad \dots\dots\dots(1)$$

2.5 2,4-DCP Degradation via Central Composite Design and Regression

Analysis

To understand the effect of sucrose and 2,4-DCP on the degradation of 2,4-DCP by FMb, a full factorial central composite experimental design and multivariate analyses were used to assess the effect of key variables on the degradation by HMb of 2,4 -DCP activity. In developing the regression equation, the test variables were coded according to the following Equation (2).

$$x_i = (X_i - X_i^*) / \Delta X_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

where X_i is the coded value of the i th test variable, X_i is an uncoded value of the i th test variable, X_i^* is an uncoded value of the i th test variable at the center point and ΔX_i is the step change value. Central composite design constitutes the fundamental framework within response surface methodology, establishing experimental architecture through $2k$ factorial points, $2k$ axial points, and n_c center points. Strategic replication at coordinate origin enables pure error estimation via $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} (y_i - \bar{y})^2}{n_c - 1}$, facilitating quadratic effect detection. Ten experiments were conducted

(see Table 2) incorporating five-level variations across two independent variables with dual central replications, yielding 2,4-DCP degrading activity responses from

FMb for rigorous optimization. The regression equation (3) is shown below.

$$Y = b + m_1X_1 + m_2X_2 + m_{11}X_1^2 + m_{22}X_2^2 + m_{12}X_1X_2 \dots\dots\dots(3),$$

where Y= predicted response; X1 and X2 = parameters; b = offset term; m1 and m2 = linear coefficients; m11 and m22 = squared coefficients; and m12 = interaction coefficient. Multiple regression analysis for Equation (3) was conducted using the LINEST function in Excel 2021, and its optimal conditions were determined using the “Solver” in Excel 2021.

2.6 16S rDNA Sequencing Workflow: Sample Preparation, Library Construction, and OTU Analysis

DNA extraction was carried out using either the WelPrep DNA Kit (Welgene Biotech Co., Ltd., Taipei, ROC, Cat no. D001) or the QIAamp® DNA Stool Mini Kit (Qiagen, Valencia, CA, USA), targeting an OD 260/280 ratio of 1.8-2.0. The bacterial V3-V4 hypervariable region of 16S rDNA was amplified with specific primers, following the protocol of the 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation Kit (Illumina, San Diego, CA, USA). Nextera XT Index Kit (Illumina, San Diego, CA, USA) was used to attach indexed adapters to the amplicons. The amplified DNA size was confirmed with the 4200 TapeStation System (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). Libraries were prepared using the MiSeq Reagent Kit v3 (600-cycle) and sequenced on the MiSeq platform (Illumina, San Diego, CA, USA) in a 2x300 bp paired-end format. All procedures, including sample preparation, library construction, and sequencing, were performed by Welgene Biotech Co., Ltd. (Taipei, ROC).

Paired-end FASTQ reads generated from sequencing were processed to remove Illumina PhiX Control using Bowtie 2. Quality control was performed with Trimmomatic, discarding sequences with an average quality value below 20. Clean reads were merged with FLASH based on overlapping regions, and mothur was used

for trimming low-quality ends and filtering by length. USEARCH removed PCR chimeras and constructed Operational Taxonomic Units (OTUs) at 97% sequence similarity. Taxonomic assignments were performed using *mothur* with the SILVA database v132. Krona was utilized for interactive visualization of metagenomic data. Qiime was employed to generate taxa abundance data and rank abundance curves. Alpha diversity indices, including Richness, Chao1, ACE, Shannon, and Simpson, were calculated with *mothur*. Rarefaction and species accumulation curves, along with Beta diversity indices (Bray-Curtis matrix, PCoA, and NMDS), were analyzed using the VEGAN R package. OTU analysis and annotation were completed by Welgene Biotech Co., Ltd. (Taipei, ROC).

3. Results

This study investigates the degradation of 2,4-DCP by FMb under varying sucrose concentrations to enhance efficiency and elucidate the interactions between FMb, organic carbon, and 2,4-DCP. Statistical analyses and response surface methodology are employed to evaluate the effects of organic carbon, leading to the identification of optimal conditions and the formulation of a model for FMb's co-metabolic interactions. Lay et al. (2024) emphasize the significance of anaerobic microbes in the degradation of organic materials through nitrification, denitrification, desulfurization, and dechlorination processes. Prior research has documented nitrification and denitrification under low-oxygen conditions (Hu et al., 2023) and desulfurization in anaerobic environments (Almenglo et al., 2023), although the mechanism of dechlorination remains ambiguous. To further investigate this, two experiments are conducted, with results presented in subsequent sections. In the sterilized control group, the concentration of 2,4-DCP fluctuates between 50 mg/L and 48.4 mg/L over 15 days, which is regarded as experimental error and does not represent significant degradation. Furthermore, the degradation rate in the group lacking added carbon sources is merely 0.06 day^{-1} . Consequently, the results pertaining to the control group are not discussed further in the following sections.

3.1 pH, TOC, and ORP as Indicators of FMb's Metabolic Adaptability during the Co-metabolism of 2,4-DCP with Sucrose

Fig. 2(A) depicts the degradation of 2,4-DCP by FMb in a solution containing 1000 mg/L sucrose and 50 mg/L 2,4-DCP. Initially, the 2,4-DCP concentration was 55 mg/L, which declined to 20 mg/L within 15 days and remained stable from day 15 to day 30. This stabilization likely reflects variations in microbial activity and environmental factors influencing the process. Wang and Sun (2020) report that sucrose supplementation can enhance the breakdown of 2,4-dichlorophenol by providing an additional carbon source, stimulating microbial growth, and promoting enzyme expression essential for degrading chlorinated compounds. The observed stabilization suggests an equilibrium between nutrient availability and biodegradation rates, indicating microbial adaptation to the conditions. These findings imply that sucrose might improve FMb's metabolic efficiency and potentially expedite pollutant breakdown, offering a possible approach for bioremediation in environments contaminated with chlorinated pollutants.

Fig. 2(B) further supports this by illustrating changes in TOC during the degradation of 2,4-DCP by FMb, with TOC levels adjusted to exclude the theoretical contribution of 2,4-DCP. Initially, the TOC was 1645 mg/L, reflecting the sucrose and medium carbon content. By day 5, TOC had dropped to 1293 mg/L as FMb began converting organic matter into carbon dioxide and water. This trend continued, with TOC reducing to 1172 mg/L on day 6 and reaching 1014 mg/L by day 13, a period of peak microbial activity where both added sucrose and existing organic matter were consumed. Yang et al. (2024) highlights the importance of microbial contributions to carbon cycle models, emphasizing their role in carbon transformation and adaptability, which aligns with the TOC dynamics observed in this study. A slight increase in TOC to 1080 mg/L on day 15 may reflect microbial production of new organic matter or measurement variability. By day 22, TOC had

further declined to 960 mg/L, indicating continued degradation, while a minor rise to 980 mg/L by day 30 suggests a slowdown in microbial activity as easily degradable substrates like sucrose were depleted. These results suggest the possibility of sucrose addition enhancing FMb's efficiency in the degradation of 2,4-DCP and its influence on the dynamics of observed carbon levels.

Fig. 2(C) builds on this by demonstrating the variation of pH during the co-metabolism of 2,4-DCP and sucrose by FMb, further elucidating the conditions that influence microbial activity. The initial pH of 8.0 provided an alkaline environment conducive to the facilitation of acid production during fermentation. Over the first 6 days, the rapid decline of pH to approximately 6.0 aligned with the observed increase in metabolic activity and TOC reduction, reflecting acid generation by FMb. By day 13, the further reduction of pH to 5.5, followed by stabilization, suggested consistency in acid production, which may have contributed to the sustained degradation of organic matter. Vanitha et al. (2023) emphasize the significance of pH in the degradation of organochlorine pesticides, identifying 2,4-DCP as a critical intermediate in the breakdown of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid via the addition of -OH groups. This suggests the potential influence of pH shifts on the efficiency of FMb in degrading 2,4-DCP with sucrose, as microbial activity and metabolic pathways are sensitive to pH levels. By day 30, the slight increase of pH to 5.8 suggests the possibility of reduced acid production or the establishment of equilibrium, emphasizing the interrelated roles of pH and TOC dynamics in influencing FMb's metabolic processes.

Building on the changes in pH and TOC, Fig. 2(D) illustrates the variation of ORP, providing further insights into the redox dynamics that underpin FMb's metabolic processes. The initial ORP of 10 mV reflected a mildly oxidative environment, likely due to surface aeration. By day 2, the sharp decline to -160 mV signaled a rapid shift to a strongly reductive state, driven by active oxygen consumption and the generation of reducing agents during microbial metabolism. As

the degradation of 2,4-DCP progressed, ORP gradually increased to -30 mV by day 13, suggesting the accumulation of intermediate by-products with weaker reducing properties. This trend corresponded to the stabilization of pH during the same period, indicating a balance between acid production and redox reactions. The study by Zhai et al. (2024) points out the sensitivity of microbial systems to environmental redox conditions, emphasizing the importance of ORP in maintaining efficient degradation. After day 16, the ORP began to decline again, reaching -90 mV by day 21, reflecting shifts in microbial electron transfer processes as substrates were further metabolized. By day 30, the slight rise to -85 mV suggests the establishment of a stable redox state, mirroring the equilibrium observed in pH changes. Together, these results demonstrate the complex interaction between pH, TOC, and ORP in shaping FMb's metabolic adaptability during 2,4-DCP degradation.

3.2 Organic Carbon's Role in FMb Degradation of 2,4-DCP—A Dynamic Analysis

To investigate the role of organic carbon, FMb was employed to degrade 2,4-DCP at an initial concentration of 50 mg/L, supplemented with 2000 mg/L sucrose as the carbon source. Over the 8-day experiment, both 2,4-DCP levels and TOC (total organic carbon minus the theoretical contribution of 2,4-DCP) were tracked. As shown in Fig. 3(A), the concentration of 2,4-DCP decreased from 50 mg/L to 16 mg/L by day 8, highlighting the capability of FMb to break down 2,4-DCP, though the degradation rate fluctuated during the process. Meanwhile, Fig. 3(B) displays a consistent reduction in TOC, which started at 1878 mg/L and declined to 1613 mg/L by the end of the experiment, reflecting the consumption of sucrose and other carbon sources during microbial activity.

Experimental results revealed that as 2,4-DCP concentrations declined, TOC levels also decreased, though at a more gradual pace. This phenomenon suggests that degradation intermediates may have been assimilated by the FMb or transformed

into alternative organic compounds, resulting in a less pronounced TOC reduction. Notably, a marked deceleration in TOC decline between days 3 and 4, despite ongoing 2,4-DCP removal, implies the possible formation of new organic species or incomplete mineralization of intermediates. This observation resonates with findings by Sasi and Suchithra (2024), who documented *Bacillus cereus*'s ability to degrade 2,4-DCP and phenol as sole carbon sources, highlighting the significance of meta-cleavage pathway enzymes and enhanced tolerance via cell immobilization. In this study, FMb effectively reduced 2,4-DCP from 50 mg/L to 16 mg/L using sucrose as an organic carbon source, underscoring the essential function of organic carbon in sustaining microbial activity and facilitating pollutant breakdown through dynamic metabolic cooperation among diverse microbial taxa.

Fig. 3(C) depicts the temporal variation in chloride ion (Cl^-) release throughout the 8-day 2,4-DCP degradation process, with Cl^- levels rising sharply from 42 mg/L to 140 mg/L by day 2, then steadily declining to 4 mg/L by day 8. This non-monotonic trend in Cl^- concentration, together with the identification of novel compounds via gas chromatography, suggests that 2,4-DCP undergoes a stepwise dechlorination involving the transient formation of intermediates. Such a mechanism is consistent with the degradation patterns observed by Setlhare et al. (2021), where *Pseudomonas sp.* and *Klebsiella pneumoniae* utilized 2,4-DCP as their sole carbon source through the ortho-pathway. The concurrent gradual reduction in TOC underscores the pivotal role of organic carbon in sustaining FMb metabolic activity and facilitating both the breakdown of 2,4-DCP and the transformation of its intermediates. Additionally, this process aligns with findings by Sasi and Suchithra (2024), who highlighted the involvement of meta-cleavage enzymes in similar microbial systems. Collectively, these findings support a multi-step, carbon-dependent degradation pathway mediated by FMb.

Fig. 3(D) and 3(E) illustrate the dynamic fluctuations in SO_4^{2-} and NH_4^+ ion concentrations, reflecting the metabolic processes involved in pollutant degradation

observed during the experiment. Sulfate levels, which initially measured 88 mg/L, exhibited a pattern of peaks and troughs. Concentrations increased to 97 mg/L on day two, decreased to 88.5 mg/L on day three, and peaked again at 99 mg/L on day four before gradually stabilizing. Similarly, NH_4^+ concentrations began at 206 mg/L, rose to 210 mg/L on day two, dropped to 197 mg/L on day three, and peaked at 222 mg/L on day four before stabilizing. These trends are consistent with the findings of Nikolaivits et al. (2020), who observed similar fluctuations during fungal degradation of 2,4-DCP, linking these changes to byproduct formation and compound breakdown. Furthermore, these observations align with the results reported by Li et al. (2024), who demonstrated that microbial consortia derived from sediment, contaminated soil, and sewage sludge effectively degraded organic pollutants, including PAHs, TPHs, and PAEs, with slightly reduced efficiency for PCBs (~85%). Despite variations in the initial degradation pathways, pollutants were found to converge on shared downstream routes, such as phthalic acid, benzoic acid, catechol, and ring-cleavage mechanisms. High-throughput sequencing and metagenomics analyses identified key degraders and functional genes driving these processes, underscoring the critical role of microbial consortia in pollutant removal and their potential for wastewater and soil remediation. These findings complement the observed effectiveness of FMb and further highlight the critical role of organic carbon in facilitating microbial degradation pathways. This conclusion is supported by earlier studies involving *Bacillus cereus*, which demonstrated the importance of organic substrates in enhancing microbial activity and pollutant breakdown.

Fig. 3(F) illustrates the dynamic changes in ORP during the experiment. At the outset (day 0), ORP was approximately 20 mV, indicating a mildly oxidizing environment. By day 2, ORP had dropped sharply to -225 mV, signaling a transition to strongly reducing conditions. Subsequently, ORP rose to -50 mV on day 4 before decreasing again to -180 mV by day 8. Concurrently, Fig. 3(G) showed a decline in pH from 8.0 to 5.8 by day 2, followed by a gradual increase to 6.1 by day 8, reflecting

the establishment of acidic conditions. These changes suggest a transition from oxidizing to reducing conditions, likely driven by microbial activity influencing sulfur and nitrogen cycles. Such microbial processes are consistent with the findings of Wang et al. (2020), who highlighted the potential of bioelectrochemical systems (BESs) to enhance electron transfer efficiency using low voltage, addressing limitations such as stability and residue formation in traditional methods. By integrating electrical currents with diverse microbial metabolisms, BESs provide innovative and sustainable solutions for pollutant degradation. Similarly, Li et al. (2024) described the construction of in situ functional microbial consortia through single-cell precision techniques, achieving superior pollutant degradation efficiency in real soil. Their approach, which combines genome-guided cultivation with Raman-activated cell sorting and stable-isotope probing, emphasizes the importance of microbial cooperation and metabolic diversity for efficient bioremediation. These findings support the observed effectiveness of FMb and underscore the critical role of microbial consortia in pollutant removal, as demonstrated with *Bacillus cereus*. They further highlight the potential of advanced microbial technologies in addressing environmental challenges.

3.3 Central Composite Design Optimization of FMb: Non-interactive Substrate Metabolism

To examine the effects of sucrose and 2,4-DCP on the FMb-mediated degradation kinetics of 2,4-DCP, researchers employed a two-factor, two-level central composite design across ten experimental setups. The experimental conditions are outlined in Table 2. Over the course of one week, data were collected, and the degradation rate of 2,4-DCP by FMb (expressed as 1/day) was calculated using data from the initial three days. This calculation followed the methodology described in Equation 4. The results are presented in Table 2.

$$V = - \left(\frac{C_i - C_o / C_o}{\Delta t} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Table 2 summarizes the results from ten experimental batches, each characterized by distinct concentrations of sucrose and 2,4-DCP. The coded variables X_1 and X_2 , derived from Equation (3), represent the relative levels of these factors, with "0" corresponding to their mean values. The actual concentrations of sucrose and 2,4-DCP are provided alongside the degradation rate (V) of 2,4-DCP, expressed in reciprocal days (1/day). Analysis of the data reveals that lower concentrations of 2,4-DCP (e.g., Batch No. 3) were associated with higher degradation rates. Similarly, reduced sucrose levels (e.g., Batches No. 1 and 6) also enhanced degradation efficiency. However, when both sucrose and 2,4-DCP concentrations were simultaneously low (Batch No. 5) or high (Batch No. 8), the degradation rate decreased. Notably, Batches No. 9 and 10, which represent central points with repeated experimental conditions, exhibited significant variability in V , suggesting potential influences from experimental conditions or uncontrolled variables. These observations suggest a non-linear relationship between V and the concentrations of sucrose and 2,4-DCP, implying the existence of an optimal concentration range for sucrose and 2,4-DCP to maximize FMB's degradation efficiency.

Central composite design methodology was employed to systematically optimize the degradation of 2,4-DCP by a FM through ten experimental configurations. Multivariate regression analysis produced polynomial models that included linear, quadratic, and interaction coefficients, achieving a determination coefficient of $R^2=0.9532$. Utilizing Newton's iterative algorithm, researchers identified optimal operational parameters, with sucrose concentration set at 40 mg/L and pollutant concentration at 663 mg/L, resulting in a maximum degradation velocity of 0.39 day⁻¹. The Excel LINEST function facilitated least-squares parameter estimation, while the Solver module executed constrained nonlinear optimization procedures.

Statistical analysis via Student's t-test established a hierarchy of coefficient significance: $X_2 > X_1 > X_2^2 > X_1X_2 > X_{12}$, indicating the predominant influence of

sucrose concentration over pollutant levels. Moreover, minimal interaction coefficients confirmed the presence of independent metabolic pathways within the microbial consortium. Sucrose catabolism occurs through glycolytic mechanisms that provide cellular energy, while the biotransformation of 2,4-DCP is mediated by specialized dechlorination processes. This metabolic independence mitigates competitive inhibition effects, allowing for simultaneous substrate utilization across varying concentration ranges.

Response Surface Methodology revealed a significant interaction mechanism between sucrose and 2,4-DCP concentrations on the degradation rate of the functional microbiome. The model's overall fit achieved $R^2=0.9532$, indicating that 95.32% of the variability in degradation rates could be explained by the model, thereby reflecting high statistical reliability and predictive accuracy. The analysis of Student's t-values showed that the intercept term exhibited the strongest statistical significance ($t=8.830$), while the quadratic effect of 2,4-DCP also reached a significant level ($t=3.304$), highlighting the nonlinear regulatory role of pollutant concentration on degradation kinetics.

The interaction term between sucrose and 2,4-DCP demonstrated statistical significance ($t=2.048$), with a negative coefficient value of -0.098 , revealing critical biochemical mechanisms. Under conditions of high sucrose and high 2,4-DCP concentrations, the microbial community tended to prioritize the metabolism of readily available carbon sources, resulting in a diminished competitive advantage for specialized degraders and an overall decrease in treatment efficiency. In contrast, configurations with lower sucrose concentrations compelled microbes to rely on the target pollutant as the primary carbon source, thereby promoting the ecological niche expansion of functional strains and optimizing degradation performance. The response surface model established precise guidelines for concentration ratios, scientifically validating the experimental finding that a combination of 40 mg/L sucrose and 663 mg/L 2,4-DCP achieves optimal treatment efficacy.

Experimental data revealed nonlinear relationships between sucrose concentration and degradation efficiency. Substrate inhibition was observed at elevated sucrose levels exceeding 1000 mg/L, where degradation rates declined despite the increased availability of carbon. Osmotic stress and metabolic overload likely compromised microbial activity under these high-concentration conditions. The empirical model established quantitative relationships between environmental parameters and degradation kinetics, providing predictive capabilities for industrial bioremediation applications. The concentration-dependent performance underscores the necessity of precise optimization strategies to enhance pollutant removal efficiency.

This observation aligns with the findings of Yang et al. (2022), who demonstrated the independent metabolism of indole and phenol, potentially governed by distinct enzyme systems or microbial communities. Similarly, the present results indicated that FMb metabolized 2,4-DCP and sucrose without mutual interference or enhancement of metabolic efficiency. This finding suggests that substrate metabolism operates independently, likely controlled by separate enzyme systems or microbial communities. The independence of these processes underscores the necessity of considering co-metabolic mechanisms for each substrate separately, consistent with the conclusions of Yang et al. (2022).

3.4 Microbial Community Shaped by Sucrose and 2,4-Dichlorophenol Co-Metabolism

Fig. 4 examines the intricate relationship between sucrose and 2,4-DCP co-metabolism and its impact on microbial community structure, as revealed by NGS. The analysis demonstrates that specific metabolic conditions influence the hierarchical organization of microbial taxa. At the phylum level, Proteobacteria were found to dominate at 75%, followed by Firmicutes at 15%, while other phyla collectively contributed 10% (Malla et al., 2022). *Gammaproteobacteria* accounted

for 70% at the class level, with Clostridia and other classes contributing 10% and 20%, respectively. Order-level analysis identified Pseudomonadales as a central node at 60%, while Clostridiales and other orders made up 10% and 30%, respectively (Emenike et al., 2023). At the family level, Moraxellaceae and Pseudomonadaceae represented 40% and 20%, respectively, while genera such as *Acinetobacter* (40%) and *Pseudomonas* (20%) were pivotal in pollutant degradation. Environmental shifts, including a decline in pH from 8.0 to 5.5 and a reduction in ORP to -160 mV, were observed to foster microbial activity. These findings highlight the adaptability of microbial communities and underscore the importance of optimizing metabolic conditions to enhance remediation, consistent with Lin et al. (2024) and Zhai et al. (2024).

4. Discussions

The comprehensive methodology employed in this study, encompassing batch experiments, statistical analysis, response surface methodology, and next-generation sequencing, has elucidated the intricate mechanisms governing organic carbon metabolism during 2,4-DCP degradation. Batch experimental results demonstrated that sucrose concentrations of 1000–2000 mg/L facilitated the reduction of 2,4-DCP from 55 mg/L to 20 mg/L within 15 days, achieving a removal efficiency of 64%. However, optimization experiments revealed that a sucrose concentration of 40 mg/L paired with 663 mg/L 2,4-DCP achieved maximum degradation rates of 0.39 day⁻¹, thereby establishing the superiority of low-concentration strategies.

