

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

113 年第 2 季 (113.04 No.132)

台電綜合研究所 **TPRI**

地址：(100046) 台北市中正區羅斯福路 4 段 198 號 電話：(02)2360-1084 傳真：(02)2365-8477

目錄

研究計畫成果

- 以一階段與二階段變壓吸附技術捕集電廠煙氣中二氧化碳 ...1
- 新技術新設備介紹
- 一、利用 LINE 平台推播電壓驟降即時資訊3
- 二、去碳燃氫技術發展與應用現況4
- 三、變壓器絕緣紙老化診斷指標甲醇參考值訂定6
- 研發與試驗活動
- 台電與歐洲商會共同發表「電力淨零路徑報告書」8

台灣電力公司

使命：以合理成本及友善環境的方式，提供社會多元發展所需的穩定電力。

願景：成為卓越且值得信賴的世界級電力事業集團。

經營理念：誠信、關懷、服務、成長。

研究計畫成果

以一階段與二階段變壓吸附技術捕集電廠煙氣中二氧化碳

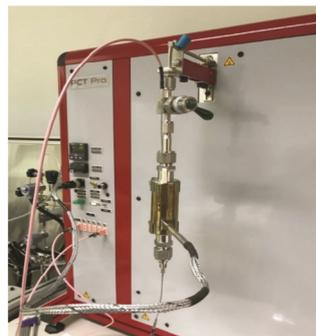
(化學與環境研究室：莊宗諭、沈威辰、高靖棟、黃曉瑜、杜思鴻)

(一) 研究背景：

近年來大氣中二氧化碳濃度逐漸升高，NOAA 在 2024 年 2 月的報導中，全球大氣中平均二氧化碳濃度已升至 421.40 ppm，我國也在 111 年 4 月 21 日通過將「溫室氣體減量及管理法」名稱修正為「氣候變遷因應法」，並函請立法院審議，同時將國家長期減碳目標修改為「2050 年淨零排放」，加強整體國家對溫室氣體排放之管制力量。本研究此從實驗室確認二氧化碳固態吸附劑效能開始，採用 13X 作為固態吸附劑，並依其建立 VPSA(Vacuum Pressure Swing Adsorption)一階段與二階段之二氧化碳分離程序，其程序主要包含，高壓吸附、同向減壓、壓力平衡、真空出料、靜置等程序，嘗試以低能耗、無溶劑、低脫附能量之方式捕集二氧化碳。

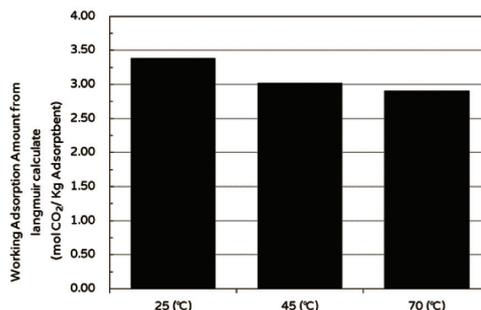
(二) 研究成果：

首先以恆溫平衡吸附曲線實驗(設備如圖 1)來求得 Langmuir 參數，可由其計算吸脫附時之可操作二氧化碳，若以吸附壓力為 3.0 bar、脫附壓力為 0.1bar 之情況來進行計算，此條件下的可操作二氧化碳量即為 3.0 bar 時的吸附量減去 0.1 bar 時的吸附量，其可用以估計完整吸脫附時所能分離出二氧化碳的總量，由圖 2 可確認 13X 在 25°C 時有最大操作量，每公斤吸附劑可分離約 3.38 mol CO₂，而溫度上升至 70°C 時，每公斤吸附劑可分離量雖降至約 2.90 mol CO₂，但仍有維持八成以上之操作量。



資料來源：本所自行拍攝

圖 1 固態吸附劑二氧化碳吸附效能測量設備

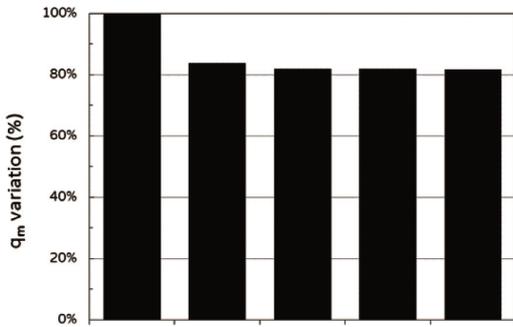


資料來源：本所自行以 excel 製圖

圖 2 由 Langmuir model 所計算 0.1 bar 至 3.0 bar 之可操作二氧化碳吸附量

吸附劑在第一次使用時，都會以 250°C 之高溫除水與再生，而現場運轉時並非每次都進行高溫再生，故先行於實驗室內以 30°C 之情況進行模擬現場環境之簡易再生，隨後也進行恆溫吸附曲線實驗來求得 Langmuir 相關參數，若假設第一次之 q_m (最大吸附量) 為 100%，而後續 q_m 衰減變化如圖 3，由此可瞭解第二次之 q_m 僅為第一次之 83.71%，吸附量有一定程度之衰減，但後續第五次之 q_m 仍有第一次之 81.65%，後續之衰減量僅為 2% 甚至更小，也由此可估算後續每公斤吸附劑在 25 與 70°C 時之分離操作量分別應有 2.76、2.470 mol CO₂ 以上之程度。

