

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

114 年第 4 季 (114.10 No.138)

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

- 一、改善廢水回收率可行性研究1
- 二、基於 OPAL-RT 平台之 Inverter 模擬2
- 三、提升人手孔蓋抗滑性能之研究3

新技術新設備介紹

- 水溶性氟化物檢測於 SF₆ 設備早期預知故障診斷之應用5

研發與試驗活動

- 一、2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop.....7
- 二、2025 TPC-EPRI 數位轉型論壇暨 LCRI 整合會議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

一、改善廢水回收率可行性研究

(化學與環境研究室：傅弼豐、曹志明、吳俊賢、張茱琪)

(一) 研究背景、目的、方法：

大潭火力發電廠環評承諾整廠廢水回收率須大於 70%，主要回收來源為製程中之鍋爐沖放廢水。由於近年環保意識抬頭，天然氣被視為潔淨能源因而成為基載電廠，導致鍋爐沖放水逐年減少，以致要達成環評承諾之廢水回收率愈來愈困難。故研究提升綜合廢水回收的可行性，以提高整體廢水回收率，進而符合環評承諾要求。

首先實驗室杯瓶試驗將配合現場既有藥劑種類進行測試，未來在實場設計時，僅須調整加藥參數便可直接沿用現場既有化學混凝單元，免於額外增

設單元的成本。初步規劃直接由原廢水進行回收試驗，使用化學混凝處理程序作為逆滲透單元的前處理技術，利用混凝劑減少水中污染物，確保水質符合薄膜入水要求。

(二) 成果及其應用：

傳統化學加藥程序中，為確保後段污泥能順利產生沉降，一般會在後段沉澱池前加入助凝劑，使先前產生的膠羽能更進一步擴大連結，產生結晶或形成沉澱物後，再進入沉澱槽內進行固液分離，使廢水中的污泥與水樣進分開，藉此完成水中污染物去除的目標。



資料來源：本研究拍攝

圖 1 模廠實景



資料來源：本研究拍攝

圖 2 取水位置

考量投資成本與效益，由於逆滲透處理後會產生濃縮水排放，為減少後段額外操作成本，因此薄膜單元的操作目標便是達成最大純水回收率的情況下，排放的濃縮水也能符合放流水法規標準，避免最後須針對濃縮水的部分增設處理單元，額外增加系統複雜度。當濃縮水能直接符合放流水法規標準時，對回收系統而言，可減少整體建置成本與操作

成本，也可更進一步增加系統穩定性。

本計畫將利用既有試驗設備，放置在現場廢水處理程序旁邊，直接引入綜合廢水進行實際測試與驗證。先從實驗室杯瓶試驗找出化學混凝藥劑參數，確認達成硬度去除最大化的加藥參數，再利用模廠設備進行驗證，以找出最符合實廠的條件，作為未來實廠設計的參考指標(圖 1、2)。

二、基於 OPAL-RT 平台之 Inverter 模擬

(電力研究室：程泓瑋、江文莊、謝國聖、廖清榮)

(一) 研究背景：

隨著再生能源滲透率的增加，未來的電網將會有越來越多基於變流器的資源 (Inverter-based Resources, IBRs)，變流器控制方法包含跟網型變流器 (Grid-following Inverter, GFLI) 和構網型變流器 (Grid-forming Inverter, GFMI)。藉由功率級硬體閉迴路即時模擬 (Power Hardware-in-the-loop, PHIL) 可以將實際的 GFMI 與 GFLI 與匯入主機的電網模型進行連接，並驗證 GFMI 與 GFLI 對於電網的動態特性。本研究透過 OPAL-RT 即時模擬測試平台並搭配 HYPERSIM 模擬軟體來進行模擬。所模擬的電網包含一部傳統同步機、一部虛擬同步發電機 (Virtual Synchronous Generator, VSG)、一部跟網型變流器、市電與負載。藉由上述的電網架構來探討傳統同步機、虛擬同步發電機與跟網型變流器的特性。