Microbial community analysis confirmed that Proteobacteria (75%) and Firmicutes (15%) were the dominant phyla, with *Pseudomonas* (20%) and *Acinetobacter* (40%) playing pivotal roles in degradation. Low sucrose concentrations compelled microorganisms to utilize 2,4-DCP as the primary carbon source, thereby enabling specialized degraders to secure ecological advantages. Environmental parameter dynamics indicated a decline in pH from 8.0 to 5.5 before

stabilizing at 5.8, while the oxidation-reduction potential decreased from 10 mV to -160 mV. These findings reveal fundamental ecosystem processes, particularly bacterial contributions to carbon, nitrogen, and sulfur cycling. The discussion underscores the importance of microbial diversity in enhancing metabolic flexibility and promoting ecological stability.

4.1 Microbial Community Analysis: Comparing HMb and FMb

In this study, the FMb was derived from HMb through secondary fermentation, during which it acquired nitrogen and sulfur metabolism capabilities, enabling the dechlorination of 2,4-DCP (Lay et al., 2024). A comparison of the microbial distribution between HMb (Fig. 1) and FMb (Fig. 4) revealed that Firmicutes and *Actinobacteria* dominated both microbial communities, with these phyla comprising over 70% of the total microbiota. At the class level, *Bacilli* and *Actinobacteria* were identified as the primary constituents, underscoring their significance in the microbiome. Further analysis indicated that *Lactobacillales* and *Bifidobacteriales* were the predominant orders within these groups, playing crucial roles in maintaining ecological balance and facilitating functional metabolism. This structural composition suggests that both microbial communities exhibit significant similarities at the phylum, class, and order levels, potentially sharing similar functional characteristics within their ecological niches.

Firmicutes and Proteobacteria are prominently present at the phylum level in both HMB and FMB, playing crucial roles in metabolizing various organic and inorganic compounds across diverse environments. At the class level, *Bacilli* and *Gammaproteobacteria* are predominant, with these bacteria typically participating in key metabolic processes such as fermentation and redox reactions. As noted by Xu et al. (2021), the structure of microbial communities in anaerobic digestion systems is vital for ensuring digestion efficiency and stability. Firmicutes are primarily active during hydrolysis and acidification, producing extracellular

enzymes such as cellulase, lipase, and protease to break down complex organic matter. They have demonstrated strong resilience to extreme conditions, aiding in the production of acetic and propionic acids, which facilitates VFA accumulation. Proteobacteria, comprising various classes, are extensively involved in the degradation of organic matter and partial VFA consumption, exhibiting strong adaptability under high organic loads and variable environmental conditions. The synergy of these microorganisms is essential for maintaining system functionality and efficiency.

At the order level, the presence of *Lactobacillales* and *Pseudomonadales* highlights the adaptability of these bacteria to diverse environmental conditions and their involvement in various metabolic activities. Similarly, at the family level, the predominance of *Lactobacillaceae* and *Pseudomonadaceae* in both HMB and FMB underscores their significant roles in the metabolism of organic compounds and the degradation of environmental substances. In the study by Saati-Santamaría et al. (2022), these microbial similarities across different taxonomic levels were examined, emphasizing their environmental adaptability. This investigation highlights the importance of these families in ecological processes and reinforces their roles in maintaining system functionality and stability.

In FMB and HMB, dominant genera such as *Pseudomonas* and *Clostridium* display distinct metabolic strategies and ecological adaptations. *Pseudomonas* is known for its versatile metabolic pathways, including the degradation of substrates like 2,4-dichlorophenol and sucrose, enabling it to thrive in dynamic environments and contribute to pollutant degradation and nutrient cycling. Conversely, *Clostridium* specializes in hydrogen production, achieving high efficiency under stable, resource-specific conditions. This specialization enhances metabolic performance but may limit adaptability to environmental changes.

These strategies reflect a balance between specialization for resource

optimization and adaptability for resilience. The coexistence of these traits underscores the importance of microbial diversity in maintaining ecological stability and supporting effective bioremediation efforts, highlighting the critical role of microbes in addressing environmental challenges (Bai et al., 2021).

4.2 Functional Divergence of HMB and FMB Due to Microbial Composition

The microbiome composition and functionality of HMB and FMB exhibit significant differences. At the family level, *Lactobacillaceae* constituted 35%, and *Bifidobacteriaceae* accounted for 30% in HMB (Fig. 1), while in FMB (Fig. 4), these proportions decreased to 30% and 25%, respectively. At the genus level, *Lactobacillus* represented 40%, and *Bifidobacterium* accounted for 30% in HMB, whereas in FMB, these values dropped to 35% and 25%. Minor microbial populations also differed, with *Bacteroides* representing 15% in HMB but only 10% in FMB.

HMB's primary function is hydrogen production, achieved through anaerobic fermentation by bacteria within the Firmicutes phylum, particularly *Clostridium*, which excels at degrading organic matter and generating hydrogen gas. Sivaramakrishnan et al. (2021) highlighted several hydrogen-producing microorganisms, including strict anaerobes (*Clostridium* sp.), facultative anaerobes (*E. coli*), and photosynthetic bacteria (*Rhodobacter* sp.), which utilize substrates such as wastewater, lignocellulose, and organic acids. Among these, *Clostridium* has dominated HMB due to its high efficiency in organic matter degradation. Advances in genetic engineering, such as enhancing hydrogenase activity or suppressing hydrogenase uptake, have further improved hydrogen production efficiency in these systems.

In contrast, FMB exhibits broader functional capabilities, particularly in nitrogen and sulfur cycling. Processes such as nitrification, denitrification, sulfur

oxidation, and sulfur reduction are mediated by diverse microbial groups. According to Cao et al. (2020), nitrogen cycling relies on the cooperation between Anammox bacteria (e.g., *Candidatus Brocadia*), which convert ammonium and nitrite into nitrogen gas without organic carbon, and heterotrophic denitrifiers (e.g., *Pseudomonas*), which utilize organic carbon as an electron donor to reduce nitrate into nitrogen gas. Additionally, members of the *Proteobacteria* phylum, such as *Nitrosomonas* (nitrification) and *Thiobacillus* (sulfur oxidation), metabolize nitrogen and sulfur compounds. FMB also demonstrates pollutant degradation capabilities, such as breaking down 2,4-DCP through enzymatic systems provided by bacteria like *Pseudomonas*.

This study have emphasized the role of microorganisms in sulfur transformations, including oxidation, reduction, and disproportionation, which link sulfur cycling to biogeochemical processes involving carbon, nitrogen, and iron. These microbial activities influence carbon utilization, nitrogen loss, and pollutant breakdown, particularly under varying redox conditions. Functional microbial groups in FMB adapt to these diverse environments, enhancing their ability to degrade pollutants through sulfur-related pathways.

HMB and FMB share similarities in microbial classification; however, their differences in composition result in distinct functional roles. HMB, which is dominated by *Clostridium*, primarily supports hydrogen production under anaerobic conditions through the efficient degradation of organic matter. In contrast, FMB exhibits broader functionality, contributing to nitrogen and sulfur cycling as well as pollutant degradation, thereby enhancing its adaptability to dynamic environmental conditions.

4.3 FMB Specialization Driven by Microbial Diversity and Complexity

This study demonstrates FMB's capacity to metabolize 2,4-DCP and sucrose

independently, a capability attributed to its microbial diversity and functional versatility. Distinct enzymes and microbial taxa, such as *Pseudomonas*, facilitate separate pathways for pollutant degradation and biogeochemical cycling. Statistical analysis ($R^2 = 0.9532$) supports the hypothesis of independent metabolism, aligning with the findings of Yang et al. (2022), who observed similar patterns in the metabolism of indole and phenol. FMB's adaptability, as highlighted and enables efficient substrate processing without interference. Unlike HMB, which is dominated by *Clostridium* and specialized in hydrogen production, FMB's broader functionality arises from its complex microbial ecosystem, enhancing its role in pollutant management and ecological resilience.

The multifunctionality and metabolic independence of FMB can be attributed to the diversity and structural characteristics of its microbiome, as supported by Philippot et al. (2021). Their research emphasized that microbial communities possess functional redundancy and adaptability due to their diversity, enabling them to maintain stable metabolic functions under environmental changes. FMB's microbial community exemplifies this principle, comprising various specialized families and genera, such as *Pseudomonas*, which plays a critical role in pollutant degradation, as well as *Nitrosomonas* and *Thiobacillus*, which are involved in nitrogen and sulfur cycling. This diverse and specialized microbial structure endows FMB with functional redundancy, ensuring that when certain species are lost due to disturbances, others can compensate to sustain system stability. Furthermore, FMB's diverse metabolic pathways align with the findings of Philippot et al. (2021), which highlighted that such diversity allows microbial communities to adapt to variations in temperature, pollutants, or nutrient availability while continuing essential functions such as pollutant degradation and nutrient cycling.

The microbial community of FMB demonstrates exceptional structural diversity, which serves as the foundation for its metabolic autonomy and multifunctionality. This diversity has enabled FMB to process a wide range of

substrates, such as 2,4-DCP and sucrose, through distinct biochemical pathways. Key taxa, including *Pseudomonas*, *Nitrosomonas*, *Candidatus Brocadia*, and *Thiobacillus*, contribute to pollutant degradation and nutrient cycling, while the coexistence of dominant and less abundant groups, such as *Planctomycetota* and *Actinobacteriota*, promotes functional redundancy and cooperative metabolism (Lay et al., 2024; Zheng et al., 2024). Structural heterogeneity, as noted by Wasiet et al. (2013), has been critical for maintaining metabolic independence, and microbial diversity continues to enhance stability and adaptability (Philippot et al., 2021). These interactions allow FMB to support multiple metabolic pathways, reducing interference and fostering ecological balance. In contrast, HMB, dominated by hydrogen-producing taxa such as *Clostridium*, exhibits high efficiency in hydrogen production but lacks the functional breadth and resilience observed in FMB (Vongvichiankul et al., 2017). Thus, FMB's structural organization and microbial diversity underpin its versatility and stability, making it a promising system for addressing ecological challenges through advanced bioremediation and nutrient cycling processes.

The functional redundancy of FMB, wherein multiple microbial groups perform similar roles, ensures metabolic stability under changing environmental conditions, such as fluctuations in pH, redox potential, or substrate concentrations. The work of highlights the adaptability of microbial communities involved in sulfur and nitrogen cycling to diverse redox environments, which enhances the ecological resilience of FMB. The redundancy of functional roles has allowed compensation by other microbial groups when the activity of one group was inhibited, thereby maintaining the continuity of metabolic processes. This characteristic is particularly critical for the degradation of various pollutants, such as 2,4-DCP, and for the adaptation of FMB to complex environmental conditions.

According to Jing et al. (2021), the spatial structuring and metabolic segmentation within FMB's microbial community are likely central to its functional

versatility. Distinct taxa have been distributed across microenvironments, with anaerobic niches supporting organisms such as *Candidatus Brocadia* for sulfur reduction and ammonium oxidation, while aerobic zones favor microbes like *Nitrosomonas* and *Thiobacillus* for sulfur oxidation and nitrification. This spatial differentiation minimizes metabolic competition and enhances resource efficiency. In contrast, HMb is dominated by hydrogenogenic taxa, notably *Clostridium* and Firmicutes, which likely optimize hydrogen production under anaerobic conditions (Vongvichiankul et al., 2017). FMb's greater diversity, including Proteobacteria and minor taxa, fosters metabolic cooperation and redundancy, supporting robust nutrient cycling and pollutant degradation (Lay et al., 2024; Zheng et al., 2024). Thus, structural composition appears to underlie the divergent functions of HMb and FMb.

Building upon this comparison, HMb exhibits a more specialized microbial community structure predominantly composed of anaerobic microorganisms such as *Clostridium*, which are primarily engaged in organic matter degradation and hydrogen production. This functional specialization has enabled HMb to achieve high efficiency in targeted processes, particularly hydrogen generation. However, such specialization inherently restricts its adaptability and multifunctionality when compared to FMb. The broader diversity and spatial organization of FMb not only facilitate metabolic independence and cooperation among taxa but also enhance the system's capacity to process a wider range of substrates and address complex environmental challenges. Thus, the interplay between community structure and metabolic segmentation fundamentally shapes the ecological roles and functional breadth of HMb and FMb.

Recent insights into the dechlorination capabilities of functional microbiomes have yielded noteworthy findings, particularly regarding the ambiguous dechlorination pathways observed under anaerobic environments. Research has identified that *Proteobacteria* and *Firmicutes* were the dominant phyla within the microbial community, representing 75% and 15% of the total population,

respectively. Within this community, *Pseudomonas* and *Acinetobacter* were found to be critical for executing essential dechlorination functions, with relative abundances of 20% and 40%. The dynamic regulation of environmental parameters demonstrated a decrease in pH from 8.0 to 5.5, eventually stabilizing at 5.8, while the redox potential dramatically declined from 10 mV to -160 mV, thereby creating an anaerobic environment favorable for reductive dechlorination. The implementation of low sucrose concentrations compelled the microbial community to rely on 2,4-DCP as the primary carbon source, which promoted the establishment of ecological niches for specialized dechlorinating bacteria and facilitated a co-metabolic dechlorination process.

The synergistic network among dechlorinating bacteria, aromatic compound degraders, and fermentative bacteria has exhibited complex interactions. However, the presence of functional redundancy within FMb appears to serve as a stabilizing force, as multiple taxa are equipped to perform similar metabolic roles, thereby safeguarding essential functions against environmental disturbances (Lay et al., 2024; Zheng et al., 2024). This redundancy likely enables FMB to sustain pollutant degradation and nutrient cycling even when specific populations are compromised, as alternative microbial groups can compensate for functional losses (Jing et al., 2021). Wasiet et al. (2013) further suggested that such structural heterogeneity enhances resilience and accelerates recovery following perturbations. Collectively, these features suggest that functional redundancy in FMb contributes substantially to its robustness and adaptability, supporting stable metabolic activity under dynamic and often unpredictable environmental conditions.

5. Conclusions

This study addresses key challenges in bioremediation strategies for 2,4-DCP degradation. The biochemical mechanisms underlying dechlorination and pollutant metabolism remain insufficiently understood, particularly with regard to the

functional microbiome's role in organic carbon regulation (Lin et al., 2024). Environmental factors, such as pH and ORP, have been shown to influence microbial activity, yet their precise regulatory effects require further clarification (Zhai et al., 2024). Although sucrose supplementation has been observed to enhance degradation efficiency, its optimal concentration and prolonged effects on microbial dynamics remain undefined (Wang and Sun, 2020). Furthermore, the ecological significance of low-abundance microbial taxa in maintaining diversity and functional stability is often underestimated (Zheng et al., 2024). Scaling laboratory findings to complex, multi-pollutant environments continues to present a significant challenge (Yang et al., 2024). Future research should incorporate ecotoxicity assessments, such as bioassays, to evaluate pollutant risks and investigate the toxicity of degradation intermediates. Such efforts will enhance the applicability and scalability of bioremediation technologies. This investigation establishes five key conclusions regarding FMb performance in 2,4-DCP remediation and its potential for broader environmental applications.

5.1 Kinetic Performance and Degradation Efficiency: The FMb achieved maximum degradation rate of 0.39 day^{-1} under optimal conditions comprising 40 mg/L sucrose and 663 mg/L 2,4-DCP. Experimental trials demonstrated 64% pollutant reduction from 55 mg/L to 20 mg/L within 15 days. Concurrently, total organic carbon decreased 42% from 1645 mg/L to 960 mg/L, confirming comprehensive metabolic utilization and efficient transformation processes.

5.2 Environmental Parameter Regulation: Systematic monitoring documented pH acidification from 8.0 to 5.5, subsequently stabilizing at 5.8 through organic acid production. ORP declined 170 mV from +10 mV to -160 mV, indicating anaerobic metabolic conditions. These quantitative parameter shifts established operational benchmarks for process optimization and provided regulatory frameworks for bioremediation system management.

5.3 Microbial Community Structure: Taxonomic analysis identified Proteobacteria dominance at 75% relative abundance, with Firmicutes contributing 15% representation. Functional specialization occurred through *Pseudomonas* (20% community composition) and *Acinetobacter* (40% functional contribution). This distribution ensured metabolic redundancy and specialized degradation pathways, maintaining operational stability through coordinated microbial interactions.

5.4 Carbon Source Optimization: Sucrose supplementation between 1000-2000 mg/L enhanced biodegradation efficiency through co-metabolic pathway activation. Statistical analysis revealed concentration-dependent relationships between carbon availability and degradation performance. Organic carbon addition provided essential electron donors for dechlorination processes, establishing quantitative parameters for substrate balance and metabolic capacity enhancement.

5.5 Technology Performance and Scalability: The FMb exhibited superior pollutant handling capacity compared to conventional treatment systems. Integration of microbial community analysis with environmental parameter monitoring provided comprehensive optimization strategies. Research findings established quantitative foundations for scaling laboratory results to field applications, validating functional microbiome technologies for sustainable environmental remediation practices.

Acknowledgement

This project was supported by funding from the National Science and Technology Council, Republic of China. The preparation of this manuscript involved the use of AI-assisted tools to enhance English grammar, syntax, and overall readability.

Abbreviation

FMb	Functional Microbiome
2,4-DCP	2,4-Dichlorophenol
TOC	Total Organic Carbon
ORP	Oxidation-Reduction Potential
NGS	Next-Generation Sequencing
BTEX	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene
CAHs	Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons
HMb	Hydrogen Microbiome
COD	Chemical Oxygen Demand
HRT	Hydraulic Retention Time
DIET	Direct Interspecies Electron Transfer
GC-FID	Gas Chromatography-Flame Ionization Detector
IC	Ion Chromatography
SO ₄ ²⁻	Sulfate Ions
NH ₄ ⁺	Ammonium Ions

References

- Ahmad, H. A., Ahmad, S., Cui, Q., Wang, Z., Wei, H., Chen, X., Ni, S. Q., Ismail, S., Awad, H. M., & Tawfik, A. (2022). The environmental distribution and removal of emerging pollutants, highlighting the importance of using microbes as a potential degrader: A review. *Sci Total Environ*, 809, 151926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151926>
- Bai, S., Yang, M., Chen, Z., Yang, M., Ma, J., Chen, X.-P., & Wang, F. (2021). Distribution of functional microorganisms and its significance for iron,

- sulphur, and nitrogen cycles in reservoir sediments. *Acta Geochimica*, 40(6), 961-972. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00492-0>
- Cao, S., Du, R., & Zhou, Y. (2020). Coupling anammox with heterotrophic denitrification for enhanced nitrogen removal: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(19), 2260-2293. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1778394>
- Chou, C. H., Wang, C. W., Huang, C. C., & Lay, J. J. (2008). Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(5), 1550-1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.031>
- Deng, W., Zhao, W., & Yang, Y. (2022). Degradation and Detoxification of Chlorophenols with Different Structure by LAC-4 Laccase Purified from White-Rot Fungus *Ganoderma lucidum*. *Int J Environ Res Public Health*, 19(13). <https://doi.org/10.3390/ijerph19138150>
- Dhali, S. L., Parida, D., Kumar, B., & Bala, K. (2024). Recent trends in microbial and enzymatic plastic degradation: a solution for plastic pollution predicaments. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00011-0>
- Emenike, C. U., Agamuthu, P., Fauziah, S. H., Omo-Okoro, P. N., & Jayanthi, B. (2023). Enhanced Bioremediation of Metal-Contaminated Soil by Consortia of Proteobacteria. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(12). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06729-3>
- Gonçalves, C. R., & Delabona, P. d. S. (2022). Strategies for bioremediation of pesticides: challenges and perspectives of the Brazilian scenario for global application – A review. *Environmental Advances*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100220>
- Hu, S., Xu, C., Xie, Y., Ma, L., Niu, Q., Han, G., & Huang, J. (2024). Metagenomic insights into the diversity of 2, 4-dichlorophenol degraders and the cooperation patterns in a bacterial consortium. *Science of The Total*

- Environment, 912, 168723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168723>
- Huang, C. C., Chang, J. J., Ho, C. Y., Chen, W. E., Lay, J. J., Chou, C. H., & Han, C. L. (2011). U.S. Patent No. 8,003,344. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Jing, Z., Lu, Z., Zhao, Z., Cao, W., Wang, W., Ke, Y., Wang, X., & Sun, W. (2023). Molecular ecological networks reveal the spatial-temporal variation of microbial communities in drinking water distribution systems. *J Environ Sci (China)*, 124, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.10.017>
- Lay, J. J. (2000). Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen. *Biotechnology and bioengineering*, 68(3), 269-278. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(20000505\)68:3%3C269::AID-BIT5%3E3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(20000505)68:3%3C269::AID-BIT5%3E3.0.CO;2-T)
- Lay, J. J., Lee, Y. J., & Noike, T. (1999). Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste. *Water research*, 33(11), 2579-2586. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00483-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00483-7)
- Lay, J.J., Li, S.H., Han, C.L., & Zhong, W.Z. (2024). Nitrogen and sulfur metabolism in anaerobic hydrogen-producing microbiome as a challenge for 2, 4-DCP dechlorination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114488. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114488>
- Li, J., Luo, C., Cai, X., Zhang, D., Guan, G., Li, B., & Zhang, G. (2024). Microbial consortium assembly and functional analysis via isotope labelling and single-cell manipulation of polycyclic aromatic hydrocarbon degraders. *ISME J*, 18(1). <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae115>
- Lin, M., Pan, C., Qian, C., Tang, F., Zhao, S., Guo, J., Zhang, Y., Song, J., & Rittmann, B. E. (2024). Core taxa, co-occurrence pattern, diversity, and metabolic pathways contributing to robust anaerobic biodegradation of chlorophenol. *Environ Res*, 241, 117591. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117591>
- Malla, M. A., Dubey, A., Kumar, A., & Yadav, S. (2022). Metagenomic analysis
-