以現場煙道氣來進行長時間之三塔九步驟二氧化碳分離試驗，主設備如圖 4 與 5，程序示意如圖 6，各 cycle 實驗結果如圖 7，其進料二氧化碳濃度約為 12.19 ± 0.98%，吸附壓力約 3.0 ± 0.22 bar、真空出料壓力約為 0.12 ± 0.10 bar、降壓以及升壓時的壓力平衡之壓力分別約為 1.62 ± 0.14 bar、1.30 ± 0.08 bar，經分離後二氧化碳平均濃度為 91.45 ± 3.37%，而歷經長時間之運轉，最後 10 個 cycle 的二氧化碳分離後平均濃度為 90.74 ± 1.25%，可確認此程序在此架構下可穩定分離二氧化碳。



資料來源：本所自行以 excel 製圖

圖 3 13X 重複使用後 q_m 衰減變化



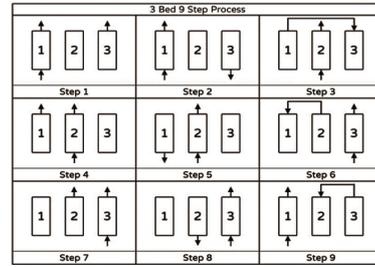
資料來源：本所自行拍攝

圖 4 VPSA 貨櫃設備(兩個 20 呎黃藍貨櫃)



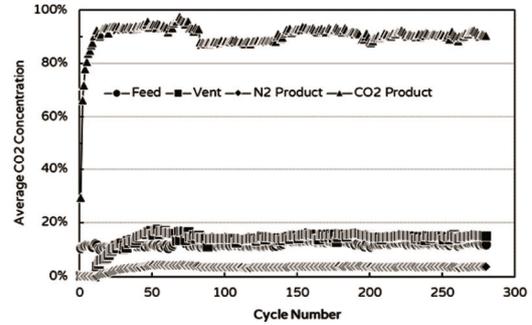
資料來源：本所自行拍攝

圖 5 三塔式變壓吸附分離主設備



資料來源：本所自行以 ppt 製圖

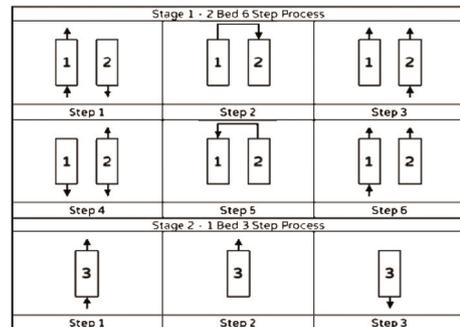
圖 6 VPSA 一階段三塔九步驟操作程序示意圖



資料來源：本所自行以 excel 製圖

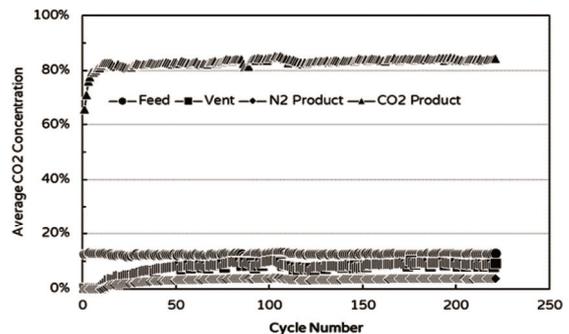
圖 7 VPSA 一階段各 cycle 二氧化碳平均濃度

二階段分離二氧化碳程序示意如圖 8，第一階段雙塔六步驟二氧化碳分離試驗之進料二氧化碳濃度為 12.61 ± 0.27%，平均分離後濃度為 83.41 ± 0.94%，而最後 10 個 cycle 的二氧化碳分離後平均濃度為 84.02 ± 0.25% (第一階段各 cycle 實驗結果如圖 9)；第二階段單塔三步驟之進料二氧化碳濃度為 82.98 ± 1.30%，平均分離後濃度為 88.93 ± 1.86%，最後 10 個 cycle 的二氧化碳分離後平均濃度為 88.44 ± 0.90% (第二階段各 cycle 實驗結果如圖 10)，可確認此程序於一階段與二階段皆可穩定分離二氧化碳。



