



# 工程

- ▶ 本學會與中華民國航空測量及遙感探測學會簽訂合作協議
- ▶ 本學會與中華工程教育學會簽訂合作協議
- ▶ 臺灣農業使用永續能源之現況與展望
- ▶ 鋰空氣電池
- ▶ 永續城市環境策略與風電發展潛能
- ▶ 陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐
- ▶ 有機朗肯循環應用於回收低溫廢熱：一種負碳方式之發電系統







## 永續能源

近年來氣候的極端現象持續的困擾著世界各國，已嚴重影響人民的日常生活與經濟。2021年在聯合國氣候大會COP26研擬之氣候協議中，為達2050淨零碳排的全球共識，要求各國提出低碳政策，藉由碳排放占比、碳中和、減碳機制、列舉優先減碳產業等方式，發展永續能源、提升再生能源發電效能及產品低碳供應鏈產量，冀能減少溫室氣體排放並減緩氣候變遷。本期之「專題報導」邀請國內五個在發展永續能源研究具相當成就的團隊發表文章，內容包含臺灣農業使用永續能源之現況與展望、鋰空氣電池、永續城市環境策略與風電發展潛能、陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐與有機朗肯循環應用於回收低溫廢熱：一種負碳方式之發電系統，涵蓋再生能源發電、儲能技術及其產業應用作深入淺出的報導，提供大家對永續能源發展的參考。

## 活動報導

- 02 本學會與中華民國航空測量及遙感探測學會簽訂合作協議
- 05 本學會與中華工程教育學會簽訂合作協議

## 永續能源

客座主編：蘇程裕 / 國立臺北科技大學機械工程系特聘教授

- 10 臺灣農業使用永續能源之現況與展望 / 蘇忠楨、李汪盛、吳有恒、黃振康
- 23 鋰空氣電池 / 蟻嘉輝、莫誠康、劉如熹
- 37 永續城市環境策略與風電發展潛能 / 阮于軒、楊安石
- 50 陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐 / 蘇進國、宋裕祺、陳儀諺、陳致融、林世豪
- 69 有機朗肯循環應用於回收低溫廢熱：一種負碳方式之發電系統 / 洪祖全、馮永強、席 奐、賴昭宏、林君璋

理事長：施義芳

常務理事：李世光 胡湘麟 許鈺漳 楊偉甫

理事：王宇睿 王錫欽 伍勝園 江秀丹

余信遠 宋裕祺 李順欽 杜俊

林聰利 俞克維 張武訓 莫仁維

陳仲賢 陳哲生 陳國隆 楊正宏

楊宗興 廖學瑞 歐善惠 鄭文隆

鄭光遠 賴建信

常務監事：廖慶榮

監事：邱琳濱 高宗正 陳宗德

秘書長：李元唐

副秘書長：李瑋聆

發行所：中國工程師學會出版委員會

主任委員：黃炳勳

委員：王宇睿 李元唐 吳天寶 林建華

林根勝 孫幸宜 莫仁維 陳哲生

陳榮貴 楊正宏 廖學瑞 蘇程裕

總編輯：張鈺輝

客座主編：蘇程裕

編輯：李宥萱 李綺馨 林秀琴 袁雅玲

梁愛倫 許舜雅 蔣雪芬

聯絡地址：114710 臺北市內湖區陽光街323號

電話：(02) 8797-3567轉8200、8225、8234

傳真：(02) 8797-4585

會址：100026 臺北市仁愛路二段1號3樓

電話：(02) 2392-5128

傳真：(02) 2397-3003

網址：<http://www.cie.org.tw>

郵政劃撥：00059892

戶名：社團法人中國工程師學會

編印：英杰企業有限公司

地址：106411 臺北市大安區復興南路二段293-3號10樓之1

電話：(02) 2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號  
中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄  
入會申請手續請上本會網站查詢



## 本學會與中華民國航空測量及遙感探測學會簽訂合作協議

本學會於民國111年7月12日（星期二）下午2時30分，假本學會會議室與中華民國航空測量及遙感探測學會（以下簡稱：航遙測學會）簽訂合作協議。該學會成為第29個與本學會建立正式合作關係的學會，未來將與本學會合作，共同舉辦聯合年會、研討會及推動各項工程學術研究之活動等，齊力推展我國工程技術之提昇。

簽約儀式由本學會會員委員會王宇睿主任委員主持，施義芳理事長與航遙測學會趙鍵哲理事長分別代表兩會簽署合作協議。



▲ 中工會施義芳理事長致詞

施理事長於致詞時表示很高興可以與航遙測學會能有更多的交流機會，並說明目前航測及遙測技術應用範圍相當廣泛，包括航海、



▲ 航遙測學會趙鍵哲理事長致詞



▲ 中工會會員委員會王宇睿主委致詞



▲ 雙方交換合作協議

農業、氣象、資源、環境、行星科學等。透過這些技術的應用，我們可以更快速、更有效的取得大範圍的數據，即時發現及掌握環境的狀態與變化，做為進一步行動決策的有效參考。

近年來航遙測學會的會務活動不斷擴展及精進，除負責許多國家測繪及資源調查任務，並辦理相關研討會及參與國際組織活動，積極吸取及傳播航測及遙測技術與研究能量。相信今天這個合作協議的簽署，對於強化彼此的會務推動經驗，會有莫大的助益，可擴大我們工程界進一步攜手合作，讓航測及遙測技術有更快速的發展。

「航遙測學會」前身原為民國43年成立之「中國攝影測量學會」，後續於民國67年恢復成立「中華民國航空測量學會」。隨著科技進步、技術持續創新，相關技術的應用範圍不斷擴大，因此於民國69年正式更名為「中華民國航空測量及遙感探測學會」，成

功納入更多相關學術研究的領域。趙理事長致詞時表示在成大求學期間已加入中工會學生分會參與許多校際活動，40年後有機會以學會理事長身份帶領航遙測學會加入中工會大家庭的行列，非常的感動和興奮，相信兩會合作將可進一步開拓航遙測技術，創造更多跨領域合作的機會。

本學會包括楊偉甫常務理事、對外關係委員會王子安主任委員、會員委員會王宇睿主任委員及余信遠副主任委員、李元唐秘書長、李瑋聆副秘書長均在場觀禮見證。航遙測學會出席人員包括王素芬常務理事、王蜀嘉常務理事、蔡富安常務理事、陳良健常務監事、鄭宏遠理事、吳錫賢理事、曾義星監事、邱式鴻秘書長、莊子毅副秘書長及廖玲琇行政助理。

兩會理事長最後期許未來可進一步擴大有關服務領域及層面，為更多的工程人員提供更好的服務，並結合各專門工程學會之專



▲ 出席貴賓合影

業與資源，擴大與各領域專門工程學術團體的往來交流，共同提昇國內的工程專業水準。

## 本學會與中華工程教育學會 簽訂合作協議

本學會與中華工程教育學會IEET於11年8月8日上午10時假張榮發基金會國際會議中心簽訂合作協議並共同發表永續發展宣言。現場約50位來自產官學研界的兩會理、監事及貴賓出席觀禮見證，兩會未來將持續緊密合作，攜手推動我國人才永續工作，促進產業發展與工程科技領域共好。

簽約儀式由本學會李元唐秘書長主持，施義芳理事長與IEET顏家鈺理事長分別致詞。施理事長於致詞時表示，IEET是第30個

與本學會簽署合作協議的專門工程組織，兩會的緊密合作對於我國未來工程科技的研究發展，尤其在專業人才的培育方面，具有相當重要的意義。

施理事長表示中工會與IEET同為國際工程聯盟IEA的成員，IEA是推動工程教育認證與工程師跨境相互認許的重要國際組織。中工會在工程會的指導下，參與IEA亞太工程師協議及國際工程師協議，對已具備國內技師執照或資格相當者，確認其具備國際所認