(二) 研究內容：

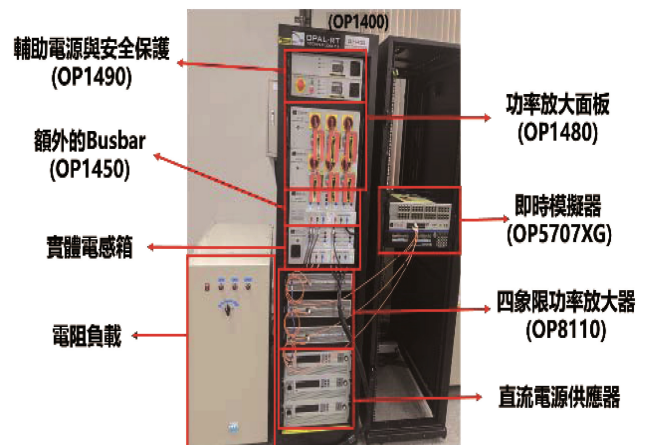
隨著再生能源在輸配電系統中的滲透率不斷地提升，變流器 (Inverter) 在電網的比例也逐年增加，其中以太陽能發電的占比最高，而目前太陽能發電之變流器大多採用跟網型變流器 (GFLI)^[1]，此變流器的運作必須依賴外部電網電壓與頻率運作，並進行功率注入，其行為相當於交流電流源，為目前最為廣泛應用於太陽能與風力發電等再生能源系統的變流器類型，在穩定的強電網環境下，GFLI 可穩定追蹤電網相位並有效執行併網操作。

當 IBRs 的比例持續增加時，尤其是大量採用 GFLI 並網的情況下，系統的整體慣量與短路容量 (Short Circuit Ratio, SCR) 會大幅下降，導致電力系統在面對干擾時的穩定性與回復能力變差。這促使國際間開始積極發展構網型變流器 (GFMI) 技術^[2]，以強化系統穩定性與主動控制能力。因此，隨著再生能源的快速發展與 IBRs 併網比例的持續上升，GFMI 技術的應用勢必日益重要，未來在智慧電網、微電網與大型電網中將扮演關鍵角色。

基於上述，為更瞭解變流器在電網中的特性，本研究建構一簡易的微電網模型，其包含一台傳統同步機、一台虛擬同步發電機、一台跟網型變流器、

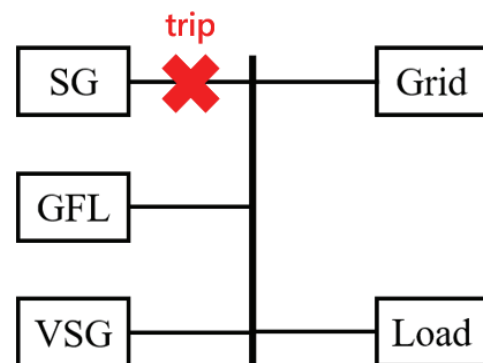
市電與負載。並使用 OPAL-RT 即時模擬測試平台搭配 HYPERSIM 模擬軟體進行 PHIL 模擬實驗，建立簡易電網模型內包含同步發電機 (Synchronous Generator, SG)、GFLI 及 GFMI，本研究的 GFMI 所使用的控制方式為虛擬同步機控制。以驗證同步發電機、GFLI 及 VSG 於簡易模型的穩定性與可行性。

圖 1 為 OPAL-RT 測試平台。圖 2 為本研究使用的微電網架構圖，模擬 SG 跳脫的實驗。圖 3 為模擬 SG、GFL 與 VSG 併聯供電之 SG 跳脫情境，此情境的負載為 4MW，SG 在 1 秒時進行跳脫。從圖 3 可以看到 VSG 快速反應以填補 SG 跳脫之發電量，以保持系統穩定供電。