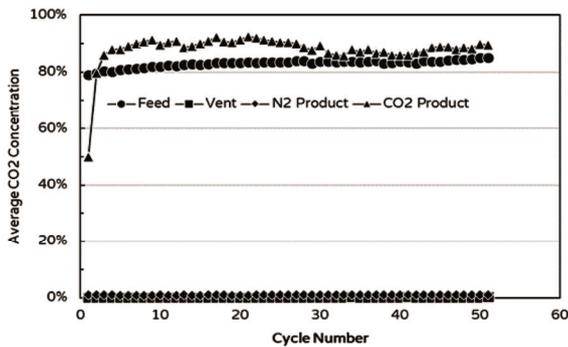
資料來源：本所自行以 ppt 製圖

圖 8 VPSA 二階段雙塔六步驟與單塔三步驟操作程序示意圖



資料來源：本所自行以 excel 製圖

圖 9 VPSA 二階段程序之第一階段各 cycle 二氧化碳平均濃度

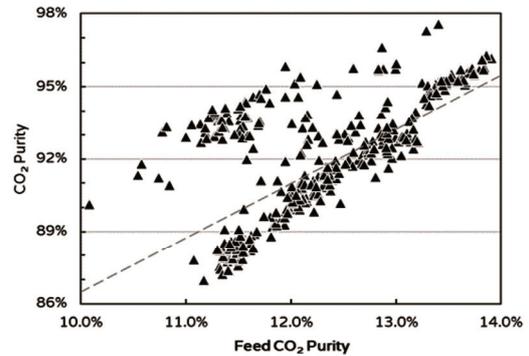


資料來源：本所自行以 excel 製圖

圖 10 VPSA 二階段程序之第二階段各 cycle 二氧化碳平均濃度

VPSA 程序皆會使用經除酸除水之煙氣，一階段二氧化碳分離程序，在本研究中進料二氧化碳平均濃度為 $12.19 \pm 0.98\%$ ，最終二氧化碳分離後濃度可達 $90.74 \pm 1.25\%$ ；而二階段二氧化碳分離程序之進料二氧化碳平均濃度為 $12.61 \pm 0.27\%$ ，最終二氧化碳分離後濃度約為 $88.44 \pm 0.90\%$ ，但回收率較一階段高出 $52.89 \pm 3.72\%$ ，由此研究已可證實此一階段與二階段皆可長時間穩定連續分離煙道氣中二氧化碳，且將有不同之程序定位。

而在能耗分析上，約有 65~78% 之總程序能耗都是集中在雙塔無熱式除水吸附乾燥機上，一階段以及二階段 VPSA 程序所需能耗分別約為 1.72 ± 0.10 、 2.53 ± 0.12 GJ/ton CO₂ (如圖 11)，因二階段之程序控制設備等較一階段還要多，故會造成其程序之能耗上升，但其增加 0.81 ± 0.15 GJ/ton CO₂ 之能耗，但卻可大幅提升 $52.89 \pm 3.72\%$ 之回收率，故一階段與二階段之操作策略皆可視現場之需要而選擇使用高



資料來源：本所自行以 excel 製圖

圖 11 二氧化碳分離後濃度對二氧化碳進料濃度關係圖

回收率或是高純度之操作策略，以提升於製程現場應用之彈性。

(三) 未來展望：

由此分析可得知分離後二氧化碳產品濃度受進料二氧化碳濃度影響甚大，進料端有 1~2% 的變化時，可影響產品濃度 5.35~6.56%，故未來在進行二階段程序設計時，可朝向第一階以高回收率為設計導向，而第二階採以高濃度為設計導向，以達到二氧化碳捕集效能極大化之目標。

由於程序大部分能耗都集中在除水部分，故後續能耗改良可朝向降低除水之方向前進，而試驗方面可朝向吸放熱整合方向進行規畫，導入利用吸附時所放的熱以及脫附時所吸的熱，進行類熱整合試驗，以及結合人因工程的概念，提升吸附劑換料之便利性與安全性，減少試驗之相關危害因子，並可視程序發展之成熟度，進行評估後續放大規模試驗之可行性。

新技術新設備介紹

一、利用 LINE 平台推播電壓驟降即時資訊

(電力研究室：柯喬元、廖清榮)

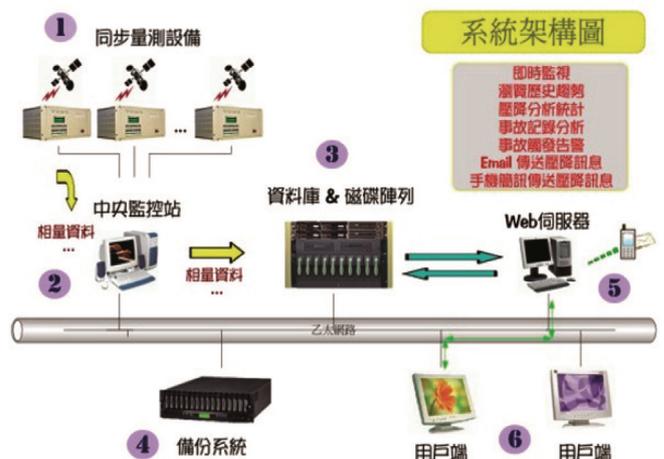
(一) 緣起：

本所長期於全國各個重要電廠及變電所建置電力品質監視系統，目前已有 104 站。此系統主要功能包含廣域量測應用及電壓驟降偵測。

廣域量測之應用如下：即時電力潮流監測、事故回放、頻率變化預測、發電機組參數測試。電壓驟降偵測主要聚焦各科學園區及重要產業園區轄區變電所，因半導體產業對於電壓驟降非常敏感，調度中心需即時掌握壓降資訊以便與用戶說明。此外，本公司每月需統計各科學園區電壓驟降資料，作為每季高科技園區電力品質小組檢討依據，精進整體供電可靠度。

(二) 電壓驟降監測系統架構：

為完成特定區域之電壓驟降監測，首先需在變電所安裝同步量測設備，監測各匯流排電壓。當達成觸發條件(壓降率 > 10%)，同步量測設備會透過公司內網傳送壓降事件波形檔案至中央監控站，經由資料庫及 Web 伺服器處理後即時於網頁提供壓降資訊給公司同仁，架構如圖 1。