- displays the potential predictive biodegradation pathways of the persistent pesticides in agricultural soil with a long record of pesticide usage. *Microbiol Res*, 261, 127081. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127081>
- Montenegro-Ayo, R., Morales-Gomero, J. C., Alarcon, H., Corzo, A., Westerhoff, P., & Garcia-Segura, S. (2021). Photoelectrocatalytic degradation of 2,4-dichlorophenol in a TiO₂ nanotube-coated disc flow reactor. *Chemosphere*, 268, 129320. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129320>
- Nikolaivits, E., Agrafiotis, A., Baira, E., Le Goff, G., Tsafantakis, N., Chavanich, S. A., Benayahu, Y., Ouazzani, J., Fokialakis, N., & Topakas, E. (2020). Degradation mechanism of 2, 4-dichlorophenol by fungi isolated from marine invertebrates. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(9), 3317. <https://doi.org/10.3390/ijms21093317>
- Pan, Y., Sun, R. Z., Wang, Y., Chen, G. L., Fu, Y. Y., & Yu, H. Q. (2023). Carbon source shaped microbial ecology, metabolism and performance in denitrification systems. *Water Res*, 243, 120330. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120330>
- Peng, B., Xiang, T., Liang, H., & Gao, D. (2022). Impact of acetate and propionate on anammox process in an expanded granular sludge bed: Evaluation of microbial community dynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107173>
- Philippot, L., Griffiths, B. S., & Langenheder, S. (2021). Microbial Community Resilience across Ecosystems and Multiple Disturbances. *Microbiol Mol Biol Rev*, 85(2). <https://doi.org/10.1128/MMBR.00026-20>
- Rocha-Meneses, L., Zannerni, R., Inayat, A., Abdallah, M., Shanableh, A., Ghenai, C., Kamil, M., & Kikas, T. (2022). Current progress in anaerobic digestion reactors and parameters optimization. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02224-z>
- Saati-Santamaría, Z., Baroncelli, R., Rivas, R., & García-Fraile, P. (2022). Comparative genomics of the genus *Pseudomonas* reveals host-and

- environment-specific evolution. *Microbiology spectrum*, 10(6), e02370-22.
<https://doi.org/10.1128/spectrum.02370-22>
- Sasi, R., & Suchithra, T. V. (2024). Transcriptome analysis of a novel and highly resistant hydrocarbon-degrading bacteria during the removal of phenol and 2,4-dichlorophenol. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(19), 24115-24135. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04509-x>
- Setlhare, B., Kumar, A., Aregbesola, O. A., Mokoena, M. P., & Olaniran, A. O. (2021). 2,4-dichlorophenol Degradation by Indigenous *Pseudomonas* sp. PKZNSA and *Klebsiella pneumoniae* KpKZNSA: Kinetics, Enzyme Activity and Catabolic Gene Detection. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 57(5), 656-665. <https://doi.org/10.1134/S0003683821050148>
- Sivaramakrishnan, R., Shanmugam, S., Sekar, M., Mathimani, T., Incharoensakdi, A., Kim, S.-H., Parthiban, A., Edwin Geo, V., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield. *Fuel*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120136>
- Vanitha, T. K., Suresh, G., Bhandi, M. M., Mudiam, M. K. R., & Mohan, S. V. (2023). Microbial degradation of organochlorine pesticide: 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid by axenic and mixed consortium. *Bioresour Technol*, 382, 129031. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129031>
- Vongvichiankul, C., Deebao, J., & Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, oxidation reduction potential (ORP) and biogas production in mesophilic screw anaerobic digester. *Energy Procedia*, 138, 877-882. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.113>
- Wang, J., & Sun, Z. (2020). Effects of different carbon sources on 2,4,6-trichlorophenol degradation in the activated sludge process. *Bioprocess Biosyst Eng*, 43(12), 2143-2152. <https://doi.org/10.1007/s00449-020-02400-x>
- Wang, X., Chen, Z., Shen, J., Kang, J., Zhang, X., Li, J., & Zhao, X. (2020). Effect of carbon source on pollutant removal and microbial community dynamics in

- treatment of swine wastewater containing antibiotics by aerobic granular sludge. *Chemosphere*, 260, 127544.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127544>
- Wasi, S., Tabrez, S., & Ahmad, M. (2013). Use of *Pseudomonas* spp. for the bioremediation of environmental pollutants: a review. *Environ Monit Assess*, 185(10), 8147-8155. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3163-x>
- Xu, R. Z., Fang, S., Zhang, L., Huang, W., Shao, Q., Fang, F., Feng, Q., Cao, J., & Luo, J. (2021). Distribution patterns of functional microbial community in anaerobic digesters under different operational circumstances: A review. *Bioresour Technol*, 341, 125823.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125823>
- Yang, J., Ma, F., Dai, C., Wu, W., Fan, S., Lian, S., & Qu, Y. (2022). Indole metabolism by phenol-stimulated activated sludges: Performance, microbial communities and network analysis. *Environ Res*, 207, 112660.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112660>
- Yang, M., Liu, N., Wang, B., Li, Y., Li, W., Shi, X., Yue, X., & Liu, C.Q. (2024). Stepwise degradation of organic matters driven by microbial interactions in China's coastal wetlands: Evidence from carbon isotope analysis. *Water Research*, 250, 121062. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121062>
- Zhai, Y., Guo, W., Li, D., Chen, B., Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2024). Size-dependent influences of nanoplastics on microbial consortium differentially inhibiting 2, 4-dichlorophenol biodegradation. *Water Research*, 249, 121004.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121004>
- Zhai, Y., Guo, W., Li, D., Chen, B., Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2024). Size-dependent influences of nanoplastics on microbial consortium differentially inhibiting 2, 4-dichlorophenol biodegradation. *Water Res*, 249, 121004.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121004>
- Zhang, X., Luo, M., Deng, S., Long, T., Sun, L., & Yu, R. (2022). Field study of microbial community structure and dechlorination activity in a multi-solvents

co-contaminated site undergoing natural attenuation. *J Hazard Mater*, 423(Pt A), 127010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127010>

Zheng, F., Gao, J., Tang, M., Zhou, T., Zhu, D., Yang, X., & Chen, B. (2024).

Urbanization reduces the stability of soil microbial community by reshaping the diversity and network complexity. *Chemosphere*, 364, 143177.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143177>

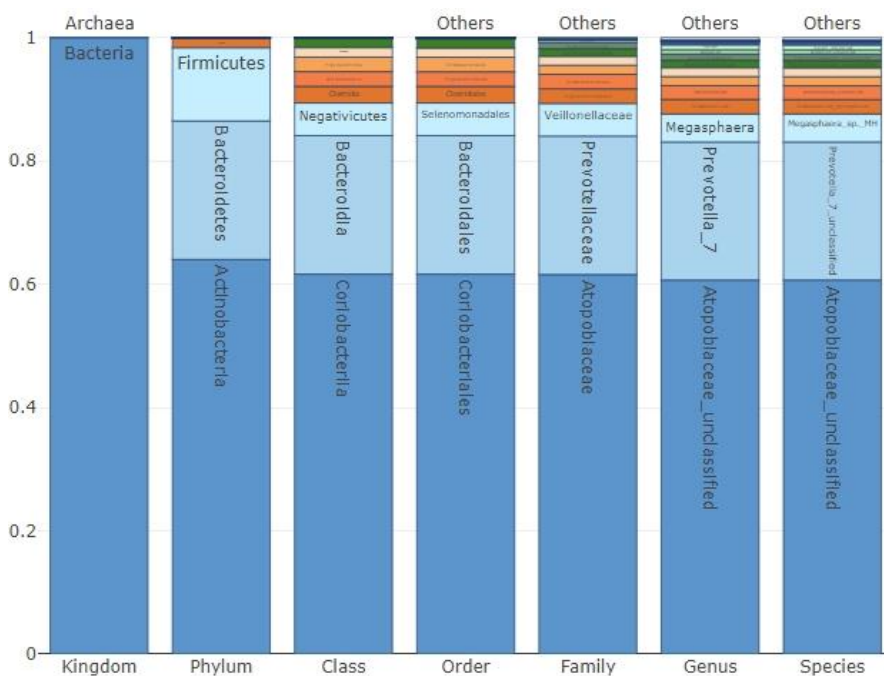


Figure 1 NGS analysis of the HMB sample shows the microbiome composition, dominated by *Bacteroidetes* and *Firmicutes*, with *Prevotellaceae* and *Prevotella_7* as the main taxa.

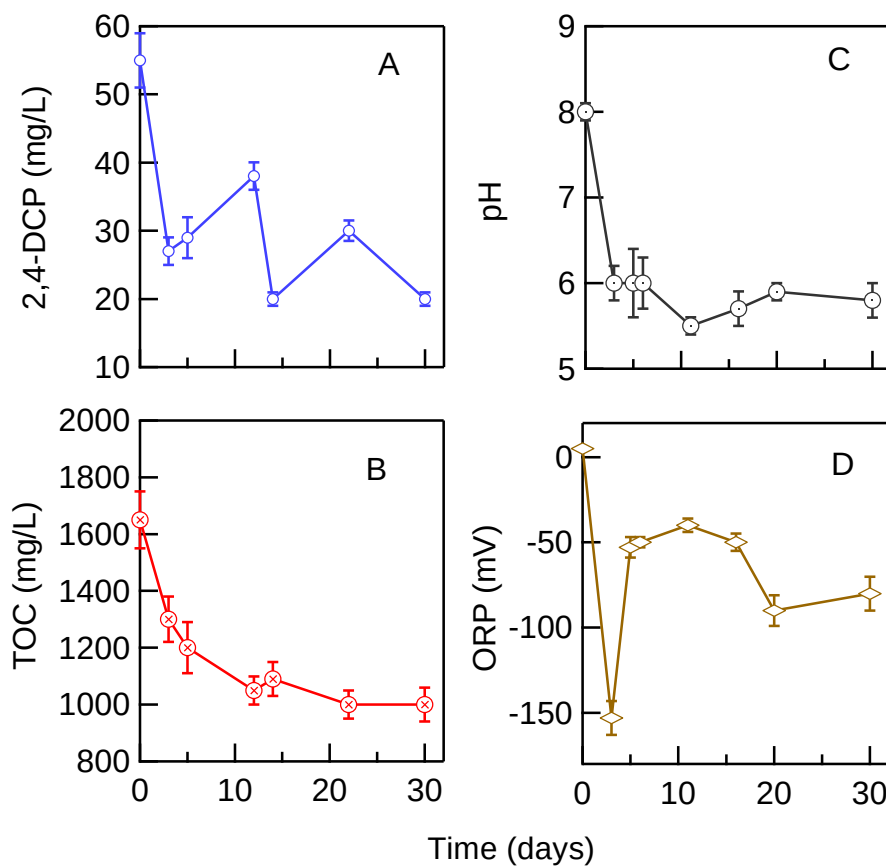


Figure 2 Dynamic changes in 2,4-DCP concentration (A), TOC (B), pH (C), and ORP (D) during microbial degradation of 2,4-DCP by FMb in a sucrose-supplemented medium. TOC measurements were adjusted by excluding the theoretical contribution of 2,4-DCP.

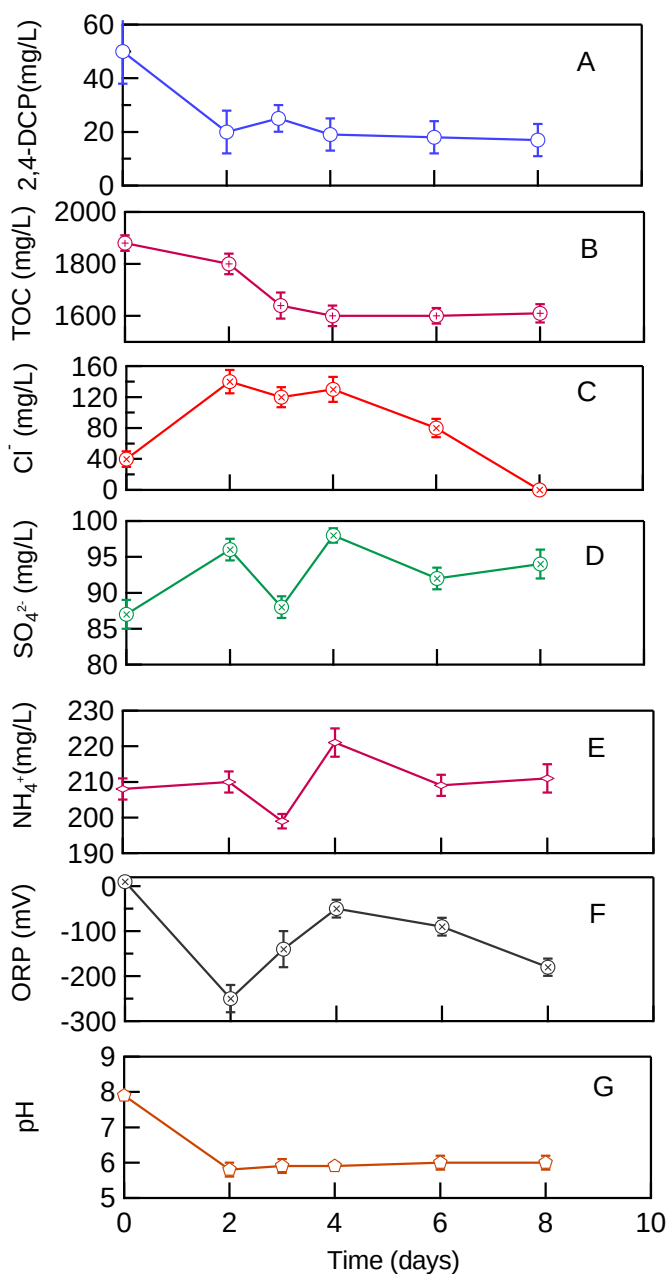


Figure 3 Temporal profiles of 2,4-DCP concentration (A), TOC (B), Cl⁻ (C), SO₄²⁻ (D), NH₄⁺ (E), ORP (F), and pH (G) during the biodegradation process of 2,4-DCP by FMb in a sucrose-enriched medium. TOC values were corrected by removing the theoretical contribution of 2,4-DCP to the TOC.

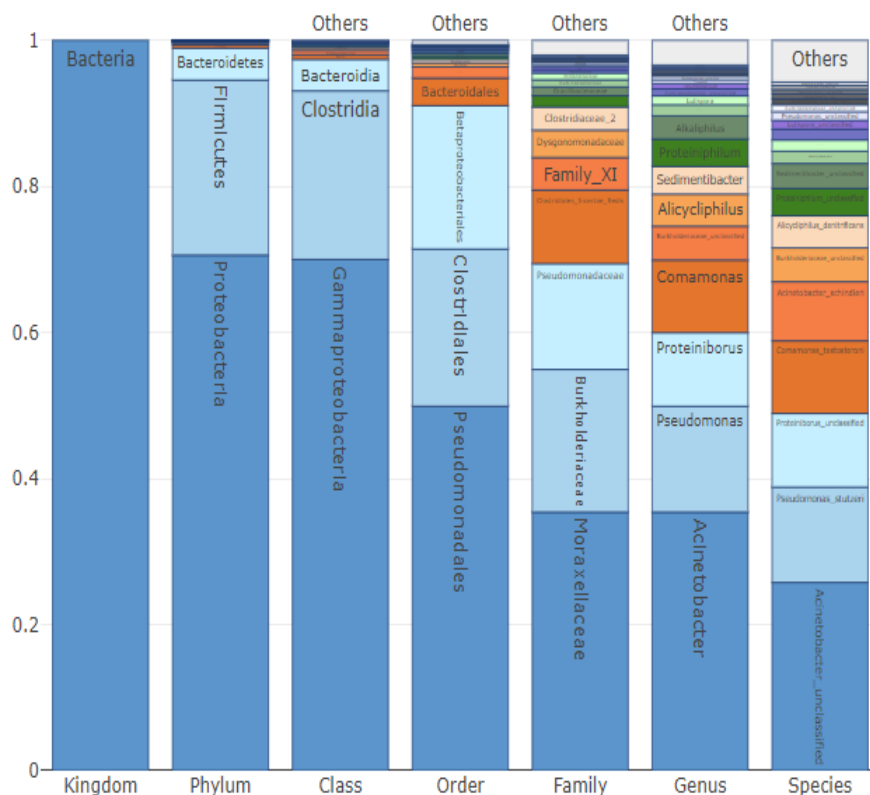


Figure 4. Hierarchical distribution of microbial taxa across different taxonomic levels during the co-metabolism of sucrose and 2,4-DCP, as revealed by next-generation sequencing (NGS). This analysis highlights the influence of specific metabolic conditions on microbial community structure and the predominance of key taxa.

Table 1. Component analysis of HMb, detailing its physical (specific gravity, pH, conductivity, and moisture content), chemical (free amino acids, total nitrogen, total organic carbon, nutrient levels of P, K, Ca, Mg, and Na, and C/N ratio), and microbial properties (populations of *Clostridium sp.* and *Bacillus sp.*).

Item		Value	Unit	Note
Specific gravity		1.02	-	
pH	(pH)	5.4±0.2	-	
Conductivity	(EC)	42	dS/m	
Free amino acids		27.1	mg/100g	
<i>Clostridium sp.</i>		1.2±0.2	10 ¹⁰ CFU/ml	
<i>Bacillus sp.</i>		2.1±0.3	10 ¹⁰ CFU/ml	
Moisture content		93	%	93%
Total Nitrogen	(TN)	873	mg/L	0.08%
Total organic carbon	(TOC)	26,250	mg/L	2.6%
Phosphorus	(P)	156	mg/L	P ₂ O ₅ (0.04%)
Potassium	(K)	13,633	mg/L	K ₂ O (1.64%)
Calcium	(Ca)	1,016	mg/L	CaO (0.14%)
Magnesium	(Mg)	490	mg/L	MgO (0.08%)
Sodium	(Na)	363	mg/L	0.04%
C/N Ratio	(C/N)	30		TOC/TN

Table 2 Design matrix illustrating the 2,4-DCP degradation rates (1/day) under varying concentrations of 2,4-DCP and sucrose. The variables X_1 and X_2 represent the coded levels of 2,4-DCP and sucrose, respectively, based on Equation (2). The degradation rates of 2,4-DCP are determined using Equation (4).

No.	Coded Units		Original Units		2,4-DCP
	X_1	X_2	2,4-DCP (mg/L)	Sucrose (mg/L)	Degrading Rate (1/day)
1	0	-1.414	75	400	0.25
2	0	1.414	75	1100	0.11
3	-1.414	0	40	750	0.42
4	1.414	0	110	750	0.05
5	-1	-1	50	500	0.43
6	1	-1	100	500	0.15
7	-1	1	50	1000	0.27
8	1	1	100	1000	0.09
9	0	0	75	750	0.23
10	0	0	75	750	0.31

Table 3. Results of multiple regression analysis based on the values from Table 2 using Equation (2). The table presents the regression coefficients, standard deviations, and the correlation coefficient (R^2). The Student-t statistic, calculated as the absolute value of the coefficient divided by the standard deviation, is included to assess the significance of each parameter in influencing the degradation rates of 2,4-DCP.

Item	m1m2	m22	m12	m2	m1	b
Coefficient	-0.017	-0.037	-0.010	-0.050	-0.098	0.268
Standard deviation	0.030	0.020	0.020	0.015	0.048	0.030
R^2	0.9532					
Student <i>t</i> -value	0.565	1.845	0.491	3.304	2.048	-8.830

智慧製造架構下機器人於石化製程安全管理實務應用研究

Practical Applications of Robotics under Smart Manufacturing for Process Safety Management in Petrochemical Industry

陸彥儒，國立高雄科技大學/設備可靠度與系統安全技術研發中心 博士

王振華，國立高雄科技大學/環境與安全衛生工程系 教授

聯絡作者: cwang@nkust.edu.tw

摘要

石化工廠因其製程特性涉及高溫、高壓、易燃、易爆與高毒性物質，長期被視為職業安全與製程安全管理中風險最高的產業之一。隨著設備複雜度與法規要求持續提高，加上專業人力短缺與現場工作負荷增加，傳統高度仰賴人力巡檢與經驗判斷的安全管理模式，逐漸顯露其結構性限制。為回應此一挑戰，近年來機器人技術結合人工智慧與感測系統，開始被引入石化工廠作為智慧製造架構下的重要安全輔助工具。本研究系統性探討機器人於石化工廠中之實務應用情境。機器人於石化工廠中的角色不應被視為取代人力，而是作為人機協作安全治理體系中的一環。唯有在充分理解其技術限制並結合制度與風險管理設計的前提下，機器人方能在職業安全與製程安全中發揮長期且可控的價值。

【關鍵字】 石化工廠、製程安全管理、職業安全、機器人、智慧製造

一、前言

石化和化工業因其高風險特性，一直被視為最具挑戰的製程產業之一。這些產業涉及大量危險化學品的使用和極端條件下的操作，增加了事故發生的可能性和嚴重性（Sklet, 2006）。多份事故調查報告顯示，這些產業的重大事故又稱為製程安全（Process Safety Management, PSM）事故，雖然 PSM 事故發生機率較低，但其後果卻非常嚴重且影響深遠。例如，西元 1984 年 12 月 3 日夜間，聯合碳化物有限公司於印度波帕爾（Bhopal）農藥工廠之異氰酸甲酯（Methyl Isocyanate, MIC）外洩事件災難導致數萬人死亡，超過 50 萬人受到不可逆傷害，經濟損失高達 9 億美元（Palazzi et al., 2015）；西元 1974 年 6 月 1 日於英國傅立可斯市（Flixborough）Nypro 公司化學纖維工廠臨時管線破裂引起爆炸，將整座工廠夷為平地，此災難造成 28 人死亡，數百人受傷，約 24 公頃的植物被摧毀（Saleh et al., 2014）；2005 年 3 月 23 日，英國石油公司 BP 於美國德州煉油廠爆炸事件，導致 15 人死亡，180 人受傷，經濟損失達數十億美元（Crawl and Louvar, 1990）。這些事故突顯了加強製程安全管理的必要性。為了更好地管理 PSM 事故，美國職業安全衛生署（Occupational Safety and Health Administration, OSHA）制定了《高危害化學品製程安全管理法令》（Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals，下稱 PSM 法規），其他國家也相繼推出類似規範，如英國於 1999 年頒布的《重大事故危害控制條例》（Control of Major Accident Hazards, COMAH）和新加坡 2017 年發布的《重大危害設施條例》（Major Hazard Installation, MHI）。台灣在修訂職業安全衛生法時，參考了美國 OSHA PSM 法規，制定了《製程安全評估定期實施辦法》，以加強國內的製程安全管理。這些法令頒布之目的為預防與減少 PSM 事故的發生。自 PSM 法規實施以來，事故發生比例有所下降，但仍未能完全滿足社會期望。因此，學者們致力於研究 PSM 事故的關鍵因子，尋求優先管控的項目。

石化產業長期被視為高度複雜且高風險的製造體系，其製程特性往往伴隨高溫、高壓、易燃、易爆與高毒性物質的長時間連續運作，一旦發生異常，所造成的後果不僅止於設備損壞或產線停擺，更可能引發重大火災、爆炸或毒化

物外洩，對人員生命安全、周邊社區與環境造成難以回復的衝擊。因此，無論在職業安全或製程安全的治理框架中，石化工廠始終被歸類為必須投入高度人力與制度資源，才能勉強維持風險於可接受範圍內的關鍵產業。然而，這種高度仰賴人力現場監督與經驗判斷的安全管理模式，正逐漸顯露其結構性脆弱。