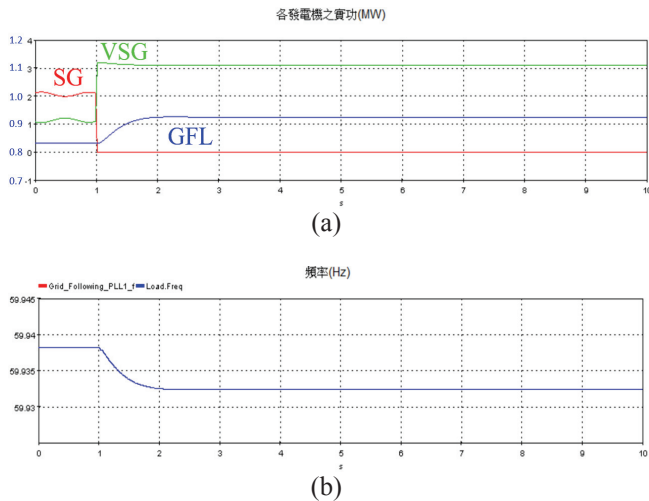
資料來源：本研究繪製

圖 1 OPAL-RT 之測試平台



資料來源：本研究繪製

圖 2 本研究所使用的微電網架構圖



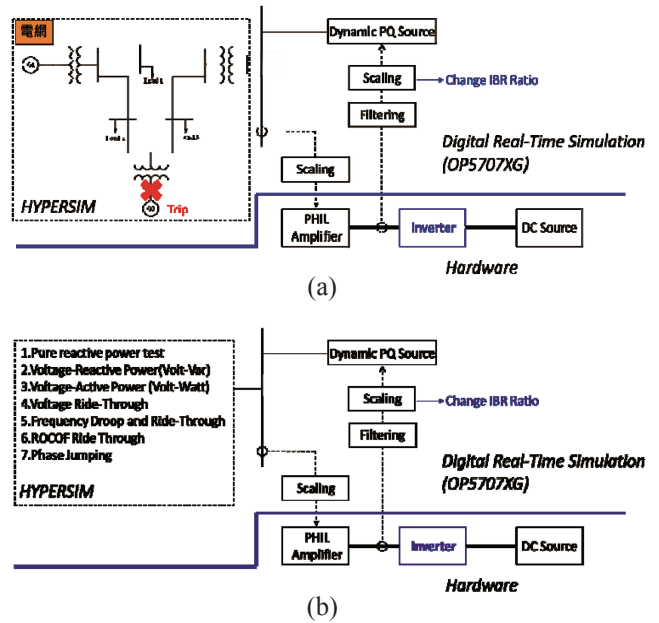
資料來源：本研究繪製

圖 3 SG、GFL 與 VSG 併聯供電之 SG 跳脫模擬：

(a)各發電單元之輸出實功；(b)系統頻率

(三) 結論與未來展望：

本研究為基於 OPAL-RT 硬體閉迴路即時模擬平台的 Inverter 模型建構與驗證，使用 HYPERSIM 模擬軟體先建立微電網模型，並與 OPAL-RT 設備和實體設備進行連接，可於 OPAL-RT 設備中加入實體負載、PV Inverter、儲能設備等等。未來可建構完整的區域電網模型，並於實體電路中加入實體設備，來研究 PV Inverter、儲能案場併網在某一區域電網中的穩定性及可行性，如圖 4(a)所示。另外，此平台亦可以與實體之 Grid Forming Inverter 連接，並基於國際上 Grid Forming Inverter 之標準(例如：英國的 GC0137、ERCOT 和 NERC 所建議的測試方式等)來建構 Grid Forming Inverter 之測試流程，如圖 4(b)所示。



資料來源：本研究繪製

圖 4 基於 OPAL-RT 之 Inverter 功率閉迴路測試

(四) 參考文獻：

- [1] Q. Peng, Q. Jiang, Y. Yang, T. Liu, H. Wang, and F. Blaabjerg, "On the stability of power electronics-dominated systems: challenges and potential solutions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019.
- [2] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.

三、提升人手孔蓋抗滑性能之研究

(能源研究室：羅濟灝、鐘震洲、劉大銘、黃泰源、吳憲政、段翔仁)

(一) 研究背景：

近來氣候極端、暴雨頻繁，人手孔蓋經過長時間使用，以及遭受雨天及曝曬等天氣影響，造成人手孔蓋表面磨耗與侵蝕，增加道路安全之風險。立法院修訂《公路法》第 72 條，增訂人手孔蓋抗滑值於潮濕環境下不得低於英式擺錘抗滑試驗實測值 50 BPN 之規定，以降低機車行經時發生打滑自摔事故發生。

人手孔蓋抗滑能力主要取決於孔蓋表面與輪胎間的摩擦力，這與孔蓋表面的宏觀與微觀紋理密切相關。宏觀紋理有助於排水，減少濕滑風險；微觀紋理則提供直接的摩擦力。此外，鋪面材料的組成、顆粒形狀與大小，以及施工工藝等因素亦會影響抗滑性能。人手孔蓋抗滑特性的研究涉及鋪面材料、

表面紋理、環境因素等多方面內容，透過多種檢測技術的應用，可以評估人手孔蓋的抗滑性能，為道路設計、施工和維護提供科學依據，從而提升行車安全性。

現今公司安裝於道路上之人手孔蓋高達兩百萬只以上，使對於人手孔蓋的安全管理困難，為避免發生因人手孔蓋而造成道路事故，進而影響公司風險。本研究探討不破壞孔蓋表面設計，可提高表面抗滑能力及耐磨耗性，避免孔蓋大量更換造成預算浪費、衍生訴訟賠償及維護人員負擔，提高更安全的用路環境及服務品質。