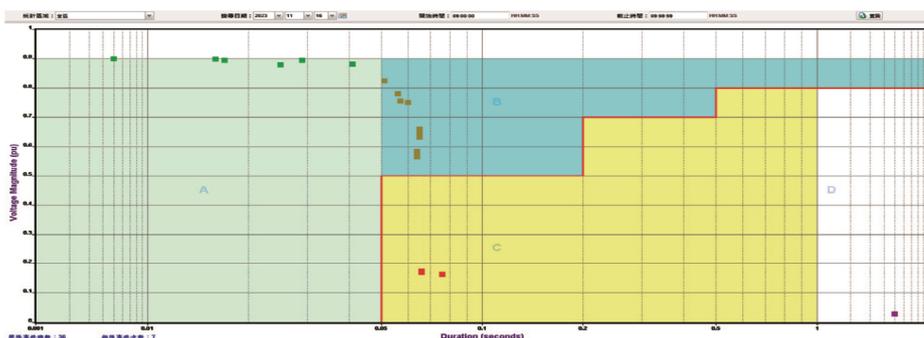
資料來源：監測網頁擷取

圖 1 電壓驟降監測架構

當壓降事件發生，網頁的分析統計功能可即時查詢此事件影響各站之壓降程度，並依 SEMI F47

曲線顯示分布圖，如圖 2。此功能有助調度中心人員釐清壓降影響範圍，並判斷事故點之源頭。選取

分布點，雙擊後可進一步顯示三相波形(約 20 週波)及電壓 RMS 值。



資料來源：監測網頁擷取

圖 2 壓降事件統計分析

(三) LINE 推播系統建置：

除了網頁顯示外，目前亦同步使用手機簡訊傳送相關高層主管及值班主任即時資訊。但傳統手機簡訊受限於只有文字敘述，提供資訊僅有發生時間、地點、壓降率及各相標么值，如要查詢實際波形變化仍需連線到電壓驟降監測網頁。為了使手機可接收更完整壓降資訊，並同時發送更多同仁，本所開發壓降資訊結合 LINE 推播系統功能，只要加入推播群組就收到最新壓降資訊，也有利於同仁即時回報最新處理情況。

首先，本所向資訊處申請虛擬主機，以便連線 LINE 推播主機，並請設備廠商撰寫發送程式。此架構下，唯一使用的通訊埠口為 80，虛擬主機與本所伺服器之間的通訊方式採用網路的 HTTP 通訊協定進行輪詢工作。目前設定每五分鐘輪詢一次，一旦發現電網發生壓降事件，就會啟動分析工作，隨即顯示結果。

壓降發生時，平台首先會推播一則壓降事件的落點地圖，並顯示這次事件中最嚴重的壓降分析說明。圖的尺寸為 2900 × 1400 pixels，在手機上可以持續放大。壓降分析文字的格式為：監測站名，線路名稱，壓降幅度，壓降持續毫秒數(週波數)，ABC 三相電壓的標么值，壓降分類，逾越 SEMI F47 與否。接著推播第二則，發送具事件三相電壓波形之壓降報告圖檔，圖片亦可自行放大。推播至 LINE 群組畫面如圖 3 所示。



資料來源：自行擷圖

圖 3 即時壓降情況推播至 LINE 群組

除了壓降偵測外，當監測點電壓出現異常(如電壓波形畸變)，亦可推播。同仁可即時確認相關設備是否出現異常，對於電網維運有所幫助。目前此平台仍在測試階段，運作順利，預計今年上半年可正式啟用。

二、去碳燃氫技術發展與應用現況

(能源研究室：丁富彬、李泰成、周儷芬、王派毅)

(一) 研究背景：

2050 年淨零排放議題帶動全球性低碳能源轉型潮流，其中，氫能被視為能加速實踐減碳路徑關鍵技術之一，如何整合應用於低碳電力刻不容緩。有鑒於此，本公司根據我國 2022 年 3 月公布的「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」規劃，積極佈局與發展各種減碳電力之途徑，朝向 2050 年電力淨零轉型的目標前進。2023 年 2 月本公司與中央研究院共同簽署「減碳及綠能技術發展應用合作備忘錄 (MoU)」，初期雙方共同合作去碳燃氫產氫技術與微氣渦輪發電技術之整合，進行發電應用之可行性驗證，成功於同年 9 月產製第一度去碳電力。對於未

來氫能應用需求，去碳燃氫技術被視為短中期具發展潛力之氫能供應選項，本文將簡要解析該技術於國際發展與應用現況。

(二) 產氫技術特性比較^{[1][2][3]}：

比較當前成熟商用或具發展潛力之產氫技術，如下表 1 所示。去碳燃氫技術在國際間稱為甲烷裂解技術(Methane Pyrolysis)，是一種以天然氣(其中甲烷占比約 90 mol.%)為原料之產氫技術，在裂解製氫過程中會伴隨固態碳黑(Carbon Black)的生成，稱之為綠松石氫或藍綠氫(Turquoise Hydrogen)。該技術優勢為製氫過程之碳排放為固態型式，有利於後續碳捕集儲存或利用。此外，製氫過程所需投入之理

論反應能量約 75 kJ(產生 2 mole 氫氣)，與蒸汽甲烷重組產氫和水電解產氫相比所需能量最少；蒸汽甲烷重組技術(Steam Methane Reforming, SMR)同以天然氣作為原料，該技術已達商業量產化規模，目前提供全球約 95 %之工業用氫氣產量，惟製氫過程中需搭配碳捕集與封存技術(Carbon Capture and Storage, CCS)降低二氧化碳(CO₂)排放，即可產製短