在實務層面，石化產業普遍面臨人力短缺與專業斷層的雙重壓力。一方面，年輕世代對於高風險、高工時與高責任的工作型態意願降低，使得具備現場經驗的操作與維修人員逐年減少；另一方面，法規要求、設備複雜度與文件化管理負擔卻不斷增加，使得現場工程師與安全人員在有限的工時內，必須同時兼顧巡檢、監督、紀錄、許可、溝通與應變準備等多項任務。在這種「事情做不完」的工作情境下，即便人員具備高度專業與責任感，長期仍可能產生疲勞、注意力下降，甚至出現對低機率但高後果風險的麻木與僥倖心態，進而導致巡檢流於形式、異常未即時回報，或安全程序被簡化執行，為重大事故埋下潛在引信。

正是在這樣的產業背景下，智慧製造的概念逐步被引入石化工廠，並被寄予改善安全治理結構的期待。近年來科技的進步與突破，隨著各種智慧技術的快速發展，以及許多成功應用智慧技術於製程設備安全管理的案例，企業導入先進技術來協助製程設備安全管理已成為趨勢。先進的智慧化技術在化工製程安全中的應用具有多方面的優勢（陸彥儒、王振華，2024）：例如藉由人工智慧演算法提升設備可靠度，進而提高製程的綜合稼動率；藉由無人載具技術與智慧辨識技術，不僅能改善維修與檢測人員的工作效率，還能提升作業品質，降低人為操作失誤的風險等。

智慧製造所涵蓋的多項核心技術，其本質並非單純追求效率或產能提升，而是試圖重塑人、設備與資訊之間的互動方式。根據國際標準組織（International Organization for Standardization, ISO）於2021年提出的《智慧工廠白皮書》（White paper on Smart Manufacturing），說明智慧製造技術之範圍，其中列出需考慮的技術如下圖1所示（ISO, 2021）。其中，無人載具應用到的技術包含人工智慧（Artificial Intelligence, AI）、物聯網（Internet of Things, IoT）、網路連接與雲端運算（Cloud Computing）等智慧製造基礎技術項目。

對於石化產業而言，這些技術的真正價值，在於能否補足人力不足所造成的監督縫隙，並降低安全管理對單一個體經驗與即時判斷的高度依賴。

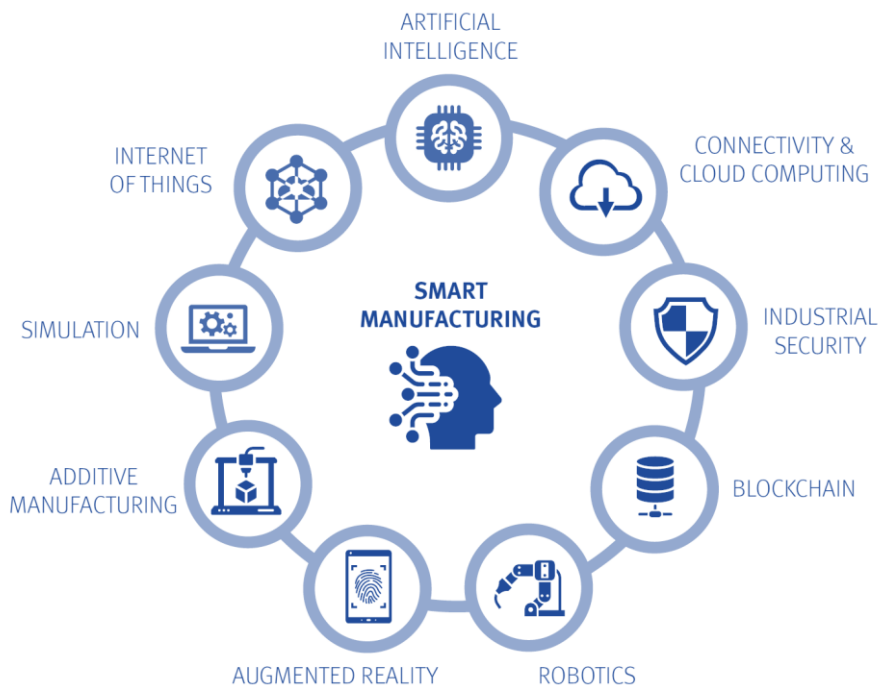


圖 1、智慧工廠基礎技術需求圖（陸彥儒、王振華，2024；ISO, 2021）

在智慧製造所提出的多項技術路徑中，機器人系統逐漸成為連結現場實體環境與數位安全管理的重要介面。相較於固定式感測器只能監測特定位置與參數，機器人具備移動能力與任務彈性，能夠深入人員不易長時間停留或本質上高風險的作業環境，成為「可移動的監督節點」。透過機器人協助執行例行巡檢、異常確認與現場回傳，不僅可降低人員暴露於危險環境的頻率，也能在既有人力架構不變的前提下，實質提升整體監督密度與涵蓋範圍。

進一步而言，當機器人不再只是單純的遙控或自動行走平臺，而是結合人工智慧影像辨識與即時分析能力時，其在職業安全與製程安全上的角色便產生質的轉變。透過高解析度影像、紅外線、氣體感測與聲學資料的同步蒐集，機器人可即時辨識人員未佩戴個人防護具、進入未授權區域、異常火源、洩漏痕跡或設備外觀劣化徵象，並即刻回傳警示資訊至中控室或行動裝置。這種即時性與一致性的辨識能力，能有效降低因人員疲勞、經驗差異或主觀判斷所造成

的安全盲區。

從更宏觀的角度來看，機器人搭配人工智慧的導入，並非取代現場人員，而是重構人機協作的安全治理模式。透過讓機器人承擔高風險、重複性與高頻率的監督工作，人員得以將有限的專業時間投入於異常研判、決策制定與跨部門溝通等高價值活動，進而提升整體職業安全與製程安全管理的成熟度。這種轉型不僅回應了石化產業人力結構的現實限制，也為建立更具韌性與前瞻性的安全管理體系奠定基礎。

因此，在探討機器人於石化工廠中的應用時，其核心意義不在於科技炫耀或單點自動化，而在於如何透過智慧製造架構，將機器人轉化為提升監督品質、降低人為失誤風險，並強化即時辨識與回應能力的關鍵工具。這樣的發展脈絡，正是後續各類機器人應用情境與實務案例得以成立的前提，也是石化產業在面對高風險與人力挑戰下，邁向新世代安全治理模式的重要起點。

二、機器人技術介紹

石化工廠由於佔地廣闊且設備繁多，傳統依賴人力的巡檢方式正面臨效率與安全的雙重挑戰。高溫、高壓、易燃易爆等危險因素時常存在，人工巡檢人員需要長時間奔波於廠區各處，不僅耗時費力，也可能因疲勞或環境限制而疏忽潛在異常，產生潛在危害。在此背景下，輪式/履帶式移動機器人（機器車）與四足仿生機器人（機器狗）應運而生。作為新一代智慧巡檢設備，被廣泛部署於石化產業以替代人工執行巡檢任務。它們成為工廠的「移動感測平臺」與「安全守護者」，能全天候自主地在廠區內穿梭，將人員從繁重且高風險的現場巡檢工作中解放出來。透過先進的感測器和人工智慧技術，機器車與機器狗在石化工廠展現出卓越的應用價值，提升運營效率並保障安全生產。

這些移動式機器人可定時在廣大的廠區內自主巡邏，檢查關鍵生產裝置的運行情況，並即時將現場數據回傳控制中心。相比人工方式，機器人巡檢系統具備高覆蓋率與高一致性的優勢，不會因人力疲勞或主觀因素遺漏任何角落，確保巡檢工作的全面性和精準性。特別是在一些人工難以頻繁到達的區域（如：大型儲罐區等），機器車與機器狗的自動巡檢能實現全天候不間斷監測，即使

數日內重複巡查也不會存在疲倦感，確保關鍵設備始終處於監控下。它們的功能不僅限於「行走的攝影機」，更是整合多種傳感技術和智能分析的巡檢平臺，可視作工廠的移動哨兵與數據采集員，在第一線替管理人員「眼觀六路、耳聽八方」，及早發現異常並發出預警。例如某大型石化企業引入機器狗巡檢後，巡檢效率提升到人工的 5 倍以上，且設備不預期故障的比率明顯下降，充分體現了此類機器人在提升巡檢品質與減少運行風險方面的價值。

在角色分工上，機器車與機器狗各有側重、優勢互補。一般而言，輪式或履帶式的機器車結構簡單穩定，載重大、續航久，適合沿著廠區道路和平臺執行長距離巡邏，並可搭載較多儀器裝置進行重點監測。



圖 2、輪式或履帶式的機器車

機器狗則模擬四足動物的運動方式，機動靈活，能深入更複雜的環境，因此常被用於精細巡檢或特殊環境巡查。

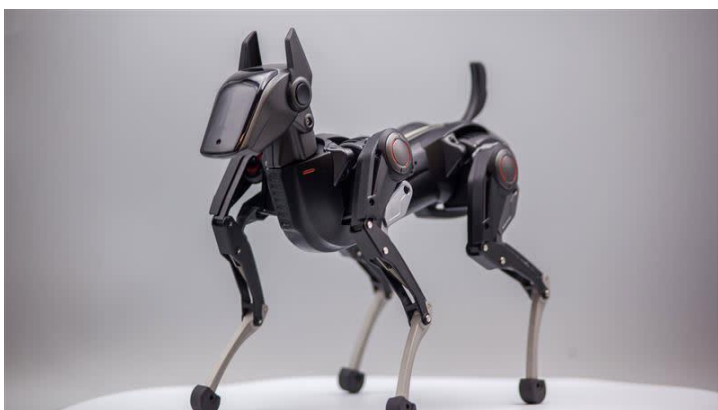


圖 3、機器狗（鍾釗榛，2025）

在一個智慧工廠方案中，機器狗可擔當巡檢員的角色替工人深入設備叢林，穿梭於狹窄的管線間或多樓層裝置上收集數據；而機器車則如同流動的監控平臺，在開闊區域來回巡邏，對廣大場區實施監視與數據匯總。兩者協同運作時，一個負責全面巡邏，另一個負責深入探查，能實現廠區監控的無縫覆蓋。

機器車與機器狗的另一價值，即在於以機器代替人員進入危險區域，藉此大幅降低人員暴露在有害環境的風險。這些機器人往往採用堅固耐用的工業級設計，具備如防爆、防塵防水（甚至達到 IP67 等級）等特性，足以在高溫、粉塵、易燃易爆的惡劣環境中長期安全運行。事實上，部分先進的機器狗已能在爆炸性氣體環境下替代工人進行檢查作業，甚至通過相關防爆安全認證，確保在高危區域運行時不會成為新的引爆源。例如瑞士研發的 ANYmal 四足機器人外殼達防爆標準，可深入油氣平臺或含可燃氣體的環境中執行任務，對石油公司而言帶來了降低工安意外與維護成本的雙重收益。

自主導航與遠端操作能力使機器人能在危險區自主穿行並維持通訊，令人員即使遠在控制室也可實時掌握現場情況。機器車與機器狗能夠自主地在廠區環境中避開障礙、規劃路徑，順利抵達指定巡檢點。而基於無線通訊技術的應用，它們拍攝的高解析即時影像和各類感測數據可毫秒級傳輸回後端，供監控人員和 AI 系統即時分析。在有異常發生時（如檢測到有危害氣體濃度超標或設備溫度異常），機器人系統能立刻自動發出警報，通知遠端人員採取行動。例如某些設備操作於高溫狀態，當設備內部耐火泥剝落時，內部的高溫直接衝擊設備殼壁，可能造成熱斑，甚至潛變破壞，這些耐火泥剝落在完整性操作視

窗 (IOW) 僅能列為資訊等級的資料，但透過結合機器人提高巡檢可行性，則可縮減發現異常到緊急響應的時間，爭取到更多的時效。此種實時回傳與預警機制確保高風險環境下問題的早發現、早處置。

更重要的是，藉由機器車與機器狗的併用，企業可真正實現危險作業區域（如：危險性工作場所、毒性化學物質運作場所、強酸強鹼區、廢水處理區...等）的無人化”值守”。

2.1 機器人在石化業之應用地圖

在石化工廠中探討機器人於職業安全與製程安全的實際應用時，必須回到工廠日常運作與事故風險生成的核心情境，說明這些應用並非技術導向的任意配置，而是源自於現場管理長期面臨的具體需求與限制。因此，本節所提出的應用案例，係以石化工廠中最具代表性、同時也是最容易形成安全管理落差的作業場景為主軸加以展開，包含：以巡檢路線制定為基礎的多層次巡檢應用（涵蓋常規性巡檢路線、大修期間之暫時性巡檢、夜間大範圍巡檢、廠區周界巡檢、工程施作期間巡檢，以及針對危險性工作場所、局限空間與毒性化學物質運作場所等高風險區域之巡檢需求），並延伸至動火許可作業之現場監控、揮發性有機物 (VOC) 之即時偵測與早期通報、儲槽檢修作業中如表面除鏽清潔與非破壞檢查等高風險工項的輔助應用，以及在事故發生或災害狀態下，支援搜救行動與滅火行動的緊急應變情境。透過這些應用面向的鋪陳，得以具體說明機器人如何在不同作業狀態與風險層級下，成為補足人力監督不足、降低人員暴露風險，並提升石化工廠整體安全管理韌性的關鍵工具。

2.1.1 多層次巡檢應用

在常規性巡檢路線的情境中，機器人可依據工廠既有的巡檢制度、設備重要性分級與風險基準，建立固定且高頻率的巡檢軌跡。這類巡檢路線通常涵蓋關鍵泵浦、壓縮機、反應器、熱交換器、主要管廊與閥件密集區，目的在於持續確認設備外觀、運轉聲響、表面溫度與周邊環境是否出現偏離常態的徵象。相較於人員巡檢可能因班次、天候或工作負荷而產生頻率不一致的問題，機器人能在完全一致的時間點、相同的觀測角度與高度下執行巡檢，使長期累積的

影像、溫度與氣體數據具有高度可比性。這種一致性，對於早期異常趨勢的辨識具有關鍵意義，能讓原本難以察覺的微小變化，在數據層面被放大與顯性化。

當工廠進入大修或歲修期間，巡檢路線的需求會出現顯著變化。此時，設備狀態不再是穩定運轉，而是處於拆解、隔離、清洗與重組的動態過程，作業介面複雜度大幅提高，人員進出頻繁，臨時性風險顯著增加。在此情境下，機器人所承擔的暫時性巡檢任務，重點不在設備運轉狀態，而在於施工環境的安全監控與作業界面變化的即時掌握。透過快速重新規劃巡檢路線，機器人可針對施工熱區、臨時搭建的鷹架、拆卸後裸露的管口或法蘭區域進行高頻巡查，協助管理單位即時掌握現場是否出現未妥善封堵、物料遺留、異常氣體累積或作業隔離失效等狀況。這類巡檢在實務上往往是人力最吃緊、也最容易被簡化執行的階段，而機器人的介入，正好補足了此一高風險、低穩定性的管理缺口。

夜間大範圍巡檢則是另一個高度適合由機器人承擔的場景。夜間本身即伴隨能見度下降、人員精神疲勞與人力配置縮減等因素，使巡檢品質相對不易維持。然而，許多製程異常與洩漏事件，反而容易在夜間因溫差、操作負荷變化或設備老化而發生。機器人搭載可見光與熱影像系統後，能在低光源甚至無照明的環境中，持續執行長距離巡檢任務，並即時將影像回傳中控室。這種夜間巡檢不僅提升了覆蓋範圍，也在心理層面降低了人員因夜間進入偏遠或高風險區域所承受的壓力，使夜間安全管理從「被動值守」轉為「主動監控」。

在廠區周界巡檢方面，機器人所扮演的角色，已超越傳統巡檢而延伸至製程安全與廠區保全的交集地帶。石化工廠的周界往往同時承擔防止未授權進入、監測外部環境影響與早期偵測外力干擾的功能。機器人依照周界路線進行巡邏時，可結合影像辨識與熱成像技術，辨識異常入侵、人員逗留、車輛靠近或不尋常熱源，並將相關資訊即時通報。更重要的是，周界巡檢所取得的資料，也可作為事故後鑑識與事件回溯的重要依據，使周界管理不再僅止於「有無巡過」，而是轉化為可稽核、可分析的安全證據鏈。

當廠區內進行工程施作時，巡檢的重點會再度轉向人員行為、作業界面與許可條件是否持續被遵循。工程施作往往涉及多承包商同時進場、動線交錯與臨時設備架設，使得現場風險具有高度動態性。機器人可依工程範圍即時調整

巡檢路線，針對施工區域反覆巡視，協助監控是否有未經授權人員進入、個人防護具穿戴不符、動線阻塞或作業範圍擴張未經核准等情形。這類巡檢並非取代現場監工，而是提供一個持續存在、不中斷的監督視角，使管理者能在有限人力下，仍維持對施工安全的高度掌握。

至於高風險區域的巡檢，則可視為機器人應用中最具代表性的價值展現。無論是依法規定義的危險性工作場所、具備進出限制的局限空間，或是長時間操作毒性化學物質的製程區域，這些場所的共同特徵在於「風險後果高」與「人員不宜長時間停留」。機器人透過預先建構的路線與進出邏輯，可在不增加人員暴露的前提下，執行高頻率巡檢任務，並即時回傳氣體濃度、環境影像與設備狀態。這不僅降低了人員進出次數，也使管理單位能以更客觀的數據，判斷是否需要人員介入處置，讓「人進場」成為經過風險評估後的決策結果，而非例行性的被動行為。

2.1.2 動火許可作業之現場監控

動火作業始終被列為風險等級最高、管制要求最嚴格的關鍵作業之一。其風險來源不僅在於火焰、火花或高溫本身，更在於動火作業往往發生於設備維修、管線拆卸或臨時施工等非穩定製程狀態下，此時現場隔離條件、殘留物狀態與周邊作業界面皆具有高度不確定性。即使在制度上已建立完整的動火許可流程，包含作業前檢點、氣體濃度確認、隔離與監視人員配置，實務上仍常因作業時間拉長、環境條件變化或人員注意力下降，使得原本在許可核發當下成立的安全假設，隨時間推移而逐漸失效，成為事故發生的潛在觸發點。

傳統動火作業的安全監控，主要仰賴監火人員在現場持續觀察火源、周邊環境與作業行為，並即時回報異常。然而，這樣的管理模式在高溫、噪音、煙霧與長時間值守的條件下，極易受到人因因素影響。監火人員可能因視線受限、環境干擾或疲勞而忽略細微變化，例如可燃氣體濃度的緩慢上升、鄰近區域臨時性作業的靠近，或防火隔離措施的移動與鬆動。此外，在大型廠區或多點同時動火的情況下，安全管理人員難以即時掌握各作業點的即時狀態，使動火許可可在執行層面逐漸轉化為形式化文件，而非持續有效的風險控制工具。

在此背景下，機器人介入動火許可監控的核心價值，在於提供一種不中斷、可客觀紀錄且不受環境壓力影響的現場監督機制。透過機器車或機器狗搭載影像、熱成像與氣體感測模組，動火作業區可被納入持續性的監控範圍，使作業期間的風險狀態不再僅依賴單一監火人員的即時判斷，而是由機器人持續蒐集客觀數據並回傳至中控或安全管理平臺。這種監控方式，讓動火許可從一次性的核發行為，轉化為作業期間持續被驗證的動態條件。

在實務應用上，機器人可於動火作業開始前，依許可範圍與作業位置進駐指定區域，建立固定或巡迴式的監控路線。於作業進行中，機器人可持續確認火源位置是否超出核准範圍、周邊是否出現未預期的可燃物、隔離帆布或防火毯是否因作業移動而失去原有防護效果。透過熱影像，亦可即時掌握作業區周邊結構或設備表面溫度變化，避免熱傳導造成的隱蔽性著火風險。相較於人眼難以察覺的溫升趨勢，這類數據可被即時量化並設定警示門檻，作為是否中止作業或加強防護的客觀依據。

此外，機器人結合氣體偵測系統後，能在動火期間持續監測可燃氣體或氧氣濃度的微幅變化，彌補傳統「作業前檢測一次、作業中不連續監測」的制度缺口。當濃度變化接近警戒值時，系統可即時發出警示，通知現場人員或中控室採取行動，避免在尚未達到爆炸下限前，風險已逐步累積而未被察覺。這種即時回饋機制，對於長時間動火或跨班次作業尤其關鍵，能有效降低因環境條件改變而導致的動火事故風險。

在多承攬商同時進場或工程密集期間，機器人亦可協助安全管理人員確認動火作業是否確實依許可條件執行。透過影像辨識技術，機器人可協助辨識是否有未經核准的人員進入動火區域、是否存在交叉作業未妥善隔離的情形，或動火作業是否延伸至原許可範圍之外。這類資訊若僅仰賴人工回報，往往存在時間落差或主觀判斷差異，而機器人所提供的影像紀錄，則可作為事後稽核與制度改善的重要依據。

更進一步地，當動火作業與數位化作業許可系統整合後，機器人所蒐集的監控資料，得以直接回饋至許可管理流程之中。透過這樣的整合，動火許可不再只是紙本或系統中的核准紀錄，而是一個在作業期間持續被現場資訊驗證的

安全機制。若監控結果顯示作業條件偏離原先設定的安全前提，系統即可要求重新評估或暫停作業，讓「許可」真正成為一項具備動態風險控管能力的管理工具。

2.1.3 揮發性有機物監控

揮發性有機物（Volatile Organic Compounds, VOC）的洩漏向來被視為最難以掌握、卻又最具事故潛勢的風險來源之一。相較於火焰、煙霧或明顯的設備異常，VOC 洩漏往往在初期階段缺乏可被人眼或感官即時察覺的徵象，尤其在露天或通風條件良好的環境中，更容易被環境稀釋而延後被發現。然而，這類洩漏一旦累積至可燃或毒性濃度，極可能在短時間內引發火災、爆炸或人員中毒事故，使原本看似輕微的洩漏事件，迅速演變為高後果事故。因此，VOC 的早期偵測與即時通報，被普遍認為是石化工廠中「事故防止前線」最關鍵、同時也是最具挑戰性的安全管理工作之一。

傳統 VOC 管理多仰賴定期人工巡檢、手持式氣體偵測儀量測，或在特定設備點位設置固定式感測器。然而，這些方式在實務上皆存在結構性限制。人工巡檢受限於頻率與路線安排，難以捕捉間歇性或突發性的洩漏事件；固定式感測器雖可提供連續監測，但其覆蓋範圍侷限於安裝位置，對於管線密集、設備分散或臨時作業頻繁的場域，往往存在感測死角。當洩漏發生於非預期位置時，往往只能在事故後透過痕跡或數據回溯加以確認，錯失最關鍵的早期處置時機。