▲ 中工會施義芳理事長（中右）、李元唐秘書長（右一）與 IEET 顏家鈺理事長（中左）、呂良正秘書長（左一）共同簽署合作協議



▲ 兩會互換會旗



▲ IEET 呂良正秘書長簡報

可的專業能力標準，得授予亞太工程師或國際工程師證照，促進其專業的國際移動力，目前國內共計有213位註冊亞太工程師及121位國際工程師。而有關工程專業能力認定，首要條件有賴IEET制定的工程教育學歷認證，兩會的合作關係可謂相輔相成。

另一方面，因應聯合國17項永續發展目

標SDGs，國際組織協定已陸續修訂相關評估標準，中工會與IEET也特別共同發表永續宣言，未來將合作集結工程領域產官學各界力量，推動人才永續工作。

IEET呂良正秘書長續簡報說明IEET發展現況，以及永續發展宣言的意涵和展望。呂秘書長表示IEET所推動的工程及科技教育認





▲ 與會貴賓合影

證，不同於國內的系所評鑑制度，是依照國際標準所建構的品質保證機制。通過IEET認證的系所畢業生代表具備進入職場且符合國際標準的基本知識、技術及態度，因此受國際協定其他會員認可，於跨國申請專業證照時，學歷資格能被接受。國內目前已有超過80個學校，近600個系所通過IEET認證，是國內工程科技教育與國際接軌的關鍵機制。

另有鑒於工程教育及工程師是達成聯合國SDGs的核心，為加速培育能因應時代需求與創造世界永續的工程科技人才，透過工程領域的創造、創新、設計、技術應用與系統建構來推動永續發展目標。中工會與IEET簽署永續發展宣言，共同推動將永續發展概念積極導入工程教育及實務界，從工程教育奠定堅實基礎，培養相關知識、技術及態度，並延續到產業界，持續精進工程師的專業

能力和永續發展素養。

在出席貴賓觀禮見證下，兩會理事長及秘書長共同代表簽署合作協議及永續發展宣言。兩會相信擴大合作交流可以進一步凝聚工程界的力量，共同提升工程師的工程倫理意識和服務社會的理念，並期許新一代的工程師能以更創新、包容、合作和負責的態度，推動更多工程領域的跨境合作及跨領域交流，以因應未來所面臨的各項嚴峻挑戰，邁向永續。

中工會與IEET也於今年成功爭取2023年IEA大會的主辦權，規劃於6月在臺中舉辦，因此兩會也藉此機會邀請與會貴賓出席盛會。最後，兩會互相致贈會旗後邀請與會貴賓上台共同合影留念，簽署儀式順利圓滿。



# 永續能源 - 專輯序言

國立臺北科技大學機械工程系特聘教授 / 蘇程裕

各位工程界先進大家好，近年來氣候的極端現象持續的困擾著世界各國，已嚴重影響人民的日常生活與經濟。2021年在聯合國氣候大會COP26研擬之氣候協議中，為達2050淨零碳排的全球共識，要求各國提出低碳政策，藉由碳排放占比、碳中和、減碳機制、列舉優先減碳產業等方式，發展永續能源、提升再生能源發電效能及產品低碳供應鏈產量，冀能減少溫室氣體排放並減緩氣候變遷。本期之「專題報導」邀請國內五個在發展永續能源研究具相當成就的團隊發表文章，內容涵蓋再生能源發電與儲能技術及其產業應用作深入淺出的報導，提供大家對永續能源發展的參考。

第一篇為臺灣大學農學院與農委會桃園農改場研究團隊所發表的「臺灣農業使用永續能源之現況與展望」，本文介紹臺灣近年來在農業永續的重要發展，包含畜牧廢棄物之利用與電動農機等，其中在各式農業機具的電動化、智能化與輕便化發展現況均有

報導，對於農業耕種過程具相當的節能與減碳效率。另一方面建立淨零碳排放管理技術、開發碳捕捉、儲存及再利用技術應用於畜牧業，建置負碳生質能源供應中心。永續能源方面，生質（畜牧）能源、太陽光電與風力發電等能源整合成畜牧業電力平台與儲能技術，發展微電網整合系統等也是未來發展重點。

第二篇是臺灣大學化學系劉如熹教授團隊發表之「鋰空氣電池」，可充電鋰空氣電池是取代目前常用之鋰離子電池之候選者之一，因其能量密度約為傳統鋰離子電池之5-10倍，其中運用溫室氣體CO<sub>2</sub>作為陰極氣體的鋰二氧化碳電池亦受到廣泛之研究，兼具儲能與轉換系統減輕CO<sub>2</sub>對環境之不利影響，且具高能量密度。本文將探討鋰氧氣電池與鋰二氧化碳電池反應原理與機制，並介紹鋰空氣電池之組裝以提升其應用範圍與未來市場之發展。



第三篇為臺北科技大學楊安石與阮于軒教授共同發表之「永續城市環境策略與風電發展潛能」，傳統風電發電則因占地面積廣且易改變地貌、惱人噪音大，對環境生態負面影響而發展受限。城市風能因其對土地較無獨占性，可降低對環境與占地的疑慮，能避免長距離電力輸送的耗損，且易與其他潔淨能源搭配發展等優點，已開始受到世界各城市新能源開發的青睞。文中探討現代化城市中，密集城市（Compact city）因高層建築的建築型態與建築物量體群結構間交互影響後之空氣流動過程中形成獨特且複雜之風場分佈。在永續發展的趨勢下，透過高樓層建築群體配置和高層建築構型設計，探討風能利用最大化。

第四篇為臺北科技大學離岸風電工程研究中心宋裕祺教授團隊發表之「陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐」，風力發電發展在近年來政府全力政策推動下，國內目前已有超過400部機組投入發電，已成為重要的再生能源發電主力之一。而風力發電機組與結構之日常安全性能與運轉維護等操作狀況之監視是營運過程相當重要的一環，本文將針對陸域風力機支撐結構，運轉之即時監測研究，藉由感測器系統識別方法，建立風力機支撐結構健康診斷機制，保障本土化風力發電再生能源的永續經營與發展，具相當的產業參考價值。

第五篇由臺北科技大學洪祖全教授團隊與江蘇大學馮永強教授、西安交通大學席奐教授等人共同發表之「有機朗肯循環應用於回收低溫廢熱：一種負碳方式之發電系統」，廢熱回收長期以來一直是永續能源發展的重要議題，然回收的效率與經濟價值的問題常讓有興趣業者卻步，尤其在低溫廢熱回收這部分，缺乏有效的回收方法，所以工業界的低溫廢熱經常都是被丟棄。如以全球產生之廢熱與各種再生能源的總量相較，廢熱總量已超過各種再生能源總量，可見其重要性。本文將介紹有機朗肯循環系統如何應用於回收低溫廢熱及目前的發展現況，內容相當值得各種產業應用之參考。



# 臺灣農業使用永續能源之現況與展望

國立臺灣大學動物科學技術學系教授 / 蘇忠楨  
行政院農業委員會桃園區農業改良場研究員兼課長 / 李汪盛  
行政院農業委員會桃園區農業改良場副研究員 / 吳有恒  
國立臺灣大學生物機電工程學系教授 / 黃振康

關鍵字：永續農業、淨零碳排、生質沼氣、電動農機

## 摘要

農業排碳約佔總量的四分之一，以畜牧業為大宗。有效減少與再利用畜牧業的排碳將對農業永續有重大影響。目前已能夠將畜牧廢棄物經過一系列處理、轉換為生質沼氣、成為有用的能源。此外，電動化除了可以降低農機的空污排放、降低廢氣污染農產品的可能性，亦有低噪音、低震動、低廢熱與容易啟動的優勢。若能結合太陽能與風力對電池充電，能夠更有效地達成節能減碳。電動農機更加速人工智慧與物聯網的導入，達到產銷履歷自動化的農業升級。