中期需求用之藍氫(Blue Hydrogen)；水電解產氫技術則以再生能源作為製程電力來源，可產製最潔淨之綠氫(Green Hydrogen)，該技術為國際間公認中長期可實現 2050 年淨零排放目標之主要氫氣來源，惟目前該製氫過程仍面臨能耗需求高及產氫成本高等問題。

表 1 去碳燃氫、蒸汽甲烷重組及水電解等產氫技術之特性比較

	去碳燃氫	蒸汽甲烷重組產氫	水電解產氫
投入原料	天然氣	天然氣	水
製程反應式	CH ₄ →C(s)+2H ₂	CH ₄ +2H ₂ O→CO ₂ +4H ₂	2H ₂ O→2H ₂ +O ₂
理論反應能量	75 kJ (per 2 mole H ₂)	126 kJ (per 2 mole H ₂)	572 kJ (per 2 mole H ₂)
碳排放型式	固態碳黑 C(s)	氣態二氧化碳(CO ₂)	-

資料來源：自行彙整

(三) 國際甲烷裂解技術發展與應用現況^{[4][5][6][7]}：

國際間甲烷裂解技術依據裂解溫度及能量來源不同，大致可分成熱裂解(Thermal Decomposition)、電漿裂解(Plasma Decomposition)與觸媒裂解(Catalytic

Decomposition)等三種型式，國際間多家開發甲烷裂解產氫公司之技術量產與現況，綜整如下表 2 所示，以下將分述說明：

表 2 國際甲烷裂解產氫公司技術現況綜整

公司名稱	技術型式	裂解溫度(°C)	固態碳型式	含氫比例(vol. %)	產氫規模	技術階段
BASF (德商)	熱	1,000~1,400	碳黑	~92	—	小型示範廠，預估 2030 年進入量產
Monolith Materials (美商)	電漿	1,700~2,000	碳黑	~95	>5,000 噸/年	商業化示範
Graforce (德商)	電漿	~2,000	碳黑	~98	>5,000 噸/年	商業化示範
Hazer Group (澳商)	熱+觸媒	~900	石墨	~92	<500 噸/年	小型示範廠

資料來源：自行彙整

1. 熱裂解型式：

現為德商 BASF 公司主推開發技術型式，已有諸多開發驗證計畫執行中，預計 2030 年才會有商用量產規模展示，目前技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)約 3。該技術開發主要目標為氫氣產製，而副產物碳黑則作為商業化延伸應用。其技術原理是採用電極式加熱流體化床反應器至 1,000~1,400 °C，驅動裂解反應以高溫能量將甲烷鍵結打斷，分解產生氫氣與碳黑，所產製氣體之含氫比例可達約 92 vol.%。

2. 電漿裂解型式：

最早在 1990 年代由挪威商 Kvaerner 公司提出利用電漿技術裂解天然氣或高碳氫化合物作為碳黑生產專利之申請。該專利後續透過 3 MW 裂解示範廠技術驗證後，1997 年在加拿大建置一座年產量 20,000 噸碳黑之裂解工廠，至 2003 年因碳黑產製品質不佳等因素而停產退役。

2012 年美商 Monolith Materials 公司以挪威商 Kvaerner 公司之技術為基礎，以產製碳黑為主要目標持續開發電漿裂解技術。一般常見之電漿生成條件，交流電壓約 1~30 kV，頻率可高達約 20 kHz。其裂解原理即是採用具高電壓、磁場與頻率所形成之電漿，提供約 2,000 °C 高溫做為甲烷鍵結斷鍵之

能量源，裂解產生氫氣與碳黑。目前該技術之 TRL 約 8，該公司刻正執行 Olive Creek 商業化示範計畫，2020 年於美國內布拉斯加州(Nebraska)建置 Olive Creek 示範廠啟動第一期驗證計畫，現已完成氫氣年產量 5,000 噸，碳黑年產量 15,000 噸之規模驗證。將持續擴展規模進行第二期驗證，預計 2024 年將完成氫氣年產量 60,000 噸，碳黑年產量 180,000 噸之規模驗證。

另外，德商 Graforce 公司亦為國際間主推電漿裂解技術之另一家開發商。並將此技術廣泛應用於生質甲烷氣、廢水、生質原料、氫氣與塑料廢氣等料源，使其裂解產製成氫氣或各種組成之合成氣與碳黑。以該公司 3 MW 概念工廠規格來說，預計氫氣產製量約為 290kg/hr，固體碳產製量約為 875 kg/hr，其中產製的氫氣純度可達約 98 vol.%。目前已在德國柏林和布蘭登堡建造了 2 座示範案場，並有 3 件投資合作專案於 2023 年完工，其中 1 件專案將於奧地利煉油廠內，進行天然氣脫碳和生產固體碳應用。另 2 件專案則應用於德國的一家酒店和市區公共空間，提供無碳排之電力與熱需求應用。

3. 觸媒裂解型式：

最早在 1960 年代由美商 Universal Oil Products (UOP)公司所提出之製程方法，主要應用於煉油廠

之油品煉製過程，連續式供應氫氣需求。該技術原理是整合熱/觸媒驅動裂解反應，因觸媒(如：鐵、鎳與鈷基等)具輔助反應效果，故反應溫度相較於前述熱裂解反應溫度，可大幅降低至約 900 °C 即能產生氫氣與碳黑(或石墨)，有效降低裂解額外所需提供之能耗。目前該裂解型式為澳洲商 Hazer Group 公司主推之裂解技術，TRL 約為 3，僅在小型示範廠階段。惟該公司於所開發裂解技術相較於前述多家企業，在產製氫氣的同時，是以產製高價值石墨為主要目標。該公司 2019 年在西澳大利亞珀斯建造以廢水處理廠之沼氣為料源之裂解示範廠，預計每年可產製約 100 噸氫氣與 380 噸合成石墨，已於 2023 年 7 月開始試量產運轉，預計營運示範期間為三年。另該公司亦於 2023 年與日本及法國等知名企業簽署合作備忘錄(MoU)，透過該技術引進產製氫氣作為發電、工業與交通等領域應用。