在此背景下，機器人作為「可移動式 VOC 感測平臺」的角色逐漸受到重視。透過機器車或機器狗搭載多型態氣體感測模組，VOC 偵測得以從固定點位的靜態監控，轉變為涵蓋整個廠區的動態掃描。機器人可依巡檢路線或任務需求，主動進入管廊、設備間隙、閥件集中區與過往較少被人工長時間停留的區域，持續蒐集空氣中 VOC 濃度變化，並將數據即時回傳至中控系統。這種移動式偵測模式，使原本難以全面覆蓋的場域，首次具備系統性、可重複的監測能力。

在實務應用上，機器人於 VOC 早期偵測中的關鍵價值，在於其能捕捉「趨

勢性異常」，而非僅回應超標警報。透過在相同路線、相同高度與相近時間條件下反覆量測，系統得以建立各區域的背景濃度基線，並辨識出微幅卻持續存在的濃度偏移。這類偏移在短時間內可能尚未觸及法規或警報門檻，卻往往反映出密封劣化、法蘭鬆動或閥件滲漏等早期失效徵象。相較於傳統以「是否超標」為核心的管理邏輯，這種以趨勢辨識為導向的偵測方式，更貼近製程安全「預防勝於事後補救」的核心精神。

當機器人偵測到 VOC 濃度異常時，即時通報機制便成為風險控制的關鍵環節。透過與中控室或行動裝置的即時連線，異常訊息可在第一時間被安全人員接收，使處置行動得以迅速啟動，而非等待定期巡檢或事後回報。在部分應用情境中，系統亦可結合影像資訊同步回傳，使管理者在遠端即可初步判斷洩漏可能位置與周邊作業狀況，進而決定是否需要人員進場確認、啟動區域隔離或調整製程操作條件。這種「先確認、再介入」的流程，有助於避免人員在資訊不足的情況下貿然進入潛在高危環境。

進一步而言，機器人所蒐集的 VOC 偵測資料，亦可作為設備完整性與維護決策的重要輸入。透過將異常濃度位置與設備編號、維修紀錄或歷史洩漏事件進行比對，企業得以更精準地鎖定高風險設備，作為後續檢修、汰換或加強監控的優先對象。這使 VOC 偵測不再僅是環保或安全合規的被動工具，而是逐步轉化為支援風險基礎維護（Risk-Based Maintenance）與設備完整性的重要資訊來源。

2.1.4 儲槽檢修

儲槽檢修作業始終屬於高風險、低容錯且高度仰賴經驗判斷的關鍵工項之一。無論是原料槽、中間槽或成品槽，其內部空間往往同時具備局限空間特性、可燃或有毒殘留物風險，以及結構老化與腐蝕不易即時察覺等問題，使得檢修作業本身即成為潛在事故來源。特別是在表面除鏽清潔與非破壞檢查等工項中，作業人員必須長時間進入儲槽內部或高處外壁，在視線受限、通風不良與作業姿勢受限的條件下執行任務，對職業安全與人員健康形成顯著壓力，也對作業品質的穩定性構成挑戰。

傳統儲槽檢修作業多以人工作業為主，搭配簡易機具或臨時性輔助設備完成除鏽、清洗與檢測。然而，這樣的作業模式在實務上存在多重限制。首先，作業人員進入槽內前需進行複雜的隔離、清槽與氣體檢測程序，增加前置作業時間；其次，即使確認進入條件合格，作業過程中仍可能因殘留物揮發、粉塵懸浮或氧氣濃度變化而快速惡化作業環境，使人員暴露於潛在危害之中。此外，人工作業的效率與品質高度依賴個體經驗與體力狀態，對於大面積儲槽或長時間作業而言，容易出現除鏽不均、檢查盲區或紀錄不完整等問題，進而影響後續完整性評估的可靠度。

在此背景下，機器人於儲槽檢修作業中的應用，逐漸被視為降低人員暴露風險並提升作業品質的重要工具。透過專為儲槽環境設計的機器人平臺，部分高風險或重複性工項得以由機器先行執行，使人員從長時間、高負荷的作業條件中解放出來，轉而專注於監督、判讀與決策等高價值工作。這樣的轉變，並非完全取代人力，而是重新分配人機角色，以符合製程安全與設備完整性管理的實務需求。

在表面除鏽與清潔作業方面，機器人可搭載高壓水刀、噴砂或旋轉刷具等模組，於儲槽內部或外壁依預先設定路徑執行均勻且可重複的作業。相較於人工作業容易受疲勞與姿勢限制影響，機器人能在固定速度與壓力條件下，確保整體表面處理品質的一致性。對於大型或高聳儲槽外壁，機器人亦可透過磁吸進行垂直或斜面移動，避免人員長時間高空作業所帶來的墜落風險。更重要的是，這類作業過程可同步進行影像與作業參數紀錄，使後續檢修成果具備可追溯性，降低品質爭議與重工風險。

在非破壞檢查（Non-Destructive Testing, NDT）方面，機器人的應用進一步擴展了檢測的可行範圍與資料品質。透過搭載超音波測厚，機器人可在儲槽內外壁沿固定路徑進行高密度量測，降低因人工作業路徑不一致而產生的資料偏差。這些資料若能與歷史檢測結果整合，將有助於建立更具可信度的劣化趨勢分析，支援後續的剩餘壽命評估與檢修策略制定。

從管理層面來看，機器人所蒐集的檢修與檢測資料，也為儲槽完整性管理帶來新的可能性。透過將影像、測厚與作業紀錄數位化並系統化管理，企業得

以建立更完整的設備健康檔案，使儲槽檢修不再僅是定期例行工作，而是成為風險導向決策的一部分。當檢修資料具備一致性與可追溯性時，後續的修復優先順序、資源配置與停機規劃，也能建立在更具客觀基礎的判斷之上。

2.1.5 緊急應變

緊急應變被視為後果控制最為關鍵的防線。一旦事故進入緊急狀態，無論是火災、爆炸、毒性氣體外洩，或是人員受困、失聯，其處置成效往往取決於事故初期對現場狀況的掌握速度，以及是否能在不進一步擴大人員暴露風險的前提下，迅速採取正確行動。然而，石化工廠事故現場本身即具備高溫、高毒、高能量與結構不穩定等特性，使得第一時間派遣人員進入現場進行確認與搜救，往往同時伴隨極高的人身風險，也容易因資訊不足而延誤或誤判處置方向，這正是緊急應變長期面臨的結構性困境。

傳統緊急應變作業中，事故初期對現場狀況的理解，多半來自固定式感測器、監視器畫面或現場人員的回報。然而，事故往往會造成電力中斷、通訊受阻或視線受限，使得原本仰賴的資訊來源瞬間失效。加上事故現場可能伴隨持續變化的危害條件，例如火勢蔓延、氣體濃度擴散或結構持續劣化，使得即便已取得初步資訊，也難以確保其在後續行動中的有效性。在此情境下，如何在事故發生後的黃金時間內，快速重建現場可視性，成為緊急應變成敗的關鍵。

機器人於緊急應變中的角色，正是扮演事故現場的「先遣感知單元」。透過機器車或機器狗搭載耐高溫、防爆、氣體偵測與影像系統，機器人可在事故發生後第一時間進入人員尚不宜進入的危險區域，進行環境探測與狀況回傳。相較於人員必須在高度不確定的條件下冒險進場，機器人能以遠端操作或半自主方式執行任務，使應變決策能建立在即時且相對完整的現場資訊之上，而非依賴推測或間接判斷。這樣的資訊優勢，不僅有助於降低誤判風險，也能為後續搜救與滅火行動爭取寶貴時間。

在搜救行動方面，機器人的應用尤其展現其不可替代的價值。事故發生後，現場往往存在倒塌構件、濃煙、毒氣或能見度極低的情況，使得傳統人力搜救困難重重。機器人可透過熱影像、聲學感測或影像辨識技術，協助搜尋受困或

失聯人員的位置，即便在視線受阻的條件下，仍可透過體溫差異或聲音回傳提供線索。對於局部空間狹小、結構不穩定或存在二次災害風險的區域，機器人能先行進入進行探查，確認是否適合人員進場，避免搜救人員因資訊不足而暴露於更高風險之中。

此外，機器人於搜救過程中所扮演的角色，並不僅止於定位受困人員。透過即時影像回傳，指揮中心可同步掌握現場通道是否暢通、結構是否持續變形，進而規劃最安全的救援路徑。部分應用情境中，機器人亦可攜帶通訊裝置或簡易補給物資，先行與受困人員建立聯繫，穩定其心理狀態並提供基本支援，為後續人員救援爭取時間。這種「以機器先行、以人員接續」的應變模式，實質降低了搜救作業中最具不確定性的初期風險。

在滅火行動方面，機器人同樣能成為人員的重要支援。石化工廠火災往往伴隨高溫輻射、爆炸風險與有毒煙霧，使得人員難以長時間接近火源核心。搭載耐熱材料與滅火模組的機器人，可在火勢初期或特定條件下，進入高危區域進行局部滅火、冷卻或隔離作業，降低火勢擴散速度。即便機器人本身不直接承擔主要滅火任務，其回傳的熱影像與環境數據，也能協助指揮中心判斷火勢強度、燃燒範圍與可能的延燒路徑，使消防資源的配置更具精準性。

特別是在大型儲槽區或管線密集區的事故情境中，火勢與熱輻射分布往往複雜且快速變化，單靠固定式感測器難以即時反映全貌。機器人透過移動式量測，可動態描繪高溫區域與危害邊界，協助判斷是否需要啟動緊急洩壓、緊急切斷或大範圍疏散措施。這類資訊若能即時取得，將有助於避免因反應過慢或決策過度保守，而導致事故後果進一步擴大。

三、機器人應用之限制

在肯定機器人於石化工廠職業安全與製程安全管理中所帶來的監督強化與風險降低效益之餘，仍必須正視其在實務導入與長期運作上所伴隨的結構性限制，否則過度樂觀的技術期待，反而可能成為新的風險來源。石化場域本身具備易燃、易爆、高腐蝕與高電磁干擾等特性，使得任何進入現場的電氣或機電設備，皆必須面對防爆設計是否足以因應實際危害環境的考驗；一旦防護等

級與現場條件不匹配，機器人本身即可能由風險控制工具轉化為潛在引火源。同時，機器人系統高度仰賴感測器、控制演算法與自主或半自主決策邏輯，其運作穩定性直接關係到是否可能發生誤動作、路徑偏移或任務失控等情況，特別是在施工期間或事故狀態下，這類失控行為不僅會影響應用效益，更可能干擾現場人員的應變判斷。

除此之外，隨著機器人逐步納入工廠資訊系統與遠端監控架構，其所面臨的風險已不再侷限於物理層面，資通訊攻擊、未授權存取或資料竄改等網路安全議題，亦可能透過機器人這一新型節點滲入製程安全與營運管理體系，對工廠造成隱性且難以即時察覺的衝擊。而即便在未遭受惡意攻擊的情況下，機器人應用本身仍高度依賴穩定且即時的通訊環境，一旦廠區網路通暢度不足、訊號遮蔽或在事故狀態下通訊中斷，機器人即可能喪失即時回傳與受控能力，使原本預期作為安全輔助的工具，轉而成為資訊斷裂的盲點。

因此，在探討機器人於石化工廠安全管理中的應用價值時，防爆設計、運作失控風險、資通訊安全與網路通暢度等限制條件，皆必須被納入同等重要的評估視角，作為後續技術選型、制度設計與管理策略建構的現實前提。

首先，防爆問題是機器人能否進入石化工廠核心製程區域的根本門檻。石化場域普遍存在可燃性氣體、蒸氣或粉塵，其危害分區往往依據法規被明確界定，任何電氣或機電設備若未符合相對應的防爆等級，即不應進入該區域運作。對機器人而言，其結構中同時包含電池模組、驅動馬達、電力轉換元件與高密度電子電路，這些皆可能成為點火源。一旦防爆設計僅停留在外殼密封或單一零組件認證，而未能從整體系統層級考量熱累積、火花產生與異常工況下的能量釋放行為，實務上仍可能在長時間運作或故障狀態下產生超出預期的風險。此外，許多現行機器人產品係為一般工業或戶外環境設計，其防爆能力並非設計初衷，即便經過改裝或加裝防護，也未必能完全符合石化工廠對本質安全或隔爆結構的要求，這使得機器人在應用場域上往往受限，只能部署於特定低風險區域，影響其原本預期的安全效益。

其次，機器人運作失控的風險，屬於人機協作架構下必須嚴肅面對的議題。機器人在石化工廠中多採取自主或半自主運作模式，仰賴感測器資料、定位系

統與控制演算法進行路徑規劃與任務執行。然而，石化場域的環境條件本身就高度複雜，包含金屬結構密集、電磁干擾、蒸氣遮蔽、地面狀態不穩定與臨時施工變動等因素，皆可能影響感測與定位準確性。一旦感測器誤判或演算法未能正確因應突發狀況，機器人可能出現偏離既定路線、誤入不該進入的區域，甚至干擾正在進行中的作業。更嚴重的是，在緊急應變或施工高峰期間，若機器人失控而無法即時停機或接管，反而可能成為現場人員的障礙物或風險源。這使得機器人應用必須搭配清楚的失效模式分析、緊急停機機制與人員接管流程，否則其安全輔助角色將在關鍵時刻轉化為新的不確定因素。

再者，隨著機器人逐步與工廠資訊系統、雲端平臺與遠端監控架構整合，資通訊攻擊的風險亦成為不可忽視的限制條件。機器人本質上是一個同時具備感測、運算與通訊能力的行動節點，一旦其通訊介面、控制權限或資料傳輸未妥善保護，便可能成為外部攻擊進入工廠內部網路的跳板。資通訊攻擊的影響不僅限於機器人本身遭操控或癱瘓，更可能透過橫向移動影響其他製程控制或安全監控系統，對製程安全造成間接卻深遠的衝擊。特別是在機器人被賦予巡檢、動火監控或緊急應變等安全關鍵任務時，若其回傳資料遭竄改、延遲或阻斷，管理人員可能在不自知的情況下，基於錯誤資訊做出決策，這類風險往往比設備單點故障更難即時察覺。

最後但也同樣重要的是，網路通暢度對機器人應用的影響。該項是經常被低估、卻在實務上高度關鍵的限制因素。多數機器人應用仰賴即時影像回傳、遠端監控與雲端分析，其效益建立在穩定、低延遲的通訊環境之上。然而，石化工廠因結構複雜、金屬遮蔽嚴重，加上部分高風險區域不適合佈建高功率無線設備，實際上往往存在訊號死角或頻寬不足的問題。在正常運轉狀態下，這類問題或許尚能透過緩衝或非即時應用加以容忍，但在事故或緊急狀態下，通訊品質往往進一步惡化，使機器人無法即時回傳關鍵資訊，甚至完全喪失受控能力。此時，機器人原本預期作為安全輔助的角色，可能因資訊中斷而無法發揮作用，甚至需要額外人力介入處理其本身的狀態，增加現場負擔。

四、結論

本研究以石化工廠之職業安全與製程安全為核心，系統性探討機器人技術

在高風險製程場域中的實務應用潛力與治理意涵。透過分析巡檢路線制定、動火許可監控、揮發性有機物即時偵測、儲槽檢修以及緊急應變等關鍵作業情境，本文指出機器人結合人工智慧感測與影像辨識技術，確實能在不額外增加人力負擔的前提下，提升現場監督密度、縮短異常辨識時間，並有效降低人員暴露於高危害環境的頻率。相較於傳統高度仰賴人員經驗與即時判斷的安全管理模式，機器人所提供的持續性、客觀性與可追溯性資訊，有助於將安全管理由事後回應，推進至更具前瞻性的風險預防架構。

然而，研究亦清楚顯示，機器人於石化工廠的應用並非單純的技術導入問題，而是一項涉及設備設計、防爆適用性、控制穩定性、資通訊安全與通訊基礎建設等多層次議題的系統工程。若未能妥善處理防爆等級不足、運作失控風險、資通訊攻擊或網路通暢度不足等限制條件，機器人反而可能成為新的風險來源，削弱原本預期的安全效益。因此，機器人應被定位為安全治理體系中的輔助性工具，其導入必須同步搭配制度設計、風險評估與人機協作流程，方能高風險製程環境中發揮實質價值。

參考文獻

- Crawl, D. A. and J. F. Louvar (1990). Chemical Process Safety: Fundamentals with Application. *New Jersey: Prentice* 5.20: 1.
- International Organization for Standardization, ISO. (2021). White Paper on Smart Manufacturing.
- Palazzi, E., F. Currò, & B. Fabiano (2015). A critical approach to safety equipment and emergency time evaluation based on actual information from the Bhopal gas tragedy. *Process safety and environmental protection*, 97, 37-48.
- Saleh, J. H., R. A. Haga, F. M. Favarò & E. Bakolas (2014). Texas City refinery accident: Case study in breakdown of defense-in-depth and violation of the safety–diagnosability principle in design. *Engineering Failure Analysis*, 36, 121-133.
- Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(5), 494-506.

陸彥儒、王振華（2024）。談 ISO 42001 於石化工業製程設備安全之應用。
工業安全衛生，417 期，頁 43-56。

其他參考資料

ASME B30.32 (2021). Unmanned Aircraft Systems (UAS) Used in Inspection, Testing, Maintenance, and Load Handling Operations

DJI Media Center (2020). Shell and DJI Partner To Innovate Drone Technology For The Energy Industry. [Online]. Available:

<https://www.dji.com/newsroom/news/shell-and-dji-partner-to-innovate-drone-technology-for-the-energy-industry> [Accessed: Dec. 17, 2024]

Flyability. (n.d.). *Tank ultrasonic thickness measurement with Elios 3*. [Online].

Available: <https://www.flyability.com/casestudies/tank-ultrasonic-thickness-measurement> [Accessed: Dec. 26, 2024]

Jrfreeland, “FIRES-COUT-VUAS,” Naval Air Station Patuxent River, Wikimedia Commons. [Online]. Available:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FIRES-COUT-VUAS.jpg>
[Accessed: Dec. 17, 2024]

National Research Institute of Fire and Disaster (2019). [Online]. Available:

https://nrifd.fdma.go.jp/public_info/library/kenkyu_kaihatsu/files/robot_1_keika.pdf [Accessed: Dec. 17, 2024]

Process Safety Progress (2020). Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely, Volume 39, Issue 1.

UAV Factory Ltd Europe, “Penguin B UAV,” AeroExpo. [Online]. Available:

<https://www.aeroexpo.online/prod/uav-factory-ltd-europe/product-174156-794.html> [Accessed: Dec. 17, 2024]

良棋科技（2026）。取自 <https://zanrobot.com/shop/zr5547/>

經濟部產業發展署（2025）。石化／化學新設工廠智慧安全設置技術指引（2025 版）。

鍾釗榛（2025）。超狂「AI 機器狗」會跑、會聽話、還能跳舞。三立新聞網

2025 年 7 月 3 日。取自

<https://tw.news.yahoo.com/%E8%B6%85%E7%8B%82-ai%E6%A9%9F%E5%99%A8%E7%8B%97-%E6%9C%83%E8%B7%91-%E6%9C%83%E8%81%BD%E8%A9%B1-%E9%82%84%E8%83%BD%E8%B7%B3%E8%88%9E-070500365.html>

淨零轉型下 CCUS 的重大事故危害與設備完整性

Major Accident Hazard and Mechanical Integrity in CCUS Processes

陸彥儒，國立高雄科技大學/設備可靠度與系統安全技術研發中心 博士

王振華，國立高雄科技大學/環境與安全衛生工程系 教授

聯絡作者: 0515912@nkust.edu.tw

摘要

在全球淨零排放政策推動下，碳捕集、利用與封存（CCUS）已逐漸成為高排放產業的重要減碳手段。然而，CCUS 系統涉及高壓、低溫與長距離輸送等操作特性，其安全風險不僅不同於傳統化工製程，亦容易在制度設計上被低估。本文從製程安全的觀點出發，系統性說明 CCUS 的製程特性、主要危害類型與事故後果，指出其本質上已具備重大危害事故之潛勢。進一步聚焦於設備完整性管理（Mechanical Integrity, MI），說明 MI 在 CCUS 全生命週期中，如何透過制度化的設計假設、材料相容性管理、操作窗口控管與劣化監測，作為預防重大事故的核心治理工具。研究結果顯示，唯有將 CCUS 納入製程安全與設備完整性整合架構中，方能在推動減碳目標的同時，確保其長期安全與風險可控性。

【關鍵字】 碳封存、淨零碳排、製程安全管理、重大事故危害、設備完整性

一、前言

在全球氣候變遷衝擊日益顯著、各國相繼提出淨零排放承諾的背景下，二氧化碳排放已不再僅是環境議題，而是直接牽動能源政策、產業競爭力與供應鏈存續的結構性風險。對高度依賴化石燃料與高溫製程的產業而言，單純仰賴能源轉型或製程替代，往往面臨技術成熟度不足、投資成本過高或產能無法即時銜接的現實限制。在此脈絡下，隨著全球對氣候變遷的關注日益加深，碳捕獲、利用與封存（Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS）逐漸被視為一項具有「過渡性關鍵角色」的工程技術，使既有高排放產業得以在不中斷核心生產活動的前提下，實質降低溫室氣體排放量，並回應法規、市場與社會對減碳的迫切要求。

從產業實務角度來看，CCUS 的導入並非源自單一技術突破，而是多重外部壓力交織下的結果。一方面，國際氣候治理架構與碳定價制度逐步成形，排放成本不再是抽象的環境代價，而是可以直接反映在財務報表上的營運風險；另一方面，跨國供應鏈與品牌端對碳足跡的要求日益嚴格，使得高排放製程若缺乏有效減碳手段，將可能被排除於市場之外。在此情境下，CCUS 被定位為一種能夠「即刻介入既有製程」的工程解方，其核心價值並不在於顛覆產業結構，而在於延續產業運作的同時，為減碳目標提供可量化、可驗證的技術路徑。

然而，正因 CCUS 是在既有重工業與高風險製程基礎上加裝或延伸而成，其工程本質便注定無法被視為單純的環保附屬設施。實際上，CCUS 系統往往涵蓋捕集、壓縮、乾燥、冷卻、輸送、利用與封存等多個單元操作，這些操作本身即高度依賴高壓、低溫或超臨界條件運作，並牽涉大量旋轉設備、壓力容器、管線系統與控制回路。換言之，CCUS 並非只是「多加一套設備」，而是將一條新的高能量製程鏈，直接嵌入原本已相當複雜的化工或石化系統之中。