## 一、前言

隨氣候變遷議題逐步受到重視，主要國

家已明確訂定減碳里程碑，除了電動汽車、替代能源等議題外，「永續農業」也受到矚目，影響降低碳排量甚鉅。

根據統計，食品生產佔所有溫室氣體排放量的四分之一，佔所有淡水消耗量的七成、所有土地使用量的四成。畜牧業佔所有溫室氣體排放量近兩成，超過所有運輸工具的排放量。聯合國預估世界人口將於2050年達到100億，如何增加產量、做好保存，同時又要降低碳排放量，相關永續農業商機應運而生。

全球建設、農業與採礦用機械電動化市場，將在2030年達到1,490億美元規模，隨著車商在電池與電動車相關技術不斷的突破，農業用電動車輛的效能也不斷在強化，而且



農地擁有兩個電動化優勢。第一就是充電便利性，農地空間相對寬廣，易於安裝充電樁，加上方便取用太陽能與風力發電裝置，不僅能降低成本，也有助電力平衡，達到真正的節能減碳。第二則是性能需求不同。都市中的電動車輛為了交通需求，需要較高的瞬間動力輸出，加上要應對各種日常狀況的變動，電量要求很高，使得電動車必備大量電池組，致使車身重、成本也高。農業用電動車無需超強馬力，里程需求也較低，成本也將較低。雖然農業機械不需要瞬間大馬力，但對於扭力需求卻很大，電動馬達與電池，仍影響了重量與續航力。

電動化的好處包括零排放、低噪音、低廢熱、低震動，且保養成本低。電動化之外，各大廠也都在研發人工智慧與無人機技術，包括自動除草機和農業用 App，瞄準的就是農業人力不足的市場機會。John Deere 的多款農用 App，可以幫助農夫規劃耕種區域，噴藥與施肥時間建議以及除草時間提醒，藉由這些 App 收集到大量的農作資訊，有助於他們開發自動化耕種機械。

臺灣目前也有零星發展，像是電動農用搬運車、電動割草機等，在不久的未來我們將可以期待，柴油廢氣的臭味從農地上逐漸消失。我國農業人力已趨老齡化，在加上目前少子化的影響，低碳排的潮流要求，農機設備應該要朝向省工、省力、電動化的開發方向前進。更導入了許多智慧化功能及服

務，大大提升產品附加價值。經濟部工業局在108年規劃產業升級創新平台計畫，推動農業機械設備智慧化，鼓勵廠商投入高階農機設備與關鍵組件開發。能引用工業的技術協助農業設備提升價值，創造農工合作，達成農工雙贏是一個非常好的合作示範。

## 二、研究現況

各項農業永續的研究正在國內各大學與農委會下轄改場所積極進行中，以下簡述本文作者所屬單位的近期研究成果。

### (一) 畜牧廢棄物之利用

1. 2018年起在宜蘭縣冬山鄉一座商業養豬場，成功建置全國首座智慧化養豬廢水處理系統，結合現場安裝之水質感知器與無線傳輸裝置，將現場水質數據傳輸至臺灣大學動科系研究室進行遠端監測，整體系統由電腦可程式化邏輯控制器（PLC）自動操作，系統簡單且處理效果穩定，並於2020年6月份將成果發表於國際學術期刊論文（Su et al., 2020），規劃在2021年起開始推廣於產業界使用。
2. 因應防範禽流感疫情，應農會委託研發適用於鴨舍飼養模式之廢水處理系統，已經成功應用養豬場實場規模分批式廢水處理技術於養鴨廢水處理系統設計與反應槽試驗，對於養鴨廢水中有機污染物之去除率



圖 1 養豬場水質遠端監看之電腦網頁 (<http://140.112.84.78/>) (左) 與手機 App (右) 外觀

達高達 95% 以上，並已經發表在國外家禽高水準期刊 Poultry Science (Su et al., 2018)。

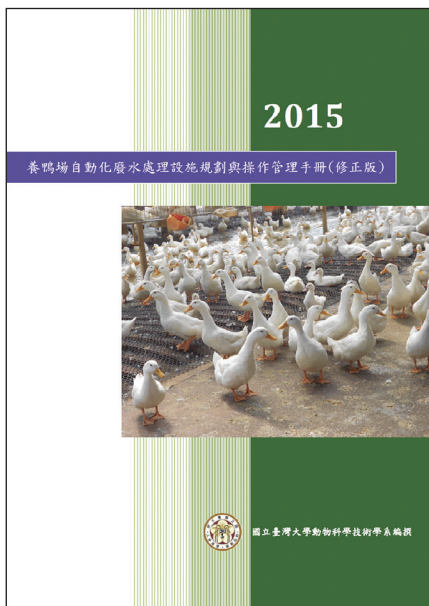


圖 2 養鴨場廢水處理系統設施規劃與操作管理手冊

3. 國內首次之養豬廢水微生物燃料電池研究論文，同時處理廢水、生產沼氣及微電力。將養豬廢水直接應用於簡易式「雙槽微生物燃料電池」研究，陽極微生物族群來自養豬廢水場之厭氧污泥，再將陽極連接一個可以充電之電容，透過使用「快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT)」計算分析，藉由計算分析頻率區域內，經由降解養豬廢水中有機質所產生之電流遞減情況，分析結果顯示此 MFC 之電流是由直流電 (DC) 與交流電 (AC) 組成，可能與放電之微生物族群行為有關 (Su et al., 2019)。本研究論文已經獲得國際高影響係數 (2019 年 Impact Factor = 8.247) 之國際期刊 Journal of Power Source 所引用 (Serra PMD and Espírito-Santo, 2021)。證明利用電容儲存電流與使用「快速傅立葉轉換 (FFT)」計算分析，可以協助更精確

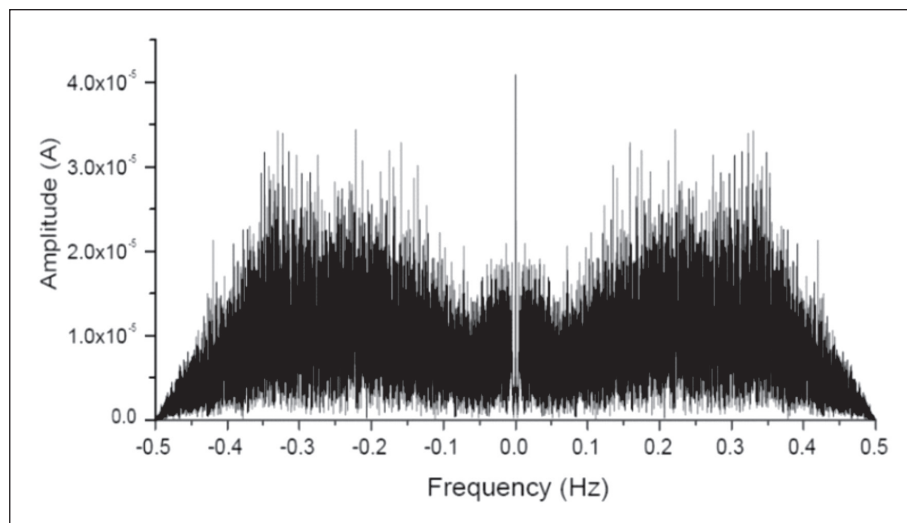


圖 3 微生物燃料電池在 0-10,000 sec 的電子釋放頻譜圖 (經傅立葉轉換計算)(Su et al., 2019)