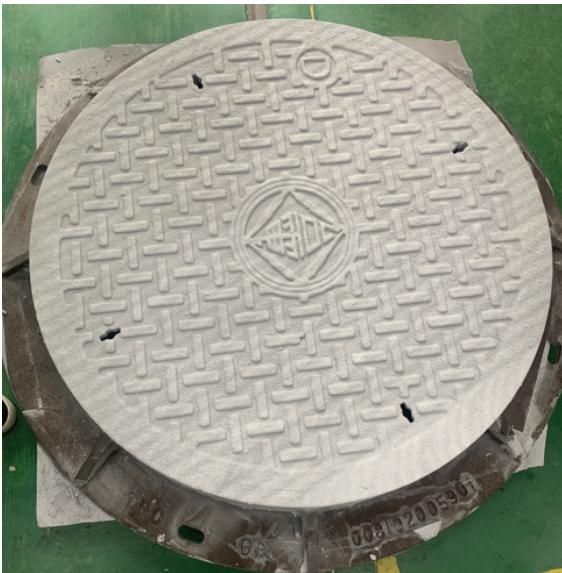
(二) 研究內容：

本研究針對公司配電級人手孔蓋進行材料試驗，包含金相分析、材料成分分析、硬度分析、拉

伸試驗、衝擊試驗、U 型彎曲試驗、塗層厚度觀察等後續分析工作，以評估配電級人手孔蓋與抗滑塗層材料特性、材料強度，以及表面粗糙度。

本所開發以電弧噴鋅方式於人手孔蓋上披覆複合材料之技術，採用鋁-氧化鋁(Al_2O_3)複合材料作為鋅材，通過噴槍送鋅線材兩端接觸產生短路電弧，短路電弧產生高熱將鋅材加熱至熔融狀態，配合高壓空氣將熔融狀態之鋅材披覆至人手孔蓋上，圖 1 為本所開發抗滑塗層之人手孔蓋。同時本研究揀選預成型熱塑複合材料、陶瓷防滑材料、防滑耐磨隔熱環保材料等三種市面上不同廠牌之抗滑塗層產品，以便與本所開發之抗滑塗層作比較。

依據現行法規定義，人手孔蓋之抗滑值的標準量測方式為取人手孔蓋表面 4 點位置，每點位置量測 4 次，量測 4 次之平均值為人手孔蓋抗滑值。本所於樹林所區附近 8 個佈放點進行新人手孔蓋實地量測，量測點分為快車道、慢車道、十字路口及轉彎處等各 2 處，本所定時進行人手孔蓋抗滑值量測。同時本所於樹林所區附近道路揀選 5 處佈放人手孔蓋位置進行司人手孔蓋抗滑塗層之抗滑值量測，其中 4 處人手孔蓋表面分別覆有本所開發之抗滑塗層與其他三種市售抗滑塗層，另 1 處則無披覆塗層之配電級人手孔蓋作為對照組。



資料來源：本研究自行拍攝

圖 1 本所開發抗滑塗層之人手孔蓋

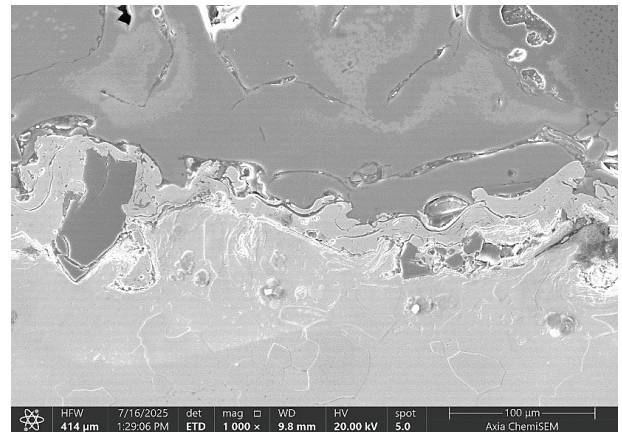
(三) 研究成果：

本所開發抗滑塗層施作前會在試片進行噴砂作業，以增加表面粗糙度，提升抗滑塗層與公司配電級人手孔蓋材料鍵結性，讓整體塗層較為均質且具有良好附著性，且氧化鋁(Al_2O_3)本身材料較硬且脆，散布於鋁基質地之中，具有良好耐磨性及抗破壞的特性，圖 2 為本所開發抗滑塗層之顯微組織照