在此背景下，若僅以「減碳成效」或「碳捕集效率」作為 CCUS 專案的主要評估指標，將可能忽略其所引入的製程安全風險。相較於傳統燃料或反應性化學品，二氧化碳本身不具可燃性，這種特性往往使人產生錯誤的安全直覺，認為其危害程度相對有限。然而，從製程安全的觀點來看，二氧化碳在高壓或低溫條件下，卻展現出截然不同的風險樣貌。一旦發生洩漏或失效事件，大量

二氧化碳可能迅速在地面或低窪空間聚集，造成局部缺氧，進而導致人員在短時間內失去行動能力甚至致命後果。此類事故往往缺乏火焰、爆音或刺激性氣味作為即時警示，使其成為一種「低可見度、高致命性」的危害型態（NETL, 2017）。

此外，CCUS 系統的導入，亦意味著產業必須長期操作於材料耐受性邊界附近。高壓二氧化碳與微量水分共存時，可能形成碳酸環境，加速局部腐蝕；在快速卸壓或異常操作情境下，二氧化碳滲入彈性體與密封材料內部，可能引發快速氣體減壓破壞（rapid gas decompression），導致密封失效甚至連鎖洩漏（IEA, 2022）。這些劣化機制往往不會在短期內立即顯現，而是隨著操作時間累積，逐步侵蝕設備完整性，使得事故更具隱蔽性與突發性。

從更宏觀的角度來看，CCUS 的風險邊界亦不再侷限於單一廠區之內。二氧化碳輸送管線可能跨越工業區、交通設施甚至人口聚集區；封存作業則延伸至地下地層，其安全性涉及井筒完整性、地層穩定性與長期監測能力。一旦任一環節發生失效，事故後果不僅影響廠內人員，更可能對周邊社區與環境造成跨場域衝擊。此種事故特性，使 CCUS 在本質上已具備重大危害事故（Major Accident Hazard, MAH）（EI, 2010; Rusin and Stolecka, 2014）。

因此，隨著 CCUS 在產業中的角色日益重要，如何在推動減碳目標的同時，確保其不成為新的高風險來源，已成為無法迴避的核心課題。若缺乏系統性的製程安全思維，僅以工程可行性或政策誘因為導向進行導入，將可能在降低碳排放的同時，累積新的結構性安全風險。基於此，本章旨在說明 CCUS 之所以需要被納入製程安全與重大危害管理體系的根本原因，並為後續對其製程危害、事故後果與管理策略的深入探討，奠定必要的背景與問題意識。

二、CCUS 製程特性與風險本質

相較於傳統化工或石化製程，CCUS 在製程安全上的核心挑戰，並非來自單一高危險反應或明確的燃爆物質，而是源於其整體製程特性本身即高度偏離一般工業操作的安全直覺。在多數產業經驗中，風險辨識往往依賴「是否可燃、是否具毒性、是否會爆炸」等既有分類框架；然而，CCUS 所處理的二氧化碳，

正好落在這些傳統分類的灰色地帶。這種「看似安全、實則高風險」的特性，使 CCUS 成為一種在制度與工程設計上特別容易被低估的製程系統。

從製程結構來看，CCUS 並非單一單元操作，而是一條由多個高能量操作所串聯而成的製程鏈。捕集階段引入大量化學溶劑或高溫分離操作；後續的壓縮、乾燥與冷卻，則使二氧化碳逐步進入高壓、低溫或超臨界狀態；輸送階段再將這種特殊狀態的流體，長距離移動至廠外或跨場域設施；最終於利用或封存階段，將其暫存於大型壓力容器、注入井或地層之中。任何一個環節的異常，皆可能透過壓力、溫度或相態變化，迅速放大為系統性失效。

在此過程中，二氧化碳的物性行為扮演了關鍵角色。與一般氣體不同，二氧化碳在常見工業操作條件下，極易進入液態或超臨界狀態，其密度、黏度與膨脹行為，均與操作人員日常熟悉的空氣、氮氣或天然氣存在顯著差異。這種物性差異意味著，一旦發生洩漏或快速減壓，二氧化碳可能以高速噴射、劇烈冷卻或伴隨相變的形式釋放，對設備與周遭環境造成非直觀的衝擊。特別是在低溫條件下，噴射所造成的瞬間降溫，可能使鄰近設備或結構材料超出其耐受範圍，進而引發二次破壞（Connolly and Cusco, 2007）。

此外，CCUS 系統普遍需要長期操作於材料性能邊界附近，這使得設備完整性風險成為其製程安全的核心議題之一。高壓二氧化碳具有極強的滲透能力，能夠進入彈性體、密封材料與部分塗層內部，當操作條件發生變化，特別是快速卸壓時，這些被困於材料內部的氣體可能急遽膨脹，造成材料內部起泡、龜裂甚至瞬間失效。此類劣化機制往往不會在設備初期運轉時立即顯現，而是在長期循環操作後累積，增加事故發生的不確定性。

從系統運作的角度來看，CCUS 亦具有高度動態性的風險特徵。捕集負載、壓縮負荷、輸送流量與封存注入速率，往往隨著上游製程操作條件、能源調度或外部需求而變動。這些變動會直接反映在系統壓力與溫度的波動上，使設備長期承受熱循環與壓力循環的交互作用。若缺乏適當的操作窗口管理與完整性監控，疲勞破壞、密封劣化或局部腐蝕等問題，將可能在未被即時察覺的情況下逐步惡化。

值得注意的是，CCUS 的風險本質並不僅限於設備或製程本身，而是天然具有跨場域延伸的特性。二氧化碳輸送管線可能穿越不同土地使用區域，其安全性不僅是工程問題，也涉及空間規劃與社會風險承受度；封存與注入作業則將風險延伸至地下環境，其完整性仰賴長期監測與制度性管理，而非單次設計驗證即可確保。這種跨時間、跨空間的風險特性，使 CCUS 與一般廠內製程相比，更接近一種「基礎設施型風險系統」。

CCUS 的製程風險並非源於單一高危害物質或劇烈反應，而是來自多重因素的疊加效應，包括特殊物性、高能量操作、材料相容性挑戰、動態操作條件，以及跨場域的影響範圍。這種風險樣態若以傳統「是否可燃」或「是否有毒」的單一判斷邏輯加以評估，極可能導致低估。正因如此，CCUS 在本質上必須被視為一種高風險製程系統，其安全管理邏輯應建立在製程安全與重大危害防制的架構之上，而非僅依附於環保或能源管理體系。此一認知，正是後續進行製程危害辨識、事故後果分析與管理策略設計的根本前提。

三、CCUS 主要製程危害類型之系統性說明

在理解 CCUS 的製程特性與風險本質之後，進一步釐清其具體危害類型，成為建立有效安全管理架構的關鍵步驟。與傳統化工製程不同，CCUS 的危害並不集中於單一設備或單一操作，而是分散於整條製程鏈中，並隨著操作條件、物性狀態與時間尺度而呈現不同樣貌。這種危害分布的特性，使得 CCUS 若僅以局部設備安全或單點防護思維進行管理，極易忽略潛藏於系統層級的失效路徑。

首先，最具代表性的危害類型為高壓與低溫條件所引發的物理性危害，此類危害幾乎貫穿 CCUS 的壓縮、液化、輸送與儲存等關鍵製程階段，且其風險本質並非來自化學反應失控，而是源於系統中所累積的大量壓力能與相態能量。在實務運轉中，二氧化碳常以高壓液態或超臨界狀態存在，這使得設備與管線在正常操作時即處於高度受能狀態，一旦因壓力容器破裂、管線全孔或部分孔徑破損、閥件卡滯失效，或受到外力撞擊與結構支撐失穩等因素導致瞬間失壓，系統內部所儲存的能量將在極短時間內釋放，形成高速且高動能的噴射流。此類噴射不僅具備顯著的機械衝擊力，其伴隨的急遽膨脹與焦耳-湯姆森

效應，亦會造成劇烈的局部降溫，使噴射路徑及其影響範圍內的設備、結構或支撐件瞬間暴露於遠低於設計假設的溫度環境，進而引發材料脆化、塗層剝離或既有微裂紋的快速擴展。在特定幾何條件與操作狀態下，若失壓事件發生於仍處於過熱液態的二氧化碳系統中，亦可能出現類似於 BLEVE 的物理性爆裂行為，其特徵並非燃燒或化學爆轟，而是由液態瞬間相變為氣態所導致的體積急遽膨脹，造成容器結構瞬間失穩並產生高能碎片飛散（Seo et al., 2015; Ke, 2009）。這類事故的破壞模式往往具有高度非對稱性，碎片可能沿結構弱點或噴射方向高速拋射，對鄰近設備、管線與人員構成直接威脅，同時也極易引發二次損壞與連鎖失效，例如相鄰壓力系統遭受衝擊後發生次級洩漏，或支撐結構受損導致整排設備傾倒。值得特別強調的是，由於此類物理性事故並不伴隨火焰、燃燒或爆音，其發生往往缺乏傳統工業事故中常見的感官警示，使作業人員與管理者在風險認知上產生延遲，進而增加暴露後果的嚴重性；因此，這類高壓低溫物理性危害不僅是 CCUS 製程中最具代表性的事故型態之一，同時也是最需要以設備完整性設計、失效情境推演與系統層級防護策略加以正面因應的核心風險來源。

其次，二氧化碳本身雖不具燃燒性或傳統意義上的急性毒性，卻構成一種在製程安全領域中極具致命性的窒息性危害，其危險性來自於對人體生理機制的直接干擾，而非化學反應或毒性劑量的累積。當大量二氧化碳自 CCUS 系統中因洩漏、破裂或異常卸壓而釋放時，會迅速取代周遭空氣中的氧氣濃度，使環境由可呼吸狀態在極短時間內轉變為缺氧環境；由於二氧化碳密度顯著高於空氣，其釋放後往往呈現貼地流動與堆積的行為特性，特別容易在地面低窪區、坑槽、管溝、地下空間、設備基座周邊或半密閉作業環境中形成高濃度雲團。此類雲團的危險性不僅在於其形成速度極快，更在於其存在期間往往缺乏明顯的感官警示，二氧化碳本身無色、無味、無刺激性，作業人員即使身處於危險濃度環境中，也難以透過嗅覺、視覺或聽覺即時察覺異常，往往是在出現頭暈、呼吸急促、判斷力下降甚至意識模糊時，才意識到環境已不適合人員停留。更嚴重的是，當環境中氧氣濃度迅速下降或二氧化碳濃度快速上升時，人體的生理反應具有明顯的非線性特徵，初期症狀可能極為輕微，但一旦超過臨界閾值，行動能力將在極短時間內喪失，使人員即便意識到危險，也可能已無法自行撤

離，進而造成群聚性傷亡事故。從製程安全的角度來看，此類事故後果並非單純由洩漏總量決定，而是高度依賴洩漏位置、釋放高度、周遭地形、通風條件以及人員當下的分布狀態與作業型態，這使得窒息性危害的實際風險具有高度情境依賴性與不確定性；例如，同樣規模的洩漏事件，發生於開放且通風良好的戶外空間時，可能僅造成短暫區域封鎖，而一旦發生於廠內設備密集區、半密閉空間或地下設施中，則可能在極短時間內演變為致命事故。正因如此，二氧化碳所造成的窒息性危害，在 CCUS 製程中不應被視為次要或附帶風險，而應被定位為一項具備重大事故潛勢的核心危害，其管理重點不僅在於降低洩漏發生的機率，更在於透過空間設計、偵測系統、通風配置與人員暴露管理，避免在事故發生時形成無預警且不可逆的人員傷亡後果。

進一步而言，材料相容性所引發的劣化與失效，是 CCUS 製程中最具隱蔽性且最容易被低估的危害來源之一，其風險特性並非來自單一瞬間事件，而是源於高壓二氧化碳長時間與材料互動所造成的漸進式劣化機制。在高壓或超臨界二氧化碳環境下，氣體分子具有極高的滲透能力，能逐步擴散進入彈性體密封件、O-ring、墊片、塗層以及部分高分子材料的內部微結構中，形成肉眼不可見的內部氣體累積狀態。於穩態操作期間，此類滲透現象往往不會立即造成可觀察的異常，使設備在外觀與功能上仍維持「看似正常」的運轉狀態，然而，當系統因異常停機、緊急卸壓、負載快速變動或操作條件劇烈轉換而發生壓力驟降時，原先滯留於材料內部的二氧化碳將迅速膨脹並向外逸散，造成材料內部產生高應力梯度，進而引發起泡、內裂、分層甚至整體剝離的快速氣體減壓破壞現象。此類失效往往具有高度突發性，一旦發生，密封功能可能在極短時間內完全喪失，導致原本受控的高壓系統轉變為不可預期的洩漏源，並進一步放大事故後果。更具風險的是，這種材料劣化並非一次性事件，而是會隨著反覆的壓力循環與操作年限逐步惡化，使設備在未經適當材料選用、相容性測試與完整性監控的情況下，實際安全裕度隨時間不斷被侵蝕，最終形成「低可預警性、高後果性」的失效模式，對 CCUS 製程安全構成長期且系統性的威脅。

同樣不可忽視的，還包括二氧化碳與水分共存時所引發的腐蝕與堵塞風險，此類危害在 CCUS 製程中往往扮演「事故前兆」的角色，其危險性不在於

短期內造成劇烈破壞，而在於對系統穩定性與設備完整性的持續侵蝕。在理想設計下，壓縮、輸送與儲存系統中的二氧化碳應維持高度乾燥狀態，然而在實務操作中，乾燥系統效能不足、操作偏差、設備老化或維修後殘留水分等情境，皆可能導致微量水分進入高壓二氧化碳系統。一旦水分與二氧化碳共存，便可能在局部形成碳酸環境，使原本在乾燥條件下相對穩定的碳鋼或低合金鋼材料，轉變為易受腐蝕的狀態，特別是在低流速、死角區域或壓力與溫度反覆波動的位置，局部腐蝕與點蝕將更容易發生。於低溫操作條件下，水分與二氧化碳亦可能生成固態水合物，這些固體結晶一旦在管線、閥件、節流孔或儀表取壓點內部生成，將可能造成部分或完全堵塞，使系統出現流量異常、壓力波動或控制回饋失真，進而誘發操作人員誤判系統狀態並採取不當操作。此類腐蝕與堵塞問題往往不會立即導致災難性事故，卻會逐步削弱設備耐壓能力、降低控制系統可靠度，並增加後續發生洩漏、破裂或超壓事件的機率，使原本可控的製程偏差，最終演變為重大事故的觸發條件；因此，在 CCUS 製程安全管理中，水分控制、材料耐蝕性評估與長期劣化監測，並非輔助性措施，而是攸關整體系統安全韌性的關鍵基礎。

此外，操作與控制層面的危害在 CCUS 系統中具有高度關鍵性，其重要性往往不亞於設備本體的機械完整性，卻在實務導入過程中經常被低估。這主要源於 CCUS 多半並非獨立運作的製程，而是高度耦合於既有的石化、化工或能源生產系統之中，其操作條件必須隨著上游製程負載變化、能源供應穩定度、甚至外部電力與調度策略而即時調整。當二氧化碳捕集量、壓縮流量或輸送需求發生變動時，整體系統的壓力、溫度與相態分布亦隨之改變，這使得控制系統必須同時面對高度非線性、跨單元耦合與時間延遲等複雜動態行為。若控制邏輯僅依循傳統穩態設計假設，而未充分納入二氧化碳在不同壓溫條件下的相變行為、設備耐受極限以及控制動作之交互影響，則操作偏差極易在短時間內被放大為設備超壓、過冷、異常振動或壓縮機喘振等不穩定狀態。此類狀態一旦出現，不僅會對設備造成直接損傷，也可能迫使系統進入緊急停機或非預期操作模式，進一步增加人為介入與誤操作的風險。特別是在啟動、停機與緊急操作等非穩態期間，系統參數變化速度最快、控制裕度最低，且操作人員往往承受較高的時間壓力與資訊不確定性，使得控制失誤更容易發生。從製程安全

的角度來看，這些操作情境並非例外，而是 CCUS 系統在其整個生命週期中必然反覆經歷的狀態，若未在設計階段即將其視為高風險操作模式加以分析與管理，事故往往會在最不利的時點發生。

最後，必須強調的是，CCUS 所引發的危害並不僅止於單一設備或單一事件的直接後果，而是天然伴隨顯著的次生與連鎖效應，使事故影響呈現跨設備、跨空間甚至跨時間的擴散特性。以高壓二氧化碳洩漏為例，其所形成的低溫高速噴射不僅是單一洩漏點的問題，更可能因噴射冷卻效應使鄰近設備或結構材料瞬間脆化，降低其承載能力，進而誘發次級破裂或連續洩漏事件，形成典型的骨牌效應。對於長距離輸送管線而言，一處失效可能導致周邊設施、道路、支撐結構或其他地下管線受損，使事故影響範圍迅速擴大，並增加應變與修復的複雜度。至於封存與注入系統，其風險更具有長期性與隱蔽性，一旦井筒完整性或地層隔離能力受到破壞，二氧化碳可能以緩慢且持續的方式逸散，短期內不一定造成顯著事故，卻可能在多年後累積成環境、結構或人員暴露風險，且往往難以回溯至單一明確事件作為肇因。這些次生與連鎖效應意味著，CCUS 事故後果的評估不能僅停留在「哪一個設備壞掉」的層級，而必須從系統整體出發，考量事故如何隨著時間演化、如何透過物理、操作與空間關係向外擴散，以及在不同階段對人員、設備與環境造成何種累積性影響。正是在這樣的風險特性下，CCUS 才必須被納入以重大事故防制為核心的製程安全分析框架中，透過系統性思維來理解並管理其真正的危害全貌。

綜合而言，CCUS 的製程危害類型呈現出多元且交織的特性，涵蓋物理性釋能、窒息性後果、材料劣化、操作控制失效，以及次生連鎖影響。這些危害若被分散看待，往往難以掌握其整體風險輪廓；唯有透過系統性的危害分類與整合性分析，才能為後續的事故情境建構、後果評估與管理策略設計奠定基礎。也正因如此，第三章的重點不在於列舉所有可能事故，而在於建立一個能夠支撐重大危害分析的共同理解框架，使 CCUS 的風險得以被完整且一致地認知。

四、CCUS 事故後果特性與重大危害 (MAH) 意涵

在前述章節已辨識 CCUS 製程中所固有的多元危害類型之後，下一個不可迴避的核心問題，便是這些危害一旦轉化為事故，其後果將呈現何種樣貌，

以及為何 CCUS 必須被明確納入重大危害事故 (Major Accident Hazard, MAH) 的治理範疇。與傳統製程事故相比，CCUS 事故的特殊性並不僅在於其發生機制，而更在於事故後果的表現形式與影響尺度，往往超出一般操作人員與管理制度的直覺預期，使其在風險溝通與制度設計上面臨更高的挑戰。

首先，CCUS 事故後果最顯著的特徵之一，在於其「低可感知性與高致命性並存」。多數高風險製程事故，例如火災或化學爆炸，通常伴隨明顯的火焰、爆音、煙霧或刺激性氣味，使人員得以在事故初期即察覺異常並嘗試撤離；然而，二氧化碳大量釋放所造成的事故，卻往往缺乏此類感官警示。當高濃度二氧化碳雲團在地面或半密閉空間中形成時，事故環境在視覺與嗅覺上可能與正常狀態幾乎無異，卻已在生理層面迅速剝奪人員的行動與判斷能力，使事故後果在極短時間內由「可逃生狀態」轉變為「不可逆傷亡」。這種後果特性，使 CCUS 事故的風險評估不能僅依賴傳統事故頻率的概念，而必須高度重視單次事故所可能造成的最大後果。

其次，CCUS 事故往往具有明顯的空間擴散性，使其影響範圍不易被侷限於設備本體或廠內區域。由於二氧化碳密度較高，洩漏後容易沿地形流動並在低窪處聚集，其影響範圍高度依賴地形、建物配置與氣象條件，而非僅由洩漏源大小決定。這意味著，即便事故源頭位於廠區內部，其後果仍可能延伸至廠界之外，對周邊作業人員、承包商，甚至鄰近社區構成風險。對於輸送管線或大型儲存設施而言，此種外溢後果更為顯著，使 CCUS 事故在本質上已具備典型重大危害事故的「跨場域影響」特徵。

進一步來看，CCUS 事故後果亦常伴隨顯著的非線性放大效應。初期看似有限的設備失效，例如小孔洩漏或局部密封劣化，可能因二氧化碳的相變、低溫噴射或材料脆化效應，迅速演變為更大規模的破裂或結構失穩，形成事故升級 (escalation) 的典型路徑。此類升級過程往往發生於極短時間內，使原本基於穩態假設所設計的防護措施來不及發揮作用，進一步放大事故後果。從 MAH 的角度來看，這正是最需要被系統性辨識與管理的故事型態。

此外，CCUS 事故的後果並不一定以瞬間災難性事件的形式呈現，其長期性與延遲性影響同樣具有重大危害意涵。特別是在地下封存或注入系統中，若

井筒完整性或隔離層發生劣化，二氧化碳可能以緩慢且持續的方式逸散，短期內不易察覺，卻可能在多年後對地下結構、建築基礎或局部環境造成影響。此類後果雖不具即時戲劇性，卻因其不可逆性與難以修復的特性，同樣符合重大事故後果的判斷邏輯，並對風險管理制度提出長期監測與責任歸屬的挑戰。

正是在上述多重後果特性的交織下，CCUS 不應僅被視為一項環保或減碳工程，而必須被納入以重大危害事故防制為核心的治理框架中。這意味著，對 CCUS 的安全管理不應僅停留在設備合格、操作程序或職業安全層級，而必須進一步透過系統性的事故情境建構、後果分析與風險可接受性判定，來確保其整體風險維持在社會與法規可接受的範圍內。換言之，唯有在 MAH 視角下重新檢視 CCUS 的事故後果特性，才能使減碳技術的推動，不至於在無意間引入新的高後果風險，並為後續建立完整的製程安全與設備完整性管理策略，奠定合理且必要的基礎。

五、CCUS 製程安全治理架構與管理邏輯

在確認 CCUS 事故後果已具備重大危害事故之性質後，下一個核心問題便不再是「是否存在風險」，而是應如何以制度化、系統化的方式，將這些風險納入可被管理、監督與持續改善的治理架構之中。從製程安全的觀點來看，CCUS 的風險並非來自單一失效機制，而是源於設備、操作、人員與外部環境之間的長期互動，因此，其安全治理不可能仰賴單點防護或零散措施，而必須建立一套能夠橫跨設計、操作、維修與退役全生命週期管理邏輯。