地評估 MFC 之產電效率。

- 國內首次之建立之畜牧廢棄物「固態厭氧消化技術」並結合「黑水虻生物堆肥技術」之國際期刊研究論文(Wee and Su, 2019)。因應全球氣候暖化之畜牧業溫室氣體減量措施，經全年監測國內北、中及南部三地養豬場之溫室氣體排放量，更新於 2003 年發表之畜牧業廢水處理溫室氣體排放係數(Su et al., 2003)，並已經發表於國際知名期刊(Su and Chen, 2018)。為我國國家溫室氣體排放清冊之重要參考文獻。
- 國內首次將光觸媒應用於畜牧場沼氣脫硫，成功研發出高效率沼氣光觸媒脫硫系統裝置，同時結合沼氣提純(upgrading)

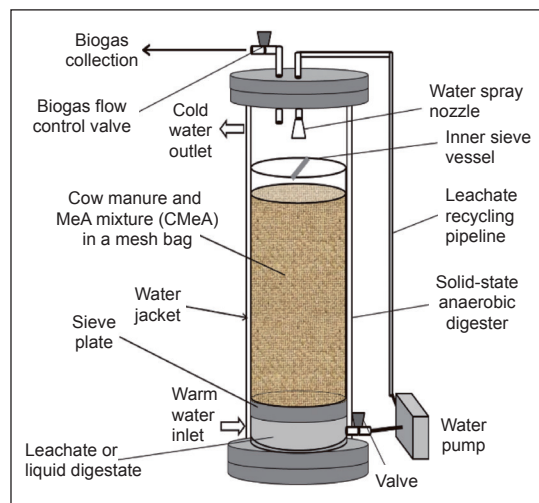


圖 4 固態厭氧消化槽外觀(Wee and Su, 2019)

裝置成功研發畜牧生物天然氣(bio-natural gas)技術系統，並已分別發表於國際期刊論文(Su and Hong, 2020; Su and Chung, 2021)。

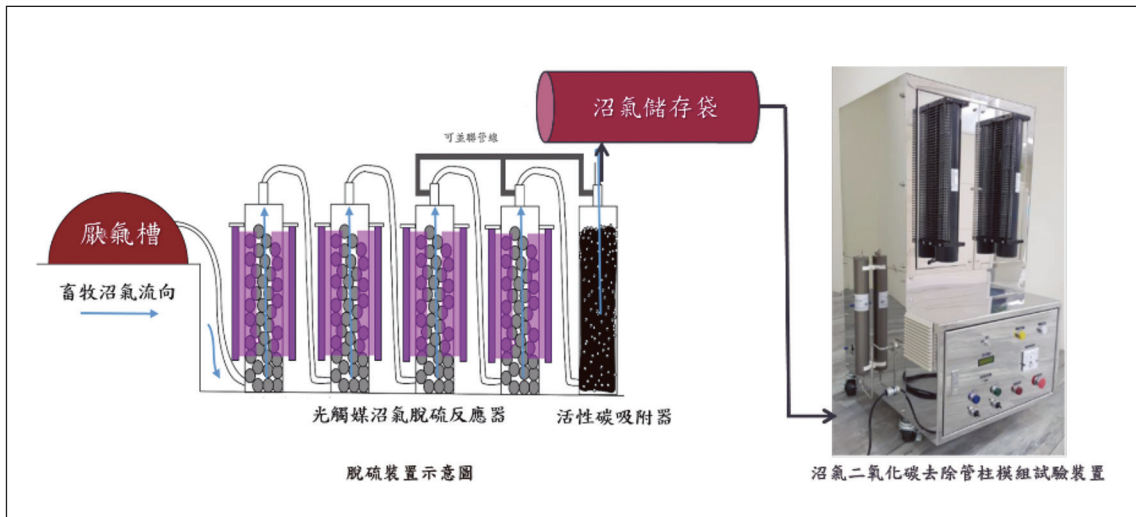


圖 5 沼氣光觸媒脫硫系統結合提純裝置技術系統 (Su and Hong, 2020; Su and Chung, 2021)

6. 利用硫氧化菌之特性 ( $H_2S \rightarrow S^0 \rightarrow SO_4^{2-}$ ) 發明之沼氣生物脫硫技術系統 (Su *et al.*, 2008)，使沼氣中硫化氫經由硫氧化菌之作用，產生可以回收利用之資源（硫磺等）。2009 年度開始在苗栗縣三場不同規模養豬場內，建置實廠規模 (full-scale) 沼氣生物脫硫系統與沼氣發電機，實場規模之沼氣生物脫硫系統對於沼氣中硫化氫之平均去除率為 95% 以上 (Su *et al.*, 2008; 2013; 2014)。此沼氣生物脫硫系統已經於 2009 與 2011 年非專屬技術授權給能源公司推廣，並於 2010 年榮獲第七屆國家新創獎。2013 年透過技轉公司在屏東縣中央畜牧場設置農場規模沼氣生物脫硫設施，同時協助設計直立式厭氣消化槽，進行沼氣收集與發電，於 2013 年成為能源局沼氣發電示範場所。



圖 6 沼氣生物脫硫系統裝置榮獲 2010 年『第七屆國家新創獎』

7. 藉由已經研發之沼氣生物脫硫裝置行養豬場沼氣進行脫硫與未脫硫沼氣應用於沼氣發電或直接燃燒，所產生之二氧化硫濃度變化與其對於環境酸雨等衝擊之討論，證明畜牧場沼氣利用（沼氣發電或直接燃