片。同時塗層內部具有散布的孔洞，這些孔洞幫助塗層產生多孔性結構，可以避免水分殘留，以抑制人手孔蓋因積水造成濕滑的狀況，圖 3 為本所開發抗滑塗層組織結構照片。

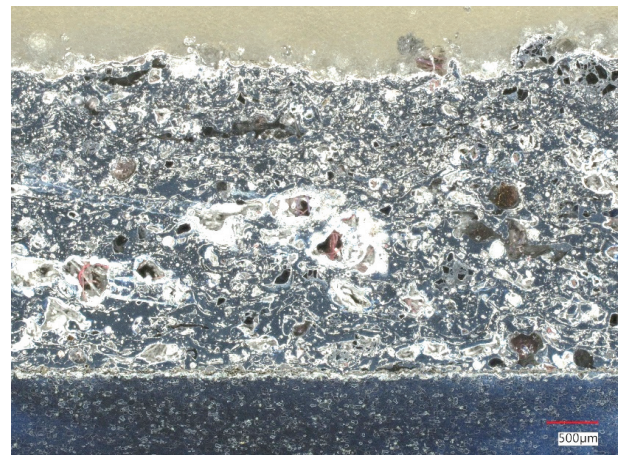
公司配電級人手孔蓋道路量測結果如圖 4 所示，結果顯示各個人手孔蓋經道路行駛 24 天後，各量測點之人手孔蓋抗滑值皆有明顯下降的趨勢，本所研判為新品人手孔蓋表面具有鐵鏽氧化層，可增加其表面粗糙度，使其抗滑值較高，而經道路行駛後，原本表面之鐵鏽氧化層遭磨除，以致人手孔蓋抗滑值有較大幅度下滑；同時在車輛行駛剎車較頻繁的路段(十字路口、轉彎處等)，人手孔蓋表面遭磨蝕程度較大，以致抗滑值表現較低。

公司配電級人手孔蓋之抗滑塗層道路實地抗滑值量測結果如圖 5 所示，結果顯示經過近一年後抗滑值量測結果，本所開發抗滑塗層之抗滑值優於三種市售抗滑塗層抗滑值。同時經過 873 天後的實地道路使用，本所開發抗滑塗層之人手孔蓋，其抗滑值量測結果 55.4 BPN，符合《公路法》第 72 條規定要求濕環境下實測抗滑值應在 50 BPN 以上。