首先，CCUS 的安全治理必須以「製程安全管理」而非僅止於「職業安全管理」作為核心思維。傳統職安管理多聚焦於人員作業行為與即時防護措施，然而 CCUS 事故的致因往往在事故發生前數年甚至數十年即已埋下伏筆，例如材料選用不當、設計假設不足、完整性監測缺失或操作窗口定義不清等。這意味著，若僅以人員訓練或作業許可制度作為主要管控手段，將無法有效回應 CCUS 系統中潛藏的結構性風險。因此，CCUS 的治理邏輯必須回到製程安全的本質，將風險管理重心前移至設計與系統層級。

在此架構下，系統性危害辨識與事故情境建構成為首要工作。CCUS 各製

程單元應被視為一條連續的高風險製程鏈，而非相互獨立的設備群組，任何單元的失效都可能透過壓力、溫度或流量變化向上下游擴散。透過結構化的危害辨識方法，例如結合製程導向的系統性分析工具，得以在設計與變更階段即釐清潛在事故路徑，並辨識哪些失效情境可能演變為具備重大後果的事故。這類分析的價值，不在於預測所有可能事故，而在於建立對高後果情境的共同理解，使後續的防護策略能夠聚焦於最關鍵的風險節點。

進一步而言，CCUS 的安全治理必須與設備完整性管理深度整合。由於 CCUS 長期操作於高壓、低溫與相態變化頻繁的條件下，設備劣化往往具有漸進性與隱蔽性，單次檢查或靜態驗證不足以確保長期安全。唯有透過完整的設備完整性管理架構，將材料相容性評估、設計裕度、操作窗口、檢查策略與維修回饋串聯成閉環，才能確保設備實際運轉狀態始終符合設計假設。對 CCUS 而言，設備完整性不僅是可靠度問題，更是直接關係到重大事故是否會發生的前線防護。

同時，風險評估在 CCUS 治理中亦扮演不可或缺的角色，但其目的並非僅為產出風險數值，而是作為決策支持的工具。由於 CCUS 事故後果高度依賴情境條件，單一保守假設或簡化模型往往無法反映真實風險輪廓，因此，風險評估應聚焦於事故後果的空間分布、影響範圍與人員暴露情境，協助管理者理解哪些風險需要透過工程設計消除，哪些風險則必須透過營運限制或空間規劃加以控制。這樣的風險資訊，才能在專案選址、管線路徑規劃與應變策略制定中發揮實質作用。

此外，CCUS 的安全治理亦必須納入長期監測與變更管理的概念。無論是捕集系統效率提升、操作條件調整，或封存場址的長期運作，皆可能隨時間推移而發生改變。若缺乏嚴謹的變更管理機制，這些看似合理的調整，可能在不知不覺中偏離原始安全假設，逐步累積新的風險來源。因此，將變更視為風險重新分配的過程，而非單純的工程優化，是 CCUS 安全治理中不可忽視的一環。

六、設備完整性管理制度在 CCUS 管理

MI 系統需設定明確的完整性目標並持續追蹤相關績效指標。首先是針對關鍵設備制定性能標準（Performance Standards）：例如壓力容器須在指定壓力溫度下保持密閉不洩漏，安全閥在超壓時必須可靠動作且排放能力達標等。每項安全關鍵設備（SCE）皆應有對應的性能指標（如最大腐蝕速率、最小剩餘厚度、檢驗發現缺陷的可接受尺度等），這些標準成為日常監督與定期檢驗的依據。MI 管理人員會將完整性目標量化為一系列領先與落後指標（Leading/Lagging Indicators）：領先指標如按時完成的預防性維護工單百分比、超標操作事件次數（偏離完整性操作窗口的事件數）；滯後指標如因設備失效導致的洩漏事件數量、未遂事故報告數等。根據 CCPS 的建議，設備失效（尤其是涉及安全的 MI 失效）應作為重要滯後指標予以監控，因為這往往預示著資產完整性水準的下滑。例如，API RP 754 將設備洩漏或破裂導致的 PSM 事件列為一級或二級事故，這類事件的頻率是衡量 MI 體系有效性的重要指標。透過定期彙總分析這些指標，管理階層可以評估 MI 系統的表現是否達到預定目標，及早發現趨勢異常並採取行動改進。另一方面，MI 系統鼓勵持續改進：每當發生設備相關的意外停機或事故，必須透過事件調查找出根本原因並完善對策，將經驗反饋進入 MI 計畫中。透過建立閉環的績效監控與改進機制，MI 管理系統得以維持其有效性，確保設備完整性目標在 CCUS 全生命週期內持續達成。

完善的 MI 能極大降低 CCUS 裝置發生重大事故的可能性。透過前述 MI 制度措施，CCUS 過程中幾種典型高風險場景都應受到有效管控：

1. 高壓 CO₂ 管線或設備瞬間破裂：這是 CCUS 設施最嚴重的潛在事故之一，可能由腐蝕減薄未及時發現、材料低溫脆裂或機械損傷等引起。MI 系統通過週密的檢驗和監測，能在早期發現管壁減薄、裂紋缺陷等劣化跡象，及時更換或修復，防止破裂發生。例如某輸送管線因地質移動受損，若沒有 MI 管理，可能在壓力作用下猝然破裂，導致大量 CO₂ 瞬時洩出並在低窪處積聚，造成大片區域窒息危害；但在 MI 體系下，此管線的路由變形風險會被納入完整性計畫，透過巡線檢查及時發現地基下陷並減壓停輸，從而避免災難性失效。MI 系

統正是透過風險分析將這類威脅辨識出來並加以預防控制，避免類似大型 CO₂ 洩漏事故的發生。

2. CO₂ 注入井完整性失效：在 CCUS 地質封存階段，CO₂ 經由注入井壓入地下儲層。若井筒完整性出現問題（例如管柱腐蝕穿孔、水泥膠結失效），CO₂ 可能沿井筒漏回地表或汙染地下水。MI 管理將井筒完整性視為重中之重，對每一口注入井制定完整性監管方案，包括定期壓力測試、採用測井工具檢查套管和水泥環狀完整性，以及安裝壓力與漏氣監測儀等。同時，在封存場選址時也會考量遺留油井等穿透儲層的風險：這些遺留井如果封堵不良，可能成為 CO₂ 逸漏通道。MI 管理要求對此類井進行重新封堵或監測，並將相關風險納入整體風險評估。研究表明，CO₂ 會使鋼材和水泥遭受加速腐蝕、劣化。MI 策略在材料選擇上採用抗 CO₂ 腐蝕的合金及改良水泥配方，並在注入過程中控制雜質和水份以減緩腐蝕。透過周全的井完整性管理，可有效防止 CO₂ 經由井筒意外遷移，保障封存安全。例如挪威北海 Sleipner 等大型 CCS 項目至今無重大井漏事故，即是因為嚴格執行了鑽完井完整性標準及全生命周期監測。總括而言，MI 系統為 CCUS 的封存環節築起多道防線，確保 CO₂ 被安全封存而不會重返地表。
3. 安全關鍵設備故障導致防護失效：CCUS 裝置內許多安全屏障本身也是設備，例如緊急洩壓閥與聯鎖系統等。如果這些裝置在關鍵時刻失靈，後果不堪設想。MI 管理透過嚴謹的測試與維護計畫來確保安全關鍵設備的可靠性。例如，安全閥須定期校驗開啟壓力並檢查閥瓣腐蝕情況；氣體偵測器定期標定靈敏度；聯鎖閥門進行功能測試；備用發電機定期試車等。這些工作在 MI 體系中都有清晰的週期和標準，並以紀錄確保可追溯。當安全屏障設備發現缺陷時，MI 流程要求及時修復，在未修復前採取補償措施（如加強巡檢或降低工況）。以一座 CO₂ 壓縮機為例，其出口裝有爆破片和洩壓閥作雙重保護，MI 會對其進行 100% 檢驗測試以確保壓力超限時能正常動作；若發現洩壓閥有滲漏或彈簧疲勞，立即更換以恢復設計保護功能。正因為有 MI

對安全屏障的層層把關，在事故發生時這些裝置才能如期啟動，將事故在初期階段便將影響降至最低。

七、結論

在全球淨零轉型浪潮下，碳捕集、利用與封存（CCUS）已逐步由政策倡議轉化為實質工程實踐，並成為高排放產業短中期內不可或缺的過渡性技術。然而，本文指出，CCUS 並非單純的環保附屬設施，而是一條高度能量密集、長期操作於材料與操作極限附近的高風險製程系統，其風險樣態在本質上已具備重大危害事故（Major Accident Hazard, MAH）的特徵。

本文透過系統性分析 CCUS 的製程特性、物性行為與事故後果，說明其主要風險並非來自可燃性或化學毒性，而是源於高壓釋能、低溫效應、窒息性後果、材料劣化機制以及跨場域擴散潛勢。此類風險若仍以傳統職業安全或單點設備防護思維進行管理，將難以有效掌握其整體事故潛勢，甚至可能在減碳的同時，累積新的結構性安全風險。

在此基礎上，本文進一步強調，設備完整性管理（Mechanical Integrity, MI）不僅是 CCUS 製程安全的輔助工具，而應被視為其核心治理支柱之一。唯有透過制度化的 MI 管理架構，將設計假設、材料相容性、操作窗口、檢查策略、劣化監控與變更管理整合為一個可追蹤、可驗證且可持續改善的系統，方能確保 CCUS 在全生命週期中維持其原有的安全邏輯與風險可控性。

CCUS 的安全治理關鍵，不在於如何消除所有風險，而在於是否能以製程安全與設備完整性為核心，建立一套能夠長期承載高後果風險的管理體系。本文所提出之觀點，旨在提醒產業與政策制定者，唯有將 CCUS 明確納入重大危害管理與設備完整性治理架構之中，減碳技術方能真正成為「可持續且可接受」的產業轉型解方，而非未來新的事故源頭。

參考文獻

Connolly, S., & Cusco, L. (2007, May). Hazards from high pressure carbon dioxide releases during carbon dioxide sequestration processes. In *ICHEME Symposium Series* (Vol. 153, pp. 1-5). IChemE Rugby.

- Energy Institute. (2010). *Good plant design and operation for onshore carbon capture installations and onshore pipelines: A recommended practice guidance document* (1st ed.). Energy Institute.
- International Energy Agency. (2022). *CO2 storage resources and their development: An IEA CCUS handbook*. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/reports/co2-storage-resources-and-their-development>
- Ke, W. (2009). *CO2 BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion)* (Master's thesis, Høgskolen i Telemark).
- Rusin, A., & Stolecka, K. (2014). Assessment of risk related to transport of carbon dioxide. *Journal of Power Technologies*, 94(4).
- Seo, D. H., Jang, K. M., Lee, J. H., & Rhie, K. W. (2015). A Study of Consequence Analysis of Physical Explosion Damage in CO₂ Storage Tank. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 19(2), 12-19.
- U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. (2017). *Best practices: Risk management and simulation for geologic storage projects* (DOE/NETL-2017/1846). U.S. Department of Energy.
https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/BPM_RiskAnalysisSimulation.pdf

終結盲目切片時代：「攝護腺健康指數」引領攝護腺癌精準檢測

Farewell to Blind Biopsies: Prostate Health Index (PHI) Offers Precision Navigation in Prostate Cancer Detection

陳毓騏醫師¹

義大癌治療醫院泌尿科主任、義守大學醫學系專任副教授

聯絡作者：yuchichen1978@gmail.com

摘要

隨著醫療科技邁入精準醫學時代，攝護腺癌篩檢正經歷從「量」到「質」的轉型。攝護腺癌目前已躍升為臺灣男性的第三大常見癌症，然而傳統攝護腺特異抗原（PSA）檢測雖具高靈敏度，卻在特異性上顯著不足。臨床上常遇到的「灰色地帶」（PSA 介於 4.0 至 10.0 ng/mL）成為診斷痛點：僅約 25% 的患者最終確診為癌症，其餘 75% 常因良性肥大、發炎或生活行為（如騎單車、性行為）導致 PSA 升高，進而引發不必要的切片檢查，造成患者身體創傷與心理焦慮。

為解決過度診斷與「盲目切片」的困境，攝護腺健康指數（PHI）作為新一代「智慧篩檢」工具應運而生。PHI 透過結合總 PSA（tPSA）、游離 PSA（fPSA）以及關鍵的前驅指標「p2PSA」([−2]proPSA)，並利用特定數學公式進行加權計算。研究顯示，p2PSA 在癌症組織存在時會顯著上升，藉由公式放大癌症訊號並降低良性增生產生的雜訊，PHI 能比傳統檢測提升逾 20% 的診斷準確度。

PHI 不僅能協助區分良惡性病灶，更在評估腫瘤「惡性程度」上具備臨床價值。PHI 分數與格里森分數（Gleason score）呈正相關，能有效預測侵襲性癌症。鑑於其臨床效益，臺灣健保署已於 2024 年 12 月 1 日正式將 p2PSA/PHI

¹ 通訊地址：824005 高雄市燕巢區角宿里義大路 21 號（義大癌治療醫院泌尿科）

納入給付範疇。PHI 的推廣標誌著從傳統粗略篩檢向精準導航的跨越，透過更精確的風險分層（低、中、高風險），PHI 能擔任「門衛」角色，協助 PSA 異常、切片史陰性或具家族病史的患者，在接受侵入性檢查前獲得更具科學實證的決策依據，體現「智慧篩檢優於頻繁篩檢」的精準醫療核心價值。

【關鍵字】攝護腺癌（Prostate Cancer）、攝護腺特異抗原（PSA）、攝護腺健康指數（PHI）、精準醫療（Precision Medicine）、切片檢查（Biopsy）

一、引言：數字背後的焦慮

「醫師，我的 PSA 指數 6.5，是不是一定要切片？」在泌尿科診間，這類充滿不安的詢問每天都在上演（圖 1）[1]。對於許多中高齡男性而言，收到一張 PSA 值介於 4-10 ng/mL 的報告單，往往意味著必須面臨「盲目切片」的恐懼。傳統篩檢工具雖然立功多年，卻也因特異性不足，導致許多男性在高度焦慮中承受了不必要的侵入性檢查與過度診斷。如何在「漏診」與「白切」之間找到平衡，已成為現代精準醫療的關鍵課題。

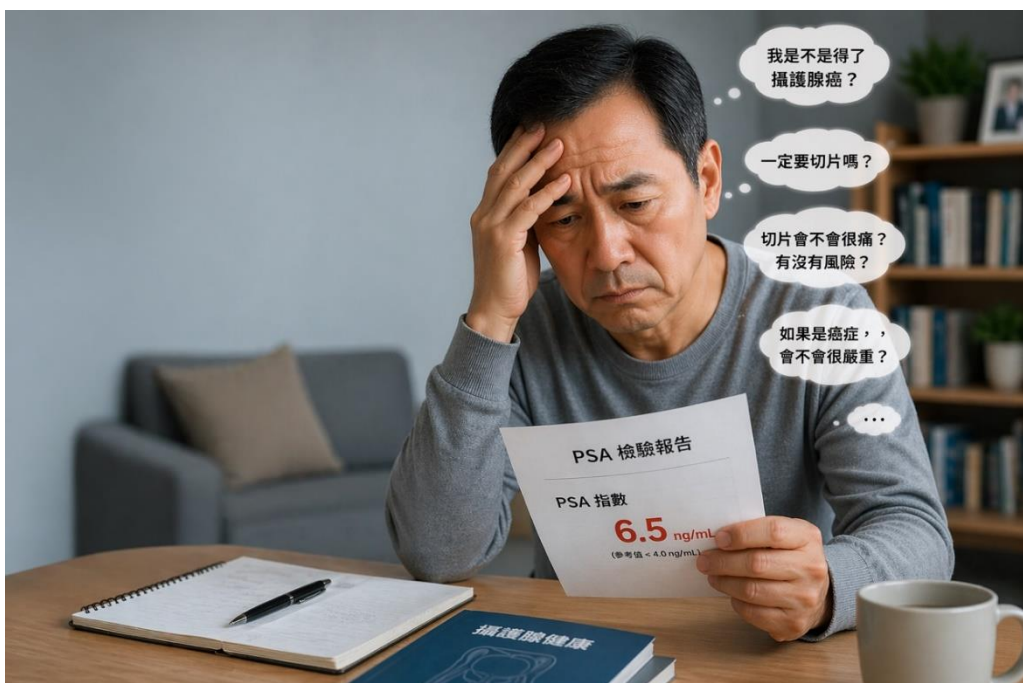


圖 1、病患在得知 PSA 指數為 6.5ng/ml 後，表現出對是否需要進行切片檢查感到焦慮與困惑的示意圖

二、現況：攝護腺癌發生率快速攀升

根據衛福部國健署民國 111 年癌症登記報告及民國 113 年死因統計資料，攝護腺癌已躍升台灣男性發生率第三、死亡率第五的癌症，每年新發案例突破 9,000 人（圖 2）[2]。攝護腺癌早期沒有症狀，容易與攝護腺肥大所引發排尿障礙搞混，因此定期篩檢不能少，癌症家族史者更需提早檢查。

附圖

112 年台灣男女性 10 大癌症標準化發生率



資料來源：本署癌症登記資料(不含原位癌)

1. 依標準化發生率（單位為每 10 萬人口）之高低順序，由上至下排列。
2. 標準化率係以西元 2000 年世界標準人口為標準人口計算(單位為每 10 萬人口)。

圖 2、民國 112 年國人十大癌症發生人數及民國 112 年台灣男女性 10 大癌症標準化發生率

臨床上，我們長期依賴攝護腺特異性抗原 PSA (Prostate-Specific Antigen) 作為首線篩檢工具，PSA 指數小於 4ng/mL，得到攝護腺癌的機會低；若指數介於 4 到 10ng/mL 之間，機會上升至 25%，應評估搭配切片檢查，確認是否為惡性腫瘤[3]。但是切片有引發感染的風險與副作用，而且這項指標存在一個醫學上的痛點：「高敏感、低特異」！

當一個男性的 PSA 值升高時，除了癌症之外，攝護腺肥大、攝護腺發炎、甚至剛騎完長途腳踏車或進行過性行為，都可能導致數值異常。為了解決傳統 PSA 篩檢在 4.0 至 10.0 ng/mL 「灰色地帶」導致偽陽性及不必要侵入性切片的問題，健保署自民國 113 年 12 月 1 日起納入「二胺基酸攝護腺特異抗原前驅物 p2PSA ([-2]proPSA)」檢測。這項新制結合計算「攝護腺健康指數 PHI (Prostate Health Index)」，能精準區分良性疾病與癌症，預計每年約 1.9 萬人受惠，建議 50 歲以上男性及高風險族群諮詢相關檢查。

三、曙光：什麼是「攝護腺健康指數 PHI」？它的科學原理為何？

攝護腺健康指數 PHI (Prostate Health Index) 並非單一指標，而是一個綜合性的計算公式。它結合了三種不同型態的 PSA 數據，透過數學演算法得出一個更精確的風險分數。

3.1 三項核心指標

- Total PSA (tPSA)：傳統的總量指標。
- Free PSA (fPSA)：游離型 PSA，通常癌症風險較高時，此數值比例會下降。
- p2PSA ([−2]proPSA)：這是計算 PHI 的重要指標。它是 PSA 的一種前驅物 (Precursor)，研究發現，在攝護腺癌組織中，p2PSA 的濃度會顯著升高。

3.2 PHI 的計算公式[4]

醫學界透過大量的臨床數據建模，得出了以下公式：

$$PHI = \frac{[p2PSA]}{[fPSA]} \times \sqrt{[tPSA]} \quad (PHI = (p2PSA/fPSA) \times \sqrt{tPSA})$$

透過這個公式，PHI 放大了癌症相關指標 (p2PSA) 的影響力，同時平衡了總量與游離比率的誤差。

四、臨床實戰守則：「攝護腺健康指數 PHI」在臨床上的三大應用[5]

4.1 找出真正需要切片的病人

這是 PHI 最核心的貢獻。對於 PSA 處於 4-10 ng/mL 灰色地帶的患者，醫師會參考 PHI 分數。如果 PHI 分數較低，代表惡性機率極低，可以選擇持續追蹤而非立即切片；若 PHI 分數高，則強烈建議進行病理檢查。

4.2 預測「高侵略性」癌症

並非所有的攝護腺癌都致命。有些癌症生長極其緩慢，被稱為「惰型癌症」。PHI 的數值高低與癌症的惡性程度「格里森分數（Gleason score）」有正相關。PHI 越高，代表篩檢出高風險、高侵略性癌症的機率越大。

4.3 主動監測（Active Surveillance）的輔助

對於已經確診為低風險攝護腺癌、選擇暫不手術而採取「主動監測」的患者，PHI 可以作為長期追蹤的工具。如果 PHI 數值突然飆升，可能預示著疾病正在進展，需調整治療策略。

五、優勢：使用「攝護腺健康指數 PHI」的四大亮點

5.1 準確度顯著提升

比起單純看 PSA 或是 fPSA/tPSA 比值，「護腺健康指數 PHI 在區分癌症與良性肥大上的準確度「曲線下面積 AUC（Area Under the Curve）」提升了 20% 以上。

5.2 「抽血」即可完成，侵入性大幅降低

相對於切片需要穿刺針進入攝護腺，PHI 只需要抽取一管靜脈血液，對病人而言幾乎沒有負擔與副作用。

5.3 心理壓力的釋放

對於 PSA 異常的男性，等待切片的過程往往充滿焦慮。PHI 提供的風險機率表（表 1）[\[6\]](#)，能讓受檢者更理性地理解自己的風險分級。

表 1、PHI 攝護腺癌檢出機率風險表

PHI 數值範圍	攝護腺癌檢出機率（參考值）
0 - 26.9	低風險（約 2.6%）

27.0 - 35.9	中低風險（約 12.3%）
36.0 - 54.9	中高風險（約 37.7%）
55.0 以上	高風險（約 70.7%）

註：以上數據僅供參考，實際判讀需由專業醫師結合家族史、觸診及影像檢查等進行。

5.4 節省醫療資源

減少不必要的切片，不僅減少了併發症的治療成本，也讓醫療資源能更精準地分配給真正需要的患者。

六、精準醫療的守門員：哪些人最該考慮 PHI 攝護腺健康指數？

在攝護腺癌的篩檢路徑中，傳統的 PSA 檢測雖然普及，卻常因特異性不足令醫師與患者陷入診斷困境。隨著精準醫學的發展，攝護腺健康指數（PHI）已成為突破僵局的關鍵。然而，PHI 並非亂槍打鳥的工具，臨床上以下四類族群最能從中獲得實質益處，將其視為避開「過度醫療」的指南針。