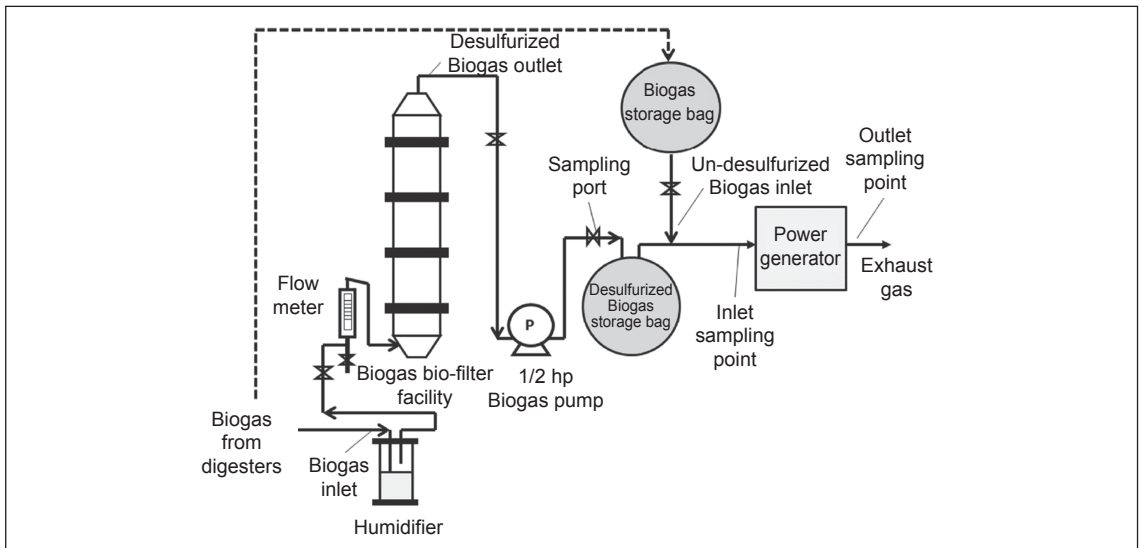


圖 7 畜牧場沼氣燃燒（脫硫與未脫硫沼氣）試驗流程示意圖（Su and Chen., 2015）

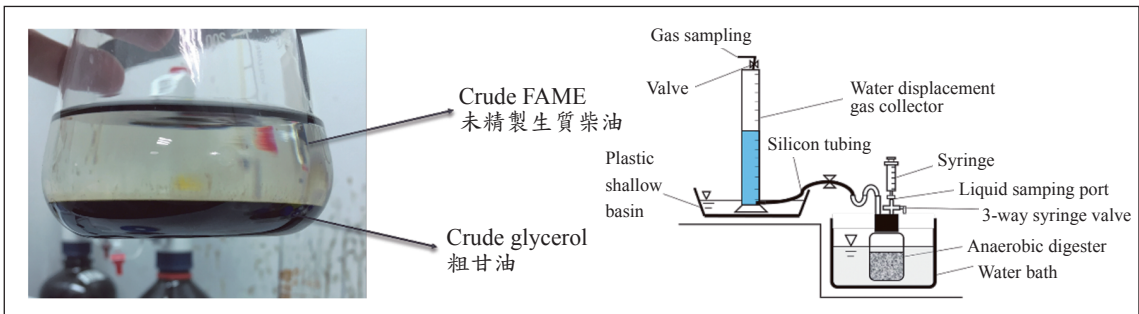


圖 8 污泥餅產製生質柴油外觀（左）與粗甘油厭氧共消化裝置示意圖（Su and Chou, 2019; Chou and Su, 2019）

燒模式）皆必須要經過脫硫程序將沼氣中硫化氫去除，以免腐蝕發電機組或燃燒設備，同時可以避免造成環境酸雨情況，論文已經發表（Su and Chen., 2015）。

8. 研發畜牧場或屠宰場廢水處理區廢棄污泥資源化技術，成功將屠宰場廢水處理區之污泥餅直接進行轉酯化程序，以生產

C16~C18 脂肪酸甲酯（亦即是生質柴油），程序中所產生之粗甘油，則將其與動物糞尿廢水進行厭氧共消化程序，可以在生產沼氣。整個技術系統已經分別發表於國際期刊論文（Su and Chou, 2019; Chou and Su, 2019），未來可以研發自動化加藥設備以減少人力成本。



## (二) 電動農機發展現況

隨著電動車的蓬勃發展，適合農業機械使用的電動機、電池及控制器，以及適用於農業車輛轉向系統、後軸組件及模組化控制器也逐漸增多。以內燃機為主的農業機械正逐漸改以電動機作業，其效益除了顯現在降低碳排放外，電動化也使得農機操控可以更多元，也更容易智慧化。

目前泛用型的農業機械如割草機、噴霧機及搬運車等已有相當多的電動化產品可供選用。電動割草機主要採用小型無刷馬達以高速旋轉方式進行割草作業，電池可裝置於機體上或採背負式，透過控制器調整馬達轉速。背負式電動噴霧機普遍為16-18公升型，以鋰電驅動隔膜泵進行藥劑的噴施，其噴頭種類繁多，可依作物樣態選用。手扶及行走式電動噴霧機（車）市面上亦有產品發表，行走式噴霧機主要應用於果園及大田的噴藥作業；然而，其應用場域已擴展至環境消毒，不限於農業生產應用。另外，近年因無人機軟硬體的迅速發展，藥劑施噴效率高（蔡，2017），甚至更發展出專業的無人機代噴模式。電動搬運車的機種多樣，有單輪、雙輪、3輪、4輪及履帶式，有手扶、駕駛及遙控式，有用於工廠搬運、溫室搬運、果園搬運、果菜市場搬運及田間搬運等類型，也有通過「（農機（具）性能測定」（行政院農業委員會農業試驗所農業工程組，2022）的機種。近年則開始有電動跟

隨車及遙控履帶車的產品發表。在電動農機中，搬運車的開發機種最多，也因為搬運車的電動化，以往搬運車因採用內燃機引擎所導致的振動問題也被大幅地改善。

除了泛用型農機，近幾年學研單位也開發了相當多的電動農機以減少環境碳排，永續農業發展，包含宜蘭大學的折疊式電動中耕機（林等人，2016）、交通大學的農用自駕車（微笑台灣，2020）、屏東科技大學的遙控噴藥履帶車（羅，2019）、臺中區農業改良場的電動自走式升降作業機（田等人，2008）、高雄區農業改良場的電動智能跟隨農地搬運機（馬，2022）、臺東區農業改良場的太陽能播種機（林，2018；曾，2019）、桃園區農業改良場的槽耕電動鬆土機（吳，2016）、電動式紙穴盤菜苗移植機、電動式散裝葉菜收穫機及設施葉菜電動管理作業機等。

### 1. 折疊式電動中耕機

電動中耕機搭配1.3 kW無刷直流馬達及DC 23V-60Ah鋰鐵電池，其機體設計可折疊，折疊後尺寸為90 × 60 × 48 cm，便於一般汽車載運。本機體重48 kg，搭配60 Ah的鋰鐵電池，可持續作業77 min，作業面積可達1,850 m<sup>2</sup>。本機的耕耘軸輸出扭力約9 kg·m，計算電動中耕機動力效率最高為66.7%。由於採用電力，估算電動中耕機的能源成本僅為汽油機的10.9%，CO<sub>2</sub>排放僅為汽油機的30.4%，具節能減碳優勢（林等人，2016）。



圖 9 第三代履帶型農用無人車（微笑臺灣，2020）



圖 10 遙控噴藥履帶車（羅，2019）

## 2. 農用自駕車

農用自駕車結合馬達、電力系統及農用無人車平台，可以遠端程式控制自駕車於山坡地果園或農地的行走能力；可以雷射深層清除雜草，免除農藥的使用；同時可以八字型迴轉方式，以因應果園狹小的作業環境以提升作業效率。目前農用自駕車已由第一代輪式發展到第三代履帶型農用無人車（圖9）。

## 3. 遙控噴藥履帶車（圖10）

遙控履帶車車體採輕量化設計，機體搭配2組電動機、履帶行走機構及控制系統，履帶車可以小半徑於田間轉向。為配合不同作物的栽培畦寬，以擴大應用範圍，履帶間距設計可調整。噴藥系統則是利用一組前置的光學鏡頭標示作物的相對位置，再將訊號傳到後台人機介面平台，進行對靶，當作物

被標記後，以農民的經驗值於人機介面上設定對應噴量，透過機器逐步數據化管理，讓噴藥可以利用手機遠端遙控。由於履帶車為全電動式，無農田污染問題，同時因為無需人為操作，可確保噴藥作業的安全性（羅，2019）。

## 4. 電動自走式升降作業機

電動自走式升降作業機採前輪轉向後輪驅動方式作業，目的在提供設施彩椒、番茄、小黃瓜等棚架式藤蔓類作物生產管理與採收搬運使用。作業機採用950W直流馬達，前進與後退為無段變速，最高行走速度每小時6 km，最小轉彎半徑1.6 m。工作平臺最大舉升高度80 cm、載重能力200 kg。升降作業機2組24V-38Ah電池可使用2~4日（田等人，2008）。



### 5. 電動智能跟隨農地搬運機 (圖11)

智能跟隨搬運機為後輪驅動式，左右輪各有獨立驅動馬達，可自動跟隨及遙控作業。其控制系統由光學雷達、超寬頻測距單元及超寬頻測距標籤（於人員身上）構成。作業時由光學雷達掃描跟隨者的身形輪廓並鎖定跟隨目標，使搬運機可跟隨使用者一起行進，當光學雷達受遮蔽時，則利用超寬頻測距單元與超寬頻測距標籤，使搬運機仍可維持跟隨狀態。透過光學雷達及超寬頻測距功能的互補作用，充分確保搬運機與跟隨使用者一起行進至所需地點，以減少使用者搬運物品之體力負荷。本機結構簡單、輕巧，無需人為操控即可自動跟隨並保持適當距離，全程使用電力，作業時無廢氣污染及噪音，兼具省工、省力及減碳功效。此跟隨車最高載重300 kg，滿載續航力可達4小時