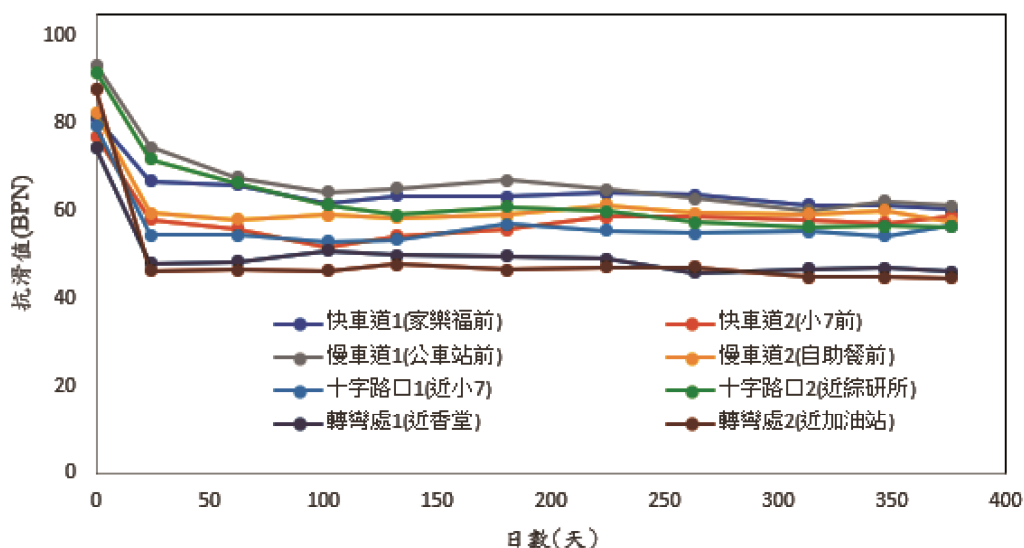
資料來源：本研究自行拍攝

圖 2 本所開發抗滑塗層之顯微組織照片



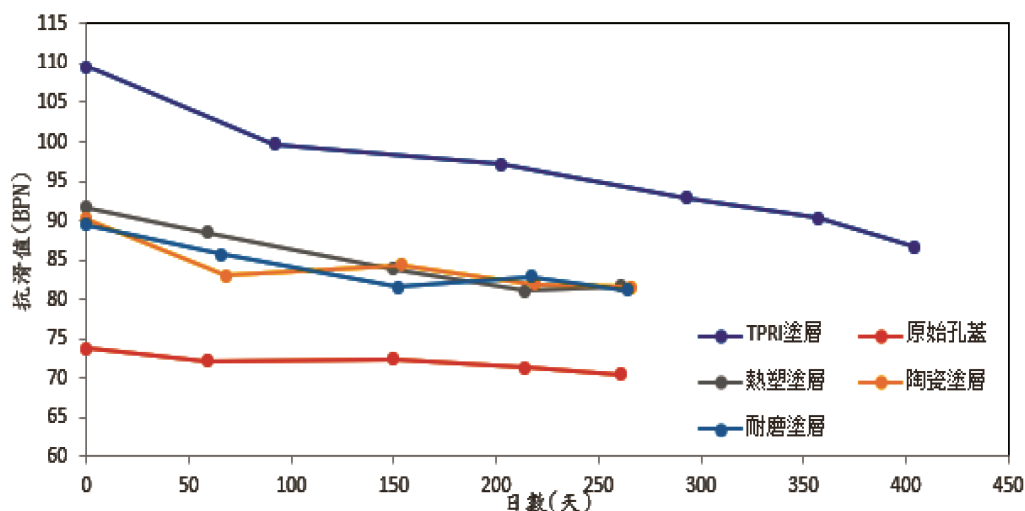
資料來源：本研究自行拍攝

圖 3 本所開發抗滑塗層組織結構照片



資料來源：本研究自行繪製

圖 4 公司配電級人手孔蓋道路量測結果



資料來源：本研究自行繪製

圖 5 公司配電級人手孔蓋之抗滑塗層道路實地抗滑值量測結果

新技術新設備介紹

水溶性氟化物檢測於 SF₆ 設備早期預知故障診斷之應用

(油煤試驗組：鍾彥柔、李立棋、林銘泓)

(一) 前言：

一般而言，SF₆ 氣體於放電或高能量下消弧後可自行回復，但若氣室中存在 H₂O、O₂，可能會分解並產生二氧化硫與多種含氟副產物。因此可藉由分解性氣體的檢測，來監測設備是否出現放電等異常現象。台電公司現行維護規定，已將 SF₆ 中的二氧化硫濃度納入監測，作為 SF₆ 氣體絕緣電力設備狀況的診斷指標。然而除了二氧化硫的監測之外，台電綜合研究所近期開發一套檢測方法，透過分析 SF₆ 中的水溶性氟化物，可在設備尚未出現明顯異常前，更早期地揭示變壓器(GIT)的潛在劣化跡象，

提供更精確的預防性判斷。

(二) 檢測技術開發與應用：

本公司某六氟化硫氣體絕緣之 161 kV #A 變壓器於 113 年例行檢測時，測得 SO₂ 6~11 ppmv，變壓器狀態判定為異常。為慎重確認變壓器(GIT)異常狀況，遂委託國外實驗室進一步檢驗 SF₆ 中水溶性氟化物，並對同型設備水平展開調查，發現除#A 變壓器異常外，#B 與#C 變壓器亦分別達日本電氣協同研究第 54 卷第 5 號定義之水溶性氟化物檢驗異常(>1 ppmw)與須注意(>0.1 ppmw)標準。考量水溶性氟化物檢驗法雖更具有早期預知診斷之效果，惟安

排國外檢測獲得數據結果需耗時約2個月，為強化台電公司電力設備管理即時性，綜研所遂積極開發SF₆氣體中水溶性氟化物檢測技術。

SF₆氣體於放電或過熱情況下會分解產生各種氟化物(如 SOF₄與 SOF₂等)並於遇水時會生成氫氟酸，本法利用鹼液作為吸收劑捕集氣體 SF₆ 中的氟化物及氫氟酸，使其以穩定的氟離子形式保存在水溶液中，再以離子層析儀檢測。相較於銅瓶採集的高活性氣體樣品，易於儲存過程中損耗，導致低濃度分解物檢測不易，本方法所獲得的水溶液樣品更為穩定，檢測時效性較不受限制，在運輸與保存上更為便利。本技術最低可檢驗到 0.01 ppmw 異常氣體，數據再現性佳，並經#B 與#C 變壓器取樣與國