現今碳黑產業主要產製方法為「油爐法」，製作原理方法為採用石油系重質油，如：塔底油、雜酚油做為原料，導入 1,800 °C 反應爐並精準控制反應參數，即可產出具有多元應用的碳黑。根據文獻資料^[8]，碳黑產業市場狀況預估至 2025 年以後，年需求量即可突破 1,500 萬噸，並逐年增加。相較甲烷裂解產氫技術亦可在製程中透過調控不同溫度與時間等製程參數，獲得不同形貌與經濟價值之碳製品，如：碳黑或石墨等。故除氫氣可提供之潔淨能源效益外，伴隨產製之碳製品未來可提供作為工業高產值化工業生產原物料，舉凡如：電池業、鋁業、

鋼鐵業、汽車材料製造業及紡織業等，亦可作為建築物之建材強化添加物等用途，是未來具潛力的碳經濟產業鏈。

(四) 參考文獻：

- [1] “State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas,” *ChemBioEng Reviews*, vol. 7, no. 5, pp.150-158, 2020.
- [2] “Methane Cracking for Hydrogen Production: A Review of Catalytic and Molten Media Pyrolysis,” *Energies*, 2021, 14, 3107.
- [3] “Methane Pyrolysis with the Use of Plasma: Review of Plasma Reactors and Process Products,” *Energies*, 2023, 16, 6441.
- [4] 德商 BASF 公司“Clean hydrogen: Methane pyrolysis”官網資訊。
<https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemicalproduct.html#text-1002215085>
- [5] 美商 Monolith Materials 公司官網資訊。
<https://monolith-corp.com/>
- [6] 德商 Graforce 公司官網資訊。
<https://www.graforce.com/en/>
- [7] 澳洲商 Hazer Group 公司官網資訊。
<https://hazergroup.com.au/>
- [8] 111 年國際中橡公司法說會資料。Notch data book 2022, CSRC Estimates.

三、變壓器絕緣紙老化診斷指標甲醇參考值訂定

(油煤試驗組：李立棋、李安平、童耀宗)

(一) 研究背景：

本公司應用變壓器油中「糠醛」作為絕緣紙老化指標已有多年，國際相關研究報告顯示，以糠醛作為傳統絕緣紙(適合溫升限制 55°C 變壓器)老化指標較為可靠，但對於熱升級絕緣紙(TUK，適合溫升限制 65°C 變壓器)，則受材料添加之化學穩定劑影響測試效果，而新指標「甲醇」(或“MeOH”)則對不同絕緣紙種類均有良好且一致之檢測結果，美國材料和試驗協會已於 2020 年公告正式檢測標準^[1]，國際大型電力系統理事會(CIGRE)亦已將甲醇診斷絕緣紙老化公式納入變壓器老化診斷技術手冊^[2]。本公司新購之電力變壓器均使用熱升級絕緣紙，為提升診斷技術，綜合研究所遂加入日本電力資料交換組織(IERE)「變壓器絕緣紙老化新指標(甲醇)研究」國際合作研究與開發團隊，持續開發、驗證並引入油中甲醇測試與診斷技術。

(二) 研究內容：

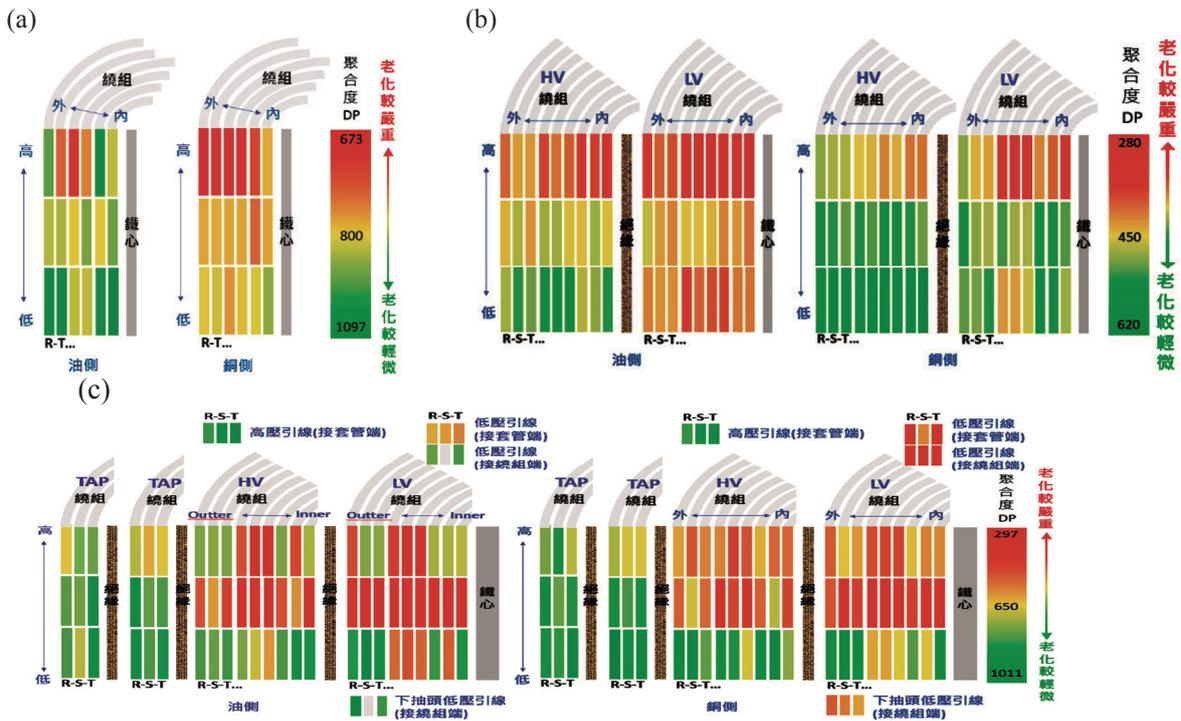
絕緣油中二氧化碳、糠醛、甲醇濃度為評估絕緣紙的老化程度的間接指標，其與絕緣紙老化程度之間的關聯性乃為模擬試驗建立的數學模型。惟在