（馬，2022）。

### 6. 太陽能乘坐式播種機

本機應用太陽能並整合播種器技術，開發可乘坐之太陽能播種機，克服傳統人工播種高成本與高勞力瓶頸。太陽能乘坐式播種機作業速度為人工條播的15倍，種子用量僅為條播的30%，且條播後苗株生長勢整齊，具有通風良好和減少病蟲害發生機率（曾，2019）。太陽能乘坐式播種機可單人進行播種，操作輕鬆簡單，年長者或女性農友亦可勝任。機體上方搭配300W太陽能板，在良好天候下，約4小時可增加0.5公頃的播種面積。本機除在播種期間可持續對電瓶充電外，亦可提供農友於播種作業時良好的遮陰；相較於傳統曳引機，本機每年可減少二氧化碳排超過12公噸（林，2018）。



圖 11 電動智能跟隨農地搬運機 (馬，2022)

### 7. 電動式紙穴盤菜苗移植機 (圖12)

為減少塑膠穴盤的使用，吳（2017）開發植物纖維育苗穴盤，利用紙箱裁邊後的一次廢料製作紙穴盤以取代塑膠穴盤進行葉菜育苗。電動式紙穴盤菜苗移植機目的即在將紙穴盤栽培之菜苗移植到田間。菜苗移植機包含切割與移植2部分，切割部包含穴盤輸送裝置、縱向切割裝置及橫向切割裝置；移植部則包含夾持裝置、擴展裝置、放苗裝置、插入裝置與復歸。紙穴盤的切割及移植控制由車體前方的PLC全程控制。移植機採用DC48V-800 W電動機，40 Ah鋰鐵電池作業。該機可大幅減少塑膠穴盤的使用，降低塑膠對農業環境的污染，永續農業發展。



圖 12 電動式紙穴盤菜苗移植機



圖 13 電動式葉菜散裝收穫機

### 8. 電動式葉菜散裝收穫機 (圖13)

電動式葉菜散裝收穫機由履帶底盤、電動馬達及夾持機構所組成。作業方式是利用馬達驅動履帶，並透過前端軟式夾持機構，可將剪切後的葉菜幾乎無損傷的收穫並向後輸送。本機的馬達額定動力為750W，最大可達1.2 kW，採用24V-85Ah磷酸鋰鐵電池，收穫速度可達3.6 m<sup>2</sup>/min，其適用性廣，可應用於甘藷葉、莧菜及空心菜的收穫作業（邱，2019）。本機並同步開發有遙控式機型，可更便利收穫作業的操作（行政院農業委員會桃園區農業改良場，2019）。



圖 14 遙控式葉菜散裝收穫機



圖 15 電動式設施葉菜栽培管理機

#### 9. 電動式設施葉菜栽培管理機（圖15）

臺灣北部地區葉菜大多於設施內生產，其生產程序如播種、移植、施肥、噴藥及收穫等作業多數倚賴人力，透過電動式栽培管理機可附掛前述不同功能之農機具以進行栽培管理相關作業，可有效紓緩設施內葉菜栽培缺工問題，降低設施葉菜生產人力成本；同時電動式管理機採用電動機及電池為動力源，可避免內燃機產生的廢氣污染設施內葉菜。電動式管理作業機具有四輪轉向系統，搭配DC48V-11 kW電動機，採用磷酸鋰鐵電池，具備可輸出動力之PTO軸、皮帶輪及油壓接頭，可提供附掛農機具動力源。

#### 10. 槽耕電動鬆土機（圖16）

槽耕為離地栽培的一種，其栽培槽被架高，介質的透氣性及排水性均佳，生產的果蔬品質亦較佳，主要應用於溫室番茄、甜

椒、瓜果及葉菜類栽培。耕槽介質在作物種植一段時間後，其團粒容易密實，因而必須透過鬆土作業，以回復介質的通氣性及排水性。電動鬆土機即在取代人力，高效率地進行耕槽鬆土作業，除可減少溫網室作物栽培的人力需求及作業辛勞外，透過機械對土壤均勻的鬆土作用，亦可增加土壤的透氣性及排水性，有利於作物的生長。本機採用800W無刷直流馬達並搭配20 Ah鋰鐵電池，其輪距及鬆土深度均可調整，可適用於不同寬度的耕槽。電動鬆土機每小時可鬆土450 m<sup>2</sup>，其作業效率為現行人力作業的12倍；且鬆土後介質的粗細度及栽培面的平整度均優於人力作業。電動鬆土機的重量輕，易於搬動，作業時無廢氣，適合溫室作業，除可用於槽耕鬆土作業外，亦可應用於有機質肥料的混合作業（吳，2016）。

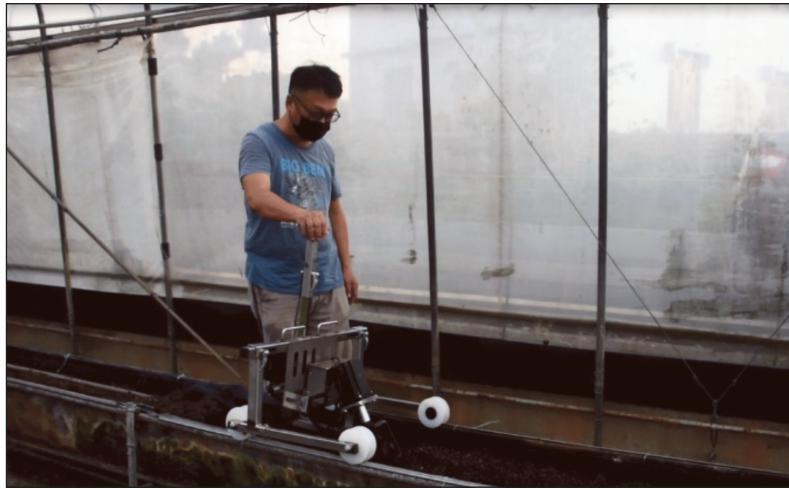


圖 16 槽耕電動鬆土機及其操作方式

### 三、未來展望

以乳牛產業為例，未來可以建立乳牛淨零碳排管理技術、開發碳捕捉、儲存及再利用技術應用於畜牧業，建置負碳生質能源供應中心。利用生質（畜牧）能源、太陽光電與風力發電等三大類能源整合成畜牧業電力平台，再以物聯網技術、資通訊技術與機電整合技術為核心，結合多種感測器與影像攝影機，發展多樣式物聯網監測平台。同時結合農畜牧業生質電能平台與儲能技術，發展微電網整合系統。持續研發以生質沼氣為燃料之有機朗肯循環熱機及史特零引擎，並利用其產生軸功應用於畜牧場域。同時以生質沼氣為熱源之熱動製冷、並應用於畜牧場域，最後擬建置生質沼氣轉換為電能之微電網模式。整合式自動化畜牧沼氣脫硫與提純技術系統及智慧化養豬廢水處理系統與其專

家管理系統之建置與教育推廣，積極推動國內跨產業（工業與畜牧業）間之碳抵換專案，以具體推動國內工業生產之零碳目標行動方案。

預計歐盟在2035年之前禁售採用柴油和汽油引擎的新車，也可能影響到在公路上行駛的農機。電動曳引機新創Monarch有「農田裡的特斯拉」之稱。其基本功能與一般油機無異，可以直接使用現有大多數農具來拖車、犁地、收割玉米和小麥；另也是完整的AIoT全自動載具，具備360°智慧攝影機以及相關深度學習、感應裝置裝置，一天最高能收集大量環境數據，並且資料上傳到公司專屬的雲端上。也能直接輸入程式碼讓它改變運作增進效率。電動農機將在原有的優勢上，結合人工智慧、物聯網等技術，進一步達成穩定糧食生產、提升農業工作環境、完