外實驗室進行測值比對，驗證雙方檢驗結果一致，檢測品質獲得良好肯定。

本技術應用於#A、#B 與#C 變壓器發現異常情形後，台電公司積極安排檢修，並發現三台變壓器內部有不等量之黑色粉末、OLTC 接點鍍銀層硫化程度及絕緣板腐蝕狀況(圖 1)，反映出此三台變壓器不同程度之鐵心過熱異常，且其不同的劣化程度與 SO₂ 及氟化物數值濃度呈現正相關，氟化物檢測結果更可於 SO₂ 出現異狀之前作出更早期之異常警示，有利於台電公司提前擬定檢修策略。開蓋驗證結果，再次證明此法引入後，未來設備無需停機或於拆解即可完成檢測，並有效作為設備早期健康診斷及設備劣化程度評估的工具。

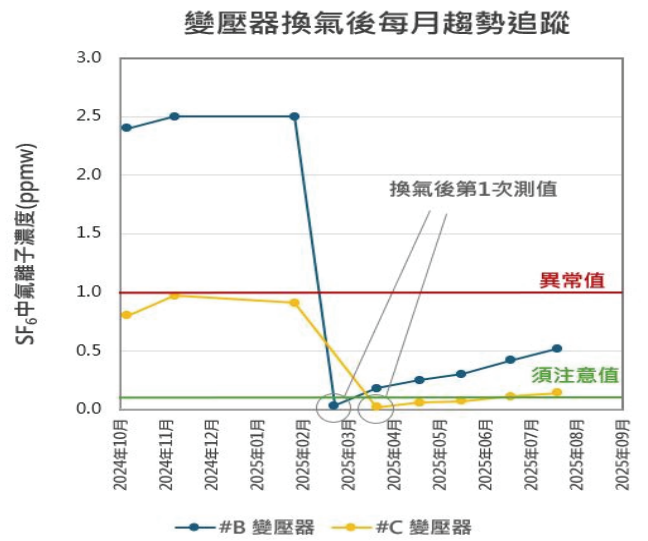


資料來源：本研究自行繪製

圖 1 內檢設備狀況與實驗室數值對照圖

本檢測技術現已完成實驗室自動化進樣流程，提升檢測效率，可有效進行 24 小時批次分析，滿足例行性檢測需求，並對北部地區 22 台變壓器進行全面盤點。本次對變壓器的擴大健康盤點，展現出此方法在未來如大規模推廣至各式 SF₆ 氣體填充電力設備健康監測的可行性。

此外，針對異常變壓器在更換氣體後，綜研所仍持續進行每月一次的追蹤檢測。檢測結果顯示(圖 2)，氣體更換初期氟化物濃度降至極低，但自第一個月起逐漸回升。此趨勢與「油中溶解性氣體分析」觀察到的現象類似，研判部分可能來自絕緣紙中吸附之分解氣體，逐步釋放至新灌入 SF₆ 氣體所致，另一部分應為鐵心過熱點持續引發 SF₆ 氣體分解所生成。此現象顯示，本技術能快速反映出氣體動態變化與設備的潛在劣化趨勢，協助台電公司有效監測設備異常狀況之即時變化。



資料來源：本研究自行繪製

圖 2 #B、#C 變壓器水溶性氟離子趨勢追蹤

(三) 結論與展望：

綜合研究所開發水溶性氟化物檢測技術，已證實能作為 SF₆ 設備健康診斷的重要指標，與現行 SO₂ 檢測法搭配，能更早的揭示及評估設備的異常現象及異常程度。經現場比對與實體開蓋檢查，證明診斷結果之可靠性，本法並具備不停機診斷的優勢，大幅提升維運效率。

勢，大幅提升維運效率。

未來綜研所仍將持續累積相關檢驗經驗，並結合趨勢分析與判斷模型，建構更完整的設備健康監測機制，更有效的幫助公司進行預防性維護，確保電力系統長期穩定與安全。

研發與試驗活動

一、2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop

(研究發展企劃室：張翔琳)

本公司於5月26日至29日首次與國際電力研究交流協會(International Electric Research Exchange, IERE)在台北共同舉辦「2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop」，以「Towards Net-Zero: Strategies and Innovations in the Power Industry」為主題，並由IERE主席Munib AMIN與本公司綜合研究所鍾所長年勉共同揭幕後，由王研究員金墩主持。此次研討會旨在促進國際交流，分享前瞻技術與創新策略，展現台電推動能源轉型與智慧能源管理發展的決心。