首先，是 PSA 數值處於 4-10 ng/mL 「灰色地帶」的男性。這是最令泌尿科醫師頭痛的範圍，因為此數值下，癌症的機率僅約四分之一，其餘多為良性肥大或發炎。對於這類族群，PHI 能透過更深層的生物標記 p2PSA 進行加權計算，將模糊的數字轉化為具體的風險機率，幫助患者精準評估「這刀（切片）是否真的非挨不可」。

其次，曾接受過切片且結果為陰性，但 PSA 仍持續攀升者，更是 PHI 的核心受益對象。由於傳統切片可能存在採樣誤差，導致躲藏在攝護腺深處或前端的腫瘤被遺漏。當 PSA 持續升高引發擔憂時，PHI 能提供比傳統檢測更高質量的「癌症信號」，協助判定是否需要進行二度切片，或是結合磁共振造影（MRI）進行精準定位。

再者，針對具備家族病史的高危險族群，PHI 提供了更靈敏的監測層級。若一等親內曾患有攝護腺癌，其發病風險倍增，單純依賴 PSA 可能會因良性雜訊掩蓋了早期癌症跡象。PHI 的高度特異性能及早偵測出具侵襲性的癌症訊號，實現「早發現、早治療」的目標。

最後，對於對侵入性檢查（如切片）具有高度疑慮或猶豫的患者，PHI 扮演了關鍵的「守門員」角色。切片檢查雖是確診金標準，但伴隨的感染風險與術後不適當令患者卻步。透過 PHI 的非侵入性血液檢測，患者能在決定是否承擔手術風險前，先獲得一份科學化的數據佐證，讓醫療決策從「盲目猜測」轉向「證據導向」。

七、精準醫療時代的明智選擇

攝護腺健康指數（PHI）的問世，標誌著攝護腺癌篩檢從「量」的觀察進化到了「質」的分析。它不是要取代 PSA，而是可在 PSA 的初步篩檢之後，為疑似攝護腺癌的病患提供更精確的風險分層，用來做為診斷的決策參考。

對於一般民眾而言，定期檢查固然重要，但「檢查得更聰明」才是關鍵。如果您或您的家人在抽血檢查中發現 PSA 異常，先別過度驚慌。建議諮詢泌尿科醫師，評估是否透過 PHI 進行進一步的風險分級，讓診斷過程更加科學、精確且人性化。

參考文獻

- [1] ChatGPT (DALL-E 3), Prompt: “生成一張顯示病患在得知 PSA 指數為 6.5ng/ml 後，表現出對是否需要進行切片檢查感到焦慮與困惑的示意圖。” 2026/04/22
- [2] 衛生福利部國民健康署
<https://www.hpa.gov.tw/Pages/Detail.aspx?nodeid=4878&pid=19734>
- [3] PSA Levels and the Probability of Prostate Cancer on Biopsy. European Urology Supplements, 1 (2002), 21-27
- [4] 貝克曼庫爾特亞瑟斯攝護腺特異抗原前驅物試劑組產品說明書。
- [5] Prostate Health Index outperforms other PSA derivatives in predicting a

- positive biopsy in men with tPSA <10 ng/mL: Largest prospective cohort in Taiwan. *Journal of Chinese Medical Association*. (2019) 82: 772–777
- [6] Baseline prostate health index risk category and risk category changes during active surveillance predict grade reclassification. *Urol Oncol*. 2023;41(11):455.e1-455.e6

老化男性的荷爾蒙變化與攝護腺健康 Hormonal Changes and Prostate Health in Aging Men

陳忠賢醫師

義大癌治療醫院 泌尿科主治醫師

門診中，一位 52 歲男性因頻尿、夜尿與排尿遲緩前來就診。患者主訴近半年來夜間需起床排尿 2-3 次，白天亦有尿急感，且排尿時間延長、尿流變細。除泌尿道症狀外，他亦提到近年來出現疲倦、性慾降低與情緒起伏等情形，但多半認為是工作壓力與年齡增長所致，未曾特別就醫評估。身體檢查顯示攝護腺輕度肥大，國際攝護腺症狀評分（IPSS）為中度。抽血檢查中，血清睪固酮濃度位於正常下限。這樣的臨床場景，在 40 至 60 歲男性族群中並不少見，卻常被切割為單一器官或單一症狀處理，而忽略其背後共同的老化生理機制。

攝護腺位於膀胱出口下方，環繞近端尿道（proximal urethra），也就是所謂的攝護腺尿道。這個解剖位置決定了攝護腺一旦隨年齡增大，便可能影響尿液由膀胱排出的通道。中老年男性常見的下泌尿道症狀（lower urinary tract symptoms, LUTS）並不完全等同於「攝護腺肥大」，但良性攝護腺增生或俗稱攝護腺肥大（benign prostatic hyperplasia, BPH）或良性攝護腺阻塞（benign prostatic obstruction, BPO）確實是重要原因之一。當增生的攝護腺組織壓迫尿道，或膀胱頸與攝護腺平滑肌張力增加時，膀胱排尿時需要產生更高壓力，久而久之便可能出現尿流變細、解尿遲疑、斷斷續續、解不乾淨等排尿性症狀；另一方面，膀胱長期面對出口阻力增加，也可能變得較敏感，造成頻尿、急尿、夜尿等儲尿性症狀。然而，男性的下泌尿道症狀（lower urinary tract symptoms, LUTS）也可能是多因素的，除了攝護腺阻塞，也可能與膀胱功能、老化、代謝疾病、藥物或神經因素相關，因此臨床上不宜只用「攝護腺肥大」解釋所有排尿問題。（European Association of Urology, 2024）

臨床評估時，常使用國際攝護腺症狀評分表（International Prostate

Symptom Score, IPSS) 來量化症狀嚴重度。IPSS 源自美國泌尿學會症狀指數 (American Urological Association Symptom Index, AUA-SI)，包含 7 個症狀問題：解不乾淨、頻尿、間歇性解尿、急尿、尿流變弱、解尿需用力，以及夜尿；每題 0 - 5 分，總分 0 - 35 分，通常分為輕度 0 - 7 分、中度 8 - 19 分、重度 20 - 35 分，另加一題生活品質影響評估。IPSS 的價值不在於單獨診斷良性攝護腺增生 (benign prostatic hyperplasia, BPH)，而是幫助醫師與病人把主觀的不適轉換成可追蹤的數字，作為治療前評估、追蹤藥物反應，以及判斷是否需要進一步檢查或手術的重要依據。(Barry et al., 1992)

男性更年期，醫學上稱為晚發性性腺功能低下 (Late-onset hypogonadism; LOH)，是指男性隨著年齡增長，體內睪固酮 (testosterone) 逐漸下降所引發的一系列臨床症候群。不同於女性的停經具有明確的生理轉折點，男性荷爾蒙的變化較為緩慢且持續，通常自 40 歲後開始，每年約以 1 - 2% 的速度下降 (Harman et al., 2001)。然而，男性更年期的本質並非單純荷爾蒙「量」的減少，更涉及下視丘 - 腦下垂體 - 睪丸軸 (hypothalamic - pituitary - gonadal axis) 的調控改變、性荷爾蒙結合球蛋白 (SHBG) 上升，以及雄性素受體 (androgen receptor) 敏感性下降，導致整體雄性素作用減弱。臨床上，患者可能出現性慾降低、勃起功能障礙、體力衰退、肌肉量減少與脂肪增加等身體變化，亦常伴隨情緒低落、注意力不集中及睡眠障礙等心理症狀。值得注意的是，男性更年期的診斷需同時具備臨床症狀與血清睪固酮濃度下降，並常輔以標準化量表 (如 ADAM questionnaire) 進行評估。整體而言，男性更年期是一種跨越內分泌、代謝與心理層面的多系統疾病，其影響範圍亦延伸至攝護腺與下尿路功能，成為中老年男性健康不可忽視的重要議題。(Bhasin et al., 2018; European Association of Urology, 2023)

在晚發性性腺功能低下 (Late-onset hypogonadism; LOH) 的臨床篩檢中，老化男性雄性素缺乏問卷 (Androgen Deficiency in the Aging Male questionnaire, ADAM questionnaire) 是最廣泛使用的工具之一。該問卷由 Morley 等人提出，主要用於快速辨識可能存在睪固酮不足的男性族群，具有操作簡便與高敏感度的特點。

ADAM 問卷共包含 10 個是非題，內容如下：

1. 是否有性慾下降？
2. 是否感到精力不足？
3. 是否體力或耐力下降？
4. 是否身高變矮？
5. 是否對生活的樂趣減少？
6. 是否感到悲傷或易怒？
7. 是否勃起功能變差？
8. 是否運動能力下降？
9. 是否在晚餐後容易打瞌睡？
10. 是否工作表現變差？

判定方式為：若第 1 題（性慾下降），第 7 題（勃起功能障礙）回答「是」，或 10 題中有任 3 題以上回答「是」，即為篩檢陽性，需進一步進行血清睪固酮檢測以確認診斷。然而，ADAM 問卷雖具有良好的敏感度（約可達 80 - 90%），但其特異性較低，容易受到年齡、心理狀態及慢性疾病等因素影響，因此不建議單獨用於診斷，而應與臨床症狀評估及生化檢驗（total testosterone 或 free testosterone）併用。（Morley et al., 2000）

男性進入中年後，血清睪固酮（testosterone）濃度會逐漸下降，而攝護腺與下泌尿道仍受到雄性素受體（androgen receptor, AR）訊號調控。傳統上認為，睪固酮可經由 5α 還原酶（ 5α -reductase）轉換為二氫睪固酮（dihydrotestosterone, DHT）；二氫睪固酮與雄性素受體結合後，可參與攝護腺上皮細胞與間質細胞的增生。因此，雄性素－雄性素受體軸線（androgen-androgen receptor axis）被視為攝護腺發育與良性攝護腺增生（benign prostatic hyperplasia, BPH）形成的重要生物學基礎。（Madersbacher et al., 2019）

然而，男性更年期與下泌尿道症狀（lower urinary tract symptoms, LUTS）

之間的關係，並非單純呈現「睪固酮（testosterone）越高，攝護腺越大，症狀越嚴重」的線性模式。臨床研究顯示，老化男性的下泌尿道症狀亦與代謝症候群、慢性發炎、血管功能障礙、膀胱功能退化及睡眠品質下降等多重因素相關；低睪固酮狀態可能透過這些全身性機轉加重症狀，而不僅僅是經由攝護腺體積增加所造成的機械性阻塞。晚發性性腺功能低下（Late-onset hypogonadism, LOH）與下泌尿道症狀在臨床上常同時出現，且兩者之間可能具有交互影響的關係。研究指出，低睪固酮狀態可能透過多重機轉影響排尿功能，包括調節雄性素受體（androgen receptor, AR）活性、改變膀胱與攝護腺平滑肌張力、影響自主神經系統調控，以及促進慢性發炎反應，進一步加重排尿症狀。此外，肥胖與代謝症候群等共病因子亦可能同時促進遲發性性腺低下症與下泌尿道症狀的發生，使兩者在老年男性族群中呈現高度共存的現象。（Kohn et al., 2016）

因此，可將男性更年期與攝護腺健康視為一個「交互影響」的動態過程：一方面，雄性素－雄性素受體軸線（androgen – androgen receptor axis）是攝護腺生長與良性攝護腺增生（benign prostatic hyperplasia, BPH）發生的重要生物學基礎；另一方面，中年後睪固酮（testosterone）下降所伴隨的代謝異常、慢性發炎反應及膀胱功能改變，亦可能共同促進下泌尿道症狀（lower urinary tract symptoms, LUTS）的出現與惡化。臨床上在評估 40 – 60 歲男性的排尿症狀時，不應僅將問題歸因於攝護腺體積增加所造成的阻塞，也應同時納入男性荷爾蒙狀態、代謝健康、睡眠品質及整體生活品質等因素進行整體性評估。歐洲泌尿科醫學會男性下泌尿道症狀指引（European Association of Urology male LUTS guideline, 2024）亦強調，男性下泌尿道症狀屬於多因素疾病，其評估與治療策略需依據症狀型態、攝護腺大小、膀胱出口阻塞程度以及病人整體健康狀態進行個別化處置。（Corona et al., 2013; Traish et al., 2018）

男性下泌尿道症狀（male lower urinary tract symptoms, LUTS）的藥物治療需依據症狀型態、攝護腺體積、前列腺特異抗原（prostate-specific antigen, PSA）以及是否存在膀胱出口阻塞（bladder outlet obstruction, BOO）進行個別化選擇。對於以排尿困難為主的病人，常見與良性攝護腺增生（benign prostatic hyperplasia, BPH）相關，可使用選擇性 $\alpha 1$ 腎上腺素受體阻斷劑（alpha-1

adrenergic receptor antagonists），例如 tamsulosin、silodosin、alfuzosin 或 doxazosin，以放鬆攝護腺與膀胱頸平滑肌，改善尿流速及症狀。若攝護腺體積較大，則可使用五型 α 還原酶抑制劑（5-alpha reductase inhibitors），例如 finasteride 或 dutasteride，以降低二氫睪固酮（dihydrotestosterone, DHT）濃度並縮小攝護腺體積，進而降低急性尿滯留及未來手術風險。對於症狀較嚴重或攝護腺體積較大的患者，兩類藥物合併使用可提供較佳的長期療效（European Association of Urology, 2024；Sandhu et al., 2024）。

若以頻尿、急尿或夜尿等儲尿症狀為主，則可使用抗膽鹼藥物（antimuscarinics）或 $\beta 3$ 腎上腺素受體促效劑（beta-3 adrenergic receptor agonists），以改善膀胱過動症相關症狀。若病人同時合併勃起功能障礙，磷酸二酯酶第五型抑制劑（phosphodiesterase type 5 inhibitors），如 tadalafil，亦可改善下尿路症狀與性功能，但需注意心血管風險及與硝酸鹽類藥物併用的禁忌（European Association of Urology, 2024）。

晚發性性腺功能低下（late-onset hypogonadism, LOH）的治療核心為睪固酮補充治療（testosterone replacement therapy, TRT），但必須同時具備臨床症狀及反覆確認血清睪固酮濃度降低方可診斷並治療。治療前應評估攝護腺癌風險、前列腺特異抗原（prostate-specific antigen, PSA）、血比容（Hematocrit，血液中紅血球所佔體積的百分比）、睡眠呼吸中止症及心血管狀況。睪固酮補充治療可透過肌肉注射、經皮凝膠或貼片等方式進行，治療過程需定期監測症狀改善情形、血清睪固酮濃度、血比容及前列腺特異抗原（prostate-specific antigen, PSA）變化。若病人仍有生育需求，應避免使用外源性睪固酮，因其可能抑制下視丘—腦下垂體—性腺軸功能並影響精子生成（Bhasin et al., 2018）。

在男性下泌尿道症狀（male lower urinary tract symptoms, LUTS）與晚發性性腺功能低下（late-onset hypogonadism, LOH）同時存在的情況下，睪固酮補充治療（testosterone replacement therapy, TRT）是否會惡化攝護腺相關症狀一直是臨床關注的重點。傳統觀念認為雄性素可能促進攝護腺生長，因此對於未評估或嚴重下尿路症狀的病人應謹慎使用。然而近年系統性回顧與統合分析顯示，在多數輕至中度下尿路症狀的晚發性性腺功能低下患者中，睪固酮補充治

療並未顯著惡化國際攝護腺症狀評分表（International Prostate Symptom Score, IPSS）、前列腺特異抗原（prostate-specific antigen, PSA）或攝護腺體積。因此，在適當評估與監測下，睪固酮補充治療並非絕對禁忌，但仍需定期追蹤臨床症狀與相關檢驗數值（Kohn et al., 2016；Yuan et al., 2024）。

當男性下泌尿道症狀（male lower urinary tract symptoms, LUTS）經適當藥物治療仍無法改善，或出現併發症時，應考慮進一步手術介入。根據歐洲泌尿科學會指引，手術適應症包括反覆尿滯留、反覆泌尿道感染、膀胱結石、腎功能受損、顯著殘尿量增加，以及國際攝護腺症狀評分表（International Prostate Symptom Score, IPSS）持續為中重度且影響生活品質者（European Association of Urology, 2024）。

近年來，攝護腺手術已由傳統經尿道切除術逐漸轉向低侵入性的消融與雷射治療，以降低出血風險、縮短住院時間並提升術後恢復速度。常見技術可分為熱消融治療與雷射手術兩大類。

熱消融治療中，經尿道水蒸氣熱療（water vapor thermal therapy, Rezūm）透過高溫水蒸氣注入攝護腺組織，使細胞壞死並逐漸被吸收，適用於中等體積攝護腺，且可在局部麻醉下進行。其優點為對性功能影響較小，但症狀改善速度較雷射手術緩慢，且部分病人短期內可能出現尿滯留或刺激性排尿症狀（McVary et al., 2016）。另一類為攝護腺尿道拉開術或拉提手術（prostatic urethral lift, UroLift），透過植入裝置將攝護腺側葉撐開，以減少尿道壓迫，其特色為保留射精功能，適合攝護腺體積較小且無中葉肥大的患者（Roehrborn et al., 2013）。

雷射手術則為目前主流且證據較充分的手術方式，依雷射種類與作用機轉不同，可分為汽化、切除與剝離三種技術。其中，綠光雷射攝護腺汽化術（photoselective vaporization of the prostate, PVP）利用高能量雷射汽化攝護腺組織，具有良好的止血效果，適合使用抗凝血藥物的患者。鈦雷射攝護腺剝離術（holmium laser enucleation of the prostate, HoLEP）則可完整剝離攝護腺腺體，適用於各種大小攝護腺，長期療效與傳統手術相當，且再治療率低，被認為是目前最具代表性的雷射手術之一（European Association of Urology, 2024）。

此外，鈹雷射攝護腺手術 (thulium laser prostate surgery) 亦可進行汽化或剝離，具有切割精細與止血效果佳的優點。

整體而言，消融與雷射手術在安全性與恢復速度上優於傳統經尿道切除術，特別適合高齡、多重共病或需持續使用抗凝血藥物的患者。然而不同手術方式在症狀改善速度、長期療效與性功能影響上仍有差異，臨床上應依據攝護腺體積、解剖結構 (如是否有中葉肥大)、病人年齡與對性功能保留的需求進行個別化選擇 (European Association of Urology, 2024; Cornu et al., 2015)。

老化男性的下尿路症狀與男性更年期並非各自獨立的疾病，而是源於相同老化過程中多重生理變化的不同表現。攝護腺體積的改變、雄性素訊號的調節、代謝與發炎反應，以及膀胱功能的退化，共同構成中老年男性常見的臨床症候群。臨床實務上，單純以「攝護腺肥大」或「荷爾蒙不足」解釋症狀已不足以反映其複雜性，應採取整體性評估策略，結合症狀量表、生化檢驗與影像學檢查，進行個別化治療決策。未來隨著對男性老化機轉的深入了解，整合內分泌、泌尿與代謝觀點的跨領域治療模式，將有助於提升患者生活品質，並提供更精準且安全的醫療照護。

參考文獻

- Barry MJ, Fowler FJ Jr, O'Leary MP, Bruskewitz RC, Holtgrewe HL, Mebust WK, et al. (1992). The American Urological Association symptom index for benign prostatic hyperplasia. *Journal of Urology*, 148(5):1549–1557.
- Bhasin S, Brito JP, Cunningham GR, et al. (2018). Testosterone therapy in men with hypogonadism: An Endocrine Society clinical practice guideline. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 103(5):1715–1744.
- Cornu JN, Ahyai S, Bachmann A, et al. (2015). A systematic review and meta-analysis of functional outcomes and complications following transurethral procedures for LUTS resulting from BPH. *European Urology*, 67(6):1066–1096.
- Corona G, Vignozzi L, Sforza A, et al. (2013). Risks and benefits of late onset hypogonadism treatment: an expert opinion. *World J Mens Health*, 31(2): 103–125.

- European Association of Urology. (2023). *EAU Guidelines on Sexual and Reproductive Health*. Arnhem. The Netherlands: EAU Guidelines Office.
- European Association of Urology. (2024). *EAU Guidelines on the Management of Non-neurogenic Male Lower Urinary Tract Symptoms (LUTS)*. The Netherlands: EAU Guidelines Office.
- Harman SM, Metter EJ, Tobin JD, Pearson J, Blackman MR. (2001). Longitudinal effects of aging on serum total and free testosterone levels in healthy men. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 86(2):724–731.
- Kohn TP, Mata DA, Ramasamy R, Lipshultz LI. (2016). Effects of testosterone replacement therapy on lower urinary tract symptoms: a systematic review and meta-analysis. *Eur Urol*, 69(6):1083-1090.
- Madersbacher S, Sampson N, Culig Z. (2019). Pathophysiology of benign prostatic hyperplasia and benign prostatic enlargement: a mini-review. *Gerontology*, 65(5):458-464.
- McVary KT, Roehrborn CG. (2016). Three-year outcomes of the prospective, randomized controlled Rezūm system study. *Journal of Urology*, 197(6):1507-1516.
- Morley JE, Charlton E, Patrick P, et al. (2000). Validation of a screening questionnaire for androgen deficiency in aging males. *Metabolism*, 49(9):1239–1242.
- Roehrborn CG, Gange SN, Shore ND, et al. (2013). The prostatic urethral lift for the treatment of LUTS secondary to BPH. *Journal of Urology*, 190(6):2161-2167.
- Sandhu JS, Bixler BR, Dahm P, et al. (2024). Management of Lower Urinary Tract Symptoms Attributed to Benign Prostatic Hyperplasia: AUA Guideline Amendment 2023. *Journal of Urology*, 211(1):11-19.
- Traish AM, Johansen V. (2018). Impact of Testosterone Deficiency and Testosterone Therapy on Lower Urinary Tract Symptoms in Men with Metabolic syndrome. *World J Mens Health*, 36(3): 199-222.
- Yuan X, Xiong X, Xue J. (2024). Effect of Testosterone Replacement Therapy on Lower Urinary Tract Symptoms: A Systematic Review and Network Meta-analysis. *Journal of Evidence-Based Medicine*, 17(3):490-502.
-



會址：80652高雄市前鎮區一心一路243號4樓之1

4F-1, No.243.Yixin 1st Rd.,Qianzhen Dist.,Kaohsiung City 80652,Taiwan

通訊地址：807618高雄市三民區建工路415號

No.415, Jiangong Rd., Sanmin Dist., Kaohsiung City 807618, Taiwan

Email: hph@nkust.edu.tw (黃小姐)

TEL：07-3814526轉12205