善農產履歷等重要農業里程碑。

參考文獻

1. Su JJ\* and Chung HC (2021) Study of livestock biogas upgrading using a pilot-scale photocatalytic desulphurizer followed by a hollow fibre carbon dioxide adsorption module. *Journal of Agricultural Science* 159(1-2): 3-10. (doi:10.1017/S0021859621000332).
2. Su JJ\*, Ding ST and Chung HC (2020) Establishing a Smart Farm-Scale Piggery Wastewater Treatment System with the Internet of Things (IoT) Applications. *Water* 12: 1654 (total 13 pages) (doi:10.3390/w12061654).
3. Su JJ\* and Hong YY (2020) Removal of hydrogen sulfide using a photocatalytic livestock biogas desulfurizer. *Renewable Energy* 149:181-188 (doi:10.1016/j.renene.2019.12.068)
4. Su JJ\* and Chou YC (2019) Biodiesel production by acid methanolysis of slaughterhouse sludge cake. *Animals* 9: 1029 (total 15 pages) (doi:10.3390/ani9121029).
5. Chou YC and Su JJ\* (2019) Biogas production by anaerobic co-digestion of dairy wastewater with the crude glycerol from slaughterhouse sludge cake transesterification. *Animals* 9: 618 (total 17 pages) (doi:10.3390/ani9090618).
6. Su JC, Tang SC, Su PJ and Su JJ\* (2019) Real time monitoring of micro-electricity generation through the voltage across a storage capacitor charged by a simple microbial fuel cell reactor with Fast Fourier Transform. *Energies* 13: 2610 (total 15 pages) (doi:10.3390/en12132610).
7. Wee CY and Su JJ\* (2019) Biofuel produced from solid-state anaerobic digestion of dairy cattle manure in coordination with black soldier fly larvae decomposition. *Energies* 12: 911 (total 19 pages) (doi:10.3390/en12050911).
8. Su JJ\*, Huang JF, Wang YL, and Hong YY (2018) Treatment of duck house wastewater by a pilot-scale sequencing batch reactor system for sustainable duck production. *Poultry Science* 97:3870-3877.
9. Su JJ\* and Chen YJ (2018) Monitoring of greenhouse gas emissions from farm-scale anaerobic piggery waste-water digesters. *Journal of Agricultural Science* 156(6): 739-747 (<https://doi.org/10.1017/S0021859618000734>).
10. Su JJ\* and Chen YJ (2015) Monitoring of sulfur dioxide emission resulting from biogas utilization on commercial pig farms in Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(1): 4109 (total 8 pages).
11. Su JJ\*, Chen YJ, and Chang YC (2014) A study of a pilot-scale biogas bio-filter system for utilization on pig farms. *Journal of Agricultural Science* 152(2): 217-224.
12. Su JJ\*, Chang YC, Chen YJ, Chang CK, and Lee SY (2013) Hydrogen sulfide removal from livestock biogas by a farm-scale bio-filter desulfurization system. *Water Science and Technology* 67 (6): 1288-1293.
13. Su JJ\*, Chen YJ, Chang YC, Tang SC (2008) Isolation of sulfur oxidizers for desulfurizing biogas produced from anaerobic piggery wastewater treatment in Taiwan. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(1-2):193-197.
14. 蔡佳珊 (2017)。無人機噴農藥效果如何？農友驚嘆 5 分鐘噴完 2 分絲瓜園連葉背也噴到。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://www.newsmarket.com.tw/blog/94053/>。
15. 行政院農業委員會農業試驗所農業工程組 (2022)。農機 (具) 性能測定。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://www.tari.gov.tw/sub/content/index.asp?Parser=1,30,416,386,404>。
16. 林連雄、郭泰均、張允瓊 (2016)。折疊式電動中耕機之研發。宜蘭大學生物資源學刊 12: 91-105。
17. 微笑台灣 (2020)。全自駕無人車巡田 雷射除蟲護作物。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://smiletaiwan.cw.com.tw/article/3978>。
18. 羅欣貞 (2019)。智慧農業新利器 屏科大研發遙控噴藥履帶車。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/2969127>。
19. 田雲生、張旭志、陳令錫、何榮祥 (2008)。電動自走式升降作業機之研製。臺中區農業改良場研究彙報 99: 11-22。
20. 馬振瀚 (2022)。農友福音！電動智能小跟班上工，自動追隨主人幫搬重物。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://www.newsmarket.com.tw/blog/168038/>。
21. 林宜潔 (2018)。用電力省 15 倍勞力！全臺首部太陽能乘坐式播種機問世。2022 年 7 月 25 日，取自 <https://www.agriharvest.tw/archives/18896>。
22. 曾祥恩 (2019)。太陽能乘坐式播種機之研製。臺東區農業改良場研究彙報 29: 45-58。
23. 吳有恒 (2017)。植物纖維穴盤製造技術。桃園區農業專訊 101: 10-12。
24. 邱銀珍 (2019)。電動葉菜散裝收穫機。桃園區農業專訊 109: 21。
25. 行政院農業委員會桃園區農業改良場 (2019)。行政院農業委員會桃園區農業改良場 108 年年報。桃園市。
26. 吳有恒 (2016)。槽耕電動鬆土機之研發。桃園區農業改良場研究彙報 80: 71-80。





# 鋰空氣電池

國立臺灣大學化學系碩士班研究生 / 蟻嘉輝

國立臺灣大學化學系博士班研究生 / 莫誠康

國立臺灣大學化學系特聘教授 / 劉如熹

關鍵字：鋰空氣電池、高能量密度、反應機制、電化學儲能

## 摘要

近年來電動車市場日益蓬勃發展，故電池已逐漸成為新能源關鍵核心之一，然而尋求高能量密度之電池已成為科學家主要之研究課題。可充電鋰空氣電池已成為取代傳統鋰離子電池最有希望之候選者，因其極高之能量密度約為傳統鋰離子電池之5-10倍，其中鋰二氧化碳電池受到廣泛之研究，利用溫室氣體CO<sub>2</sub>作為陰極氣體，建立儲能與轉換系統減輕CO<sub>2</sub>對環境之不利影響，且具高能量密度。本文探討鋰空氣電池以鋰氧電池與鋰二氧化碳電池為主，探討其反應原理與機制，介紹如何組裝鋰空氣電池提升其應用範圍與未來市場之發展，以新穎之技術與想法建立鋰空氣電池之標竿。

## 一、前言

能源為人類生存發展不可或缺之重要資源，自十八世紀工業革命以來，人類生產與製造方式逐漸轉為機械化，使得人類對於能源使用之需求量逐漸增加，其中煤、汽柴油等化石燃料為工業革命以來最主要之能源，以蒸汽機改良與廣泛應用為基本，蒸汽機主要以煤炭作為燃料，故隨著工業革命推進，地下蘊藏豐富之煤炭資源便有了空前之價值。然而，燃燒化石燃料雖可取得足夠之能源與動力，卻使得化石燃料快速消耗導致環境污染與溫室氣體增加，造成溫室效應、全球暖化與海平面上升等連鎖問題，故利用可持續之能源替代傳統化石燃料對於解決未來能源與環境問題至關重要。然而，大多數可