真實變壓器的老化過程中，不同部位之絕緣紙的老化程度，會因曝露於不同的運轉條件下而有顯著的差異，因此，老化指標能否正確的反映實際絕緣紙的老化程度，需透過拆解變壓器取得絕緣紙來驗證。

台電綜合研究所為達上述目的，拆解了數台維修或退役的變壓器，並依規劃於不同部位取得絕緣紙樣品進行聚合度試驗。經數據分析，可對台電公司變壓器歸納出「高線溫主導型熱老化」、「酸催化水解主導型老化」及「局部區域油溫過高主導型熱老化」三種典型老化態樣。「高線溫主導型熱老化」設備運轉時有較一般變壓器更高的油溫與線溫，絕緣紙老化以變壓器上部導線「靠銅側」絕緣紙最為嚴重(圖 1(a))，在老化發展期間通常會先出現油中二氧化碳過高情形，然後開始發生糠醛與甲醇的成長，在老化後期將出現水分管理問題。「酸催化水解主導型老化」設備絕緣油通常有水分、酸價與界面張力不良問題，同時有高糠醛與高甲醇情形，絕緣紙老化狀況以變壓器「低壓側」上部導線「靠油側」絕緣紙最為嚴重(圖 1(b))。「局部區域油溫過高主導

型熱老化」設備則以變壓器繞組「中段高度」絕緣紙老化狀況最嚴重，反映出其無法高效率的將絕緣

油經油道導引至繞組上部進行散熱，引起繞組內部蓄熱於中段部位(圖 1(c))。



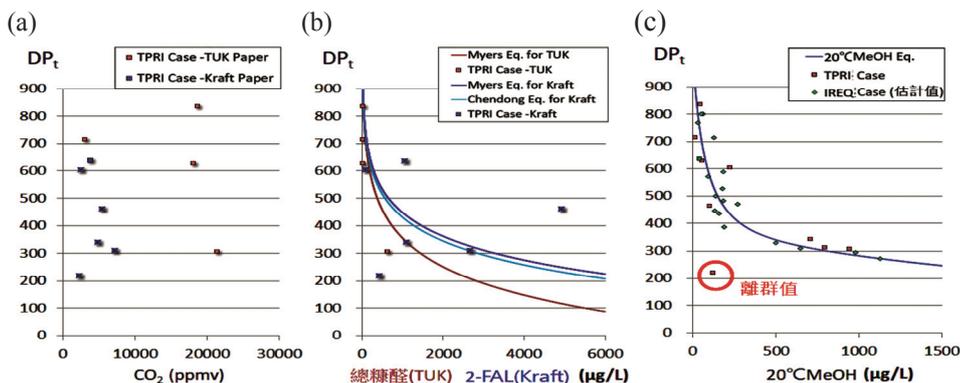
資料來源：綜研所自行繪製

圖 1 拆解變壓器驗證聚合度分佈

(a)高線溫主導型熱老化案例；(b)酸催化水解主導型老化；(c)局部區域油溫過高主導型熱老化

將10台變壓器拆解後絕緣紙老化程度測試結果的平均值與絕緣油指標濃度進行繪圖，並與國際通用數學模型作比對，可發現二氧化碳雖為老化指標，但其濃度大小無法直接反映出絕緣紙的老化程度(圖2(a))；糠醛濃度與絕緣紙聚合度間，雖國際上已建立分別對應於Kraft紙與TUK紙之數學模型，但在拆解驗證實務中，卻發現在許多案例的使用上，可能造成老化程度的嚴重低估或高估(圖2(b))；

甲醇計算絕緣紙聚合度之公式，不論在加拿大魁北克電力公司或台電公司的拆解變壓器驗證活動中，均顯示其評估絕緣紙老化程度的效果良好(圖2(c))。三種運用於台電公司的絕緣紙老化指標中，甲醇指標的準確度最佳，且與絕緣紙種類無關，使用時可免除需正確辨識絕緣紙種類之困擾。目前台電綜合研究所已引入甲醇作為本公司變壓器之常態試驗項目，並訂定相關診斷參考值如表1。