研討會匯集全球能源領域專家學者，深入探討低碳技術、電網韌性、智慧能源管理、環境永續與數位轉型等核心議題。演講嘉賓包括日本能源經濟研究所(The Institute of Energy Economics, Japan, IEEJ)高級研究總監 SHIBATA Yoshiaki、台灣大學趙修武教授、中山大學盧展南教授，以及德國 RWE Generation SE 策略發展總監 Ingo BIRNKRAUT 等。會議亦邀請台電綜研所張副所長志聲與研發室陳主任曉薇擔任 Keynote Speech 與 Special Session 講者，其專業分享獲國際高度關注，凸顯台電在相關議題的專業實力。

會議期間，台電同仁展示多項研發成果，包括配電處及綜研所電經室、電力室與資通室發表的技術論文，內容涵蓋電網韌性與智慧能源管理，並獲國際專家肯定。這些研究方向與台電近年推動的強韌電網計畫及數位轉型策略高度契合，為公司未來研發與創新應用提供重要參考，也有助提升電網穩定度與運營效率。

此次研討會強化了台電與國際能源夥伴的合作交流，與會者針對低碳轉型與智慧能源管理應用進行熱烈討論，分享實務經驗與技術洞見，促進雙向知識交流。會議成果將成為公司研發方向的重要依

據，也為未來跨國合作與技術創新奠定基礎。

雖然「2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop」已圓滿落幕，但台電在淨零碳排路徑上的穩健推進不會停歇，將借重台電在能源轉型、數位創新及國際合作上的專業實力，為公司持續推動智慧能源管理與永續發展注入新動能。



「2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop」邀請 IERE 全球會員及能源相關機構代表與會。



綜研所鍾所長於「2025 IERE-TPC Taipei Net-Zero Workshop」開幕致詞。

二、2025 TPC-EPRI 數位轉型論壇暨 LCRI 整合會議

(研究發展企劃室：張翔琳)

本公司於7月30日至31日與美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)共同舉辦「2025 TPC-EPRI 數位轉型論壇暨低碳倡議整合會議」。兩天的會議由王總經理耀庭代表致詞揭開序幕，並由 EPRI 資深副總裁 Daniel Brooks 率領十位高階主管代表來台與會。會中邀請盧展南教授、吳有基教授、謝易錚教授等多位電網韌性產學合作計畫專家，以及本公司蔡副總志孟、吳副總進忠、陳副總銘樹、許副總國隆、孫副總禹華及綜研所鍾所長年勉等共約 100 位長官同仁參加，交流熱烈。

本次論壇聚焦於 AI 資料中心用電挑戰、全球能源轉型趨勢、電網韌性強化，以及數位轉型與人工智慧應用等關鍵議題。與會者分享國際經驗，討論 AI 導入電網營運提升調度效率、極端氣候下分區調度與再生能源應用策略，以及公司未來亦將探索「資料中心彈性負載倡議」(DCFflex)模式，以兼顧電力系統穩定與 AI 資料中心服務能持續提供。

除了技術交流，會議也展現了台電與 EPRI 逾四十年的深厚合作基礎。EPRI 分享的新核能研究、電網模型資料管理(GMDM)及模擬工具等前瞻成果，為公司人才培育與研發方向提供了啟發。會場上，專家學者與台電同仁積極提問，雙邊互動熱烈，展現出產學研三方合作及國內外交流的研究能量。

王總經理致詞時強調，面對極端氣候挑戰，台電必須加速推動分區調度與再生能源緊急應用，以確保供電穩定；EPRI 資深副總裁 Daniel Brooks 則分享了全球能源轉型的最新趨勢，呼應了台電邁向智慧電網與淨零轉型的決心。

此次論壇不僅深化了台電與國際夥伴的合作，也讓參與同仁更加瞭解全球電力技術的最新發展。未來，台電將持續強化 AI 與數位轉型應用，提升電網面對極端氣候與用電挑戰的韌性，並與國際攜手邁向永續願景。



台電攜手 EPRI 與產學研界齊聚論壇，共議 AI 資料中心、電網韌性及能源轉型等關鍵議題。



綜研所鍾所長年勉代表分享台電能源系統轉型策略，邁向淨零永續。



台電與 EPRI 攜手舉辦「2025 TPC-EPRI 數位轉型論壇暨低碳倡議整合會議」，EPRI 資深副總裁 Daniel Brooks(前排左 4)、台電副總經理許國隆(前排左 3)以及台電綜合研究所所長鍾年勉(前排左 2)等與會代表，探討 AI 資料中心設址與全球能源轉型趨勢等關鍵議題。



EPRI 資深副總裁 Daniel Brooks 分享全球能源轉型趨勢等關鍵議題。