資料來源：綜研所自行繪製(Myers, Chendong Eq, IREQ Case^{[3][4][5]})

圖 2 拆解變壓器數學模型驗證

表 1 絕緣紙狀態評估參考指標濃度表

絕緣紙狀態	絕緣紙平均聚合度 (DP Value)	糠醛濃度(µg/L 油)		20°C 甲醇濃度 (µg/kg 油)
		一般絕緣紙 2-糠醛	熱升級絕緣紙 總糠醛	
正常	≥600	≤300	≤200	≤100
須注意	<600, ≥350	>300, ≤2000	>200, ≤1000	>100, ≤400
異常	<350	>2000	>1000	>400

資料來源：[6]

(三) 參考資料：

- [1] "Standard Test Method for Determination of Methanol and Ethanol in Electrical Insulating Liquids of Petroleum Origin by Headspace (HS)-Gas Chromatography (GC) Using Mass Spectrometry (MS) or Flame Ionization Detection (FID)1," ASTM D8086, 2020.
- [2] "Field Experience with Transformer Solid Insulation Ageing Markers," CIGRE Technical

Brochure 779, 2019.

- [3] R. D. Stebbins, D. S. Myers, and A. B. Shkolnik, "Furanic Compounds in Dielectric Liquid Samples: Review and Update of Diagnostic Interpretation and Estimation of Insulation Ageing," *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, Japan, 2003.
- [4] C. D. Xue, "Monitoring Paper Insulation Aging by Measuring Furfural Contents in Oil," in *7th*

International Symposium on High Voltage Engineering, 1991, pp.139–142.

- [5] Jocelyn Jalbert, Claude Rajotte, Marie-Claude Lessard and Mariela Rodriguez-Celis, "Methanol in Oil Interpretation Model Based on Transformer Post-Mortem Paper Analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 2, 2018.
- [6] 台電綜合研究所, 「電力變壓器電抗器故障:糠醛與甲醇診斷指標」, 版次 2, 民國 112 年 03 月。

研發與試驗活動

台電與歐洲商會共同發表「電力淨零路徑報告書」

(研究發展企劃室:張翔琳)

近年來,全球對於氣候變遷的關注日益增加,各國亦都意識到減少碳排放對於緩解極端氣候事件的重要性。台灣電力公司綜合研究所與歐洲商會(ECCT)低碳倡議行動(LCI)長期交流合作,透過台電相關單位與歐洲商會部分成員,如駐台辦事處及其企業會員共 20 個機構以工作坊的形式集思廣益,集結自台、法、德、荷、日、美等超過 10 國的經驗,於 110~111 年間舉辦 10 場交流研討會,討論包含碳中和策略、氫能、風險管理、電動車、太陽能板及風機葉片回收、儲能等綠能相關議題,借鏡歐洲企業在國外的經驗及案例,不僅了解國際上最新的技術和政策發展,也展示雙方探討淨零轉型之方向與提供電力淨零路徑之努力成果,並依政策脈絡、供給面、電網面與需求面提出能源發展政策觀點與因應解方。112 年 12 月 5 日雙方將共同出版的「電力淨零路徑報告書」,在台北君悅酒店盛大舉行報告書發布會,由台電公司總經理王耀庭和歐洲商會理事長尹容共同將報告書呈遞給經濟部代表次長曾文生。現場除了台電與歐洲商會的代表外,更有來自法國在台協會、芬蘭辦事處等 50 位歐洲企業代表參與,見證了這一重要時刻。



歐洲在臺商務協會理事長尹容(右)與台電總經理王耀庭(左)共同將「電力淨零路徑報告書」呈遞給經濟部次長曾文生(中)。

綜合研究所與 LCI 規劃交流議題涵蓋碳中和策略、氫能發展與混燒技術,以及電動車等面向,除了展示雙方在各項領域的初步研討成果,也透過邀集如台灣德國萊因、施耐德電機、沃旭能源等眾多業界代表提出創新解決方案。例如在 110 年 4 月 22 日首場「2050 碳中和策略方向及路徑規劃」研討會中,討論了未來在減碳技術、再生能源、氫能、氨能、碳捕集與封存、能源效率、商業模式等方面的

發展策略,並探討擴大國際合作交流以加速達成減碳目標的重要性;110 年 7 月 6 日「氫能技術應用」研討會則深入探討了氫能於國際上的實務應用,以及氫氣混燒技術的實例與技術可行性;111 年 11 月 1 日「風險管理」交流會針對強化電網的可靠度與韌性、穩定供電等風險管理議題進行交流對話。此外,研討會主題還包括儲能、風險管理、電力系統營運挑戰與解方、電力公司因應電動車發展之挑戰及解決方案、風機葉片及太陽能板回收實踐與解決方案等議題,對於臺灣能源轉型實務具有重要意義。



綜合研究所所長鍾年勉(左)和歐洲在臺商務協會理事長尹容(右)在發表會當天相互交流。

面對未來淨零碳排放挑戰,台電公司綜合研究所與 ECCT LCI 各國會員將針對電網安全、輸配電技術、智慧化資產管理等電力淨零議題持續探討交流,引進國外最佳減碳途徑以落實 2050 淨零排放能源轉型目標。



台電與歐洲商會共同發表「電力淨零路徑報告書」,經濟部次長曾文生(前排左 4)、歐洲商會理事長尹容(前排右 4)與台電總經理王耀庭(前排左 3)等各界貴賓齊聚交流互動。