持續能源，如風能、太陽能與地熱能，為間歇性之能源，間歇性能源產生之電力存儲與輸送須高效之電能存儲系統，其中可充電電池具成為最有前途之一。綜合以上因素，石化燃料之能源應用無法永續發展，故藉綠色能源替代傳統石化燃料為現今之解決之道，此再生能源之研究與應用亦為現今科技發展之重要課題。故近年來科學家主要研究方向趨向於綠色能源，然而，綠色能源雖可促進環境永續發展，但其能源轉換效率較差不如傳統之石化燃料，故尋找低汙染與高能源轉換效率之儲能裝置為主要之解決途徑。電池為現今科技重要之儲能裝置，其應用範圍涵蓋於日常生活中，鋰離子電池為目前最普遍之儲能裝置，其優點為低成本、攜帶便利且能量轉換效率高，缺點為熱穩定性差且具漏液、爆炸與燃燒等安全問題。可充電鋰空氣電池因其極高之能量密度已成為最有希望候選者之一，有望成為未來電子產品之候選電源，因應溫室效應產生之二氧化碳氣體，故鋰二氧化碳電池之研發尤為重要，綜合以上之發展背景與優勢，鋰二氧化碳電池成為目前最具開發潛力之電池。此電池儲能裝置為綠色能源與發展建立良好基礎，促進環境永續發展。

## 二、鋰空氣電池原理與機制

### (一) 鋰空氣電池

鋰空氣電池 (Li-Air) 可分為鋰氧氣電

池與鋰二氧化碳電池，其運作原理為空氣中氧氣或二氧化碳與高活性之鋰金屬進行反應。如圖1所示[1]，鋰空氣電池相較於傳統鋰離子電池與鋰硫電池皆具較高之能量密度，促進電池永續發展與綠色能源，其未來有望應用於電動車與大型運輸工具等儲能裝置。

### (二) 鋰氧氣電池

空氣中主要由氮氣、氧氣、與氫氣與其餘雜質所組成之混合物，其中氧氣含量佔空氣總體積21%，利用氧氣與鋰離子電池結合而成之電池為鋰氧氣電池 (Li-O<sub>2</sub> Battery)，其結構為金屬鋰作為陽極、多孔性碳材料作為陰極、氧氣作為反應氣體，經由含鋰離子之液態電解質導通陰陽極鋰離子傳輸，如圖2所示。其最早發展於1996年Abraham等人[2]首度發表鋰金屬陽極與多孔性碳材料陰極，由有機高分子聚合物之膠態電解質組成鋰氧氣電池，並藉X光繞射 (X-Ray Diffraction) 與拉曼光譜 (Raman Spectroscopy) 證實放電產物為過氧化鋰 (Lithium Peroxide; Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)，即為最早之鋰氧氣電池。鋰氧氣電池之陰極為導電性多孔性碳材料，由液態電解質實現氧氣與鋰離子間之電化學反應。電池於充放電反應時，陽極溶解與沉積鋰金屬，陰極產生氧還原反應 (Oxygen Reduction Reaction; ORR) 與析氧反應 (Oxygen Evolution Reaction; OER)。[3]

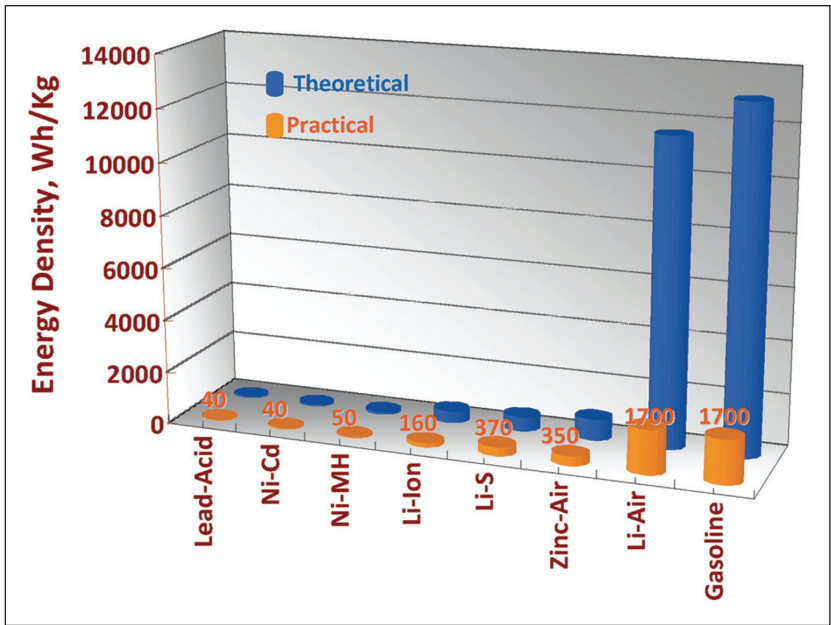


圖 1 各式電池能量密度比較圖 [1]

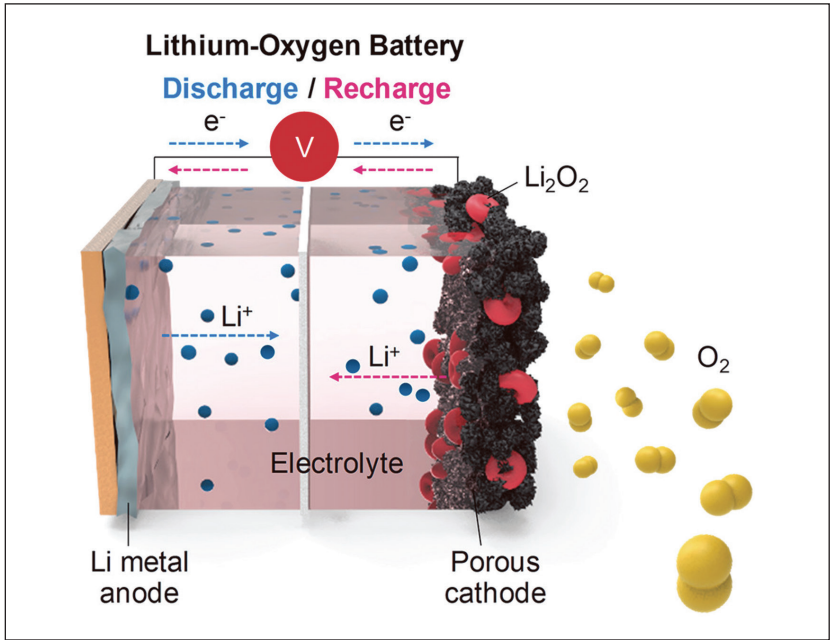
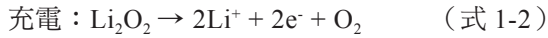
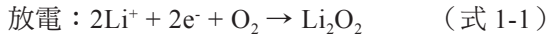


圖 2 鋰氧電池之示意圖 [3]



### (三) 鋰氧氣電池反應機制

2006年Ogasawara等人[4]組裝鋰氧氣電池由液態電解質探討過氧化鋰放電產物沉積之機制，開啟鋰氧氣電池反應機制之先驅。圖3為鋰氧氣電池於充放電時之循環機制示意圖，其充放電反應式如下：



電池放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與外部滲入之氧氣與多孔陰極反應，生成過氧化鋰並沉積於陰極表面，充電時則逆向進行反應。

放電時，陽極之反應機制為鋰金屬解離成鋰離子與電子，其反應式如下：



解離後之電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與陰極側之氧氣反應形成超氧自由基  $\text{O}_2^-$ ，此反應即為氧還原反應，再與電解質中陽極遷移至陰極之鋰離子反應，形成超氧化鋰 (Lithium Superoxide;  $\text{LiO}_2$ )，其反應式如下：



超氧化鋰為非穩定之熱力學產物，故須考量電解液、陰極材料與電流密度之變因。若鋰氧氣電池於較低電流密度下，因陰極材料吸附能力差，其反應物為溶劑化之超氧化鋰，經歧化反應 (Disproportionation) 生成過氧化鋰與氧氣；若於較高電流密度下，則電解液中之鋰離子與外電路之電子將於陰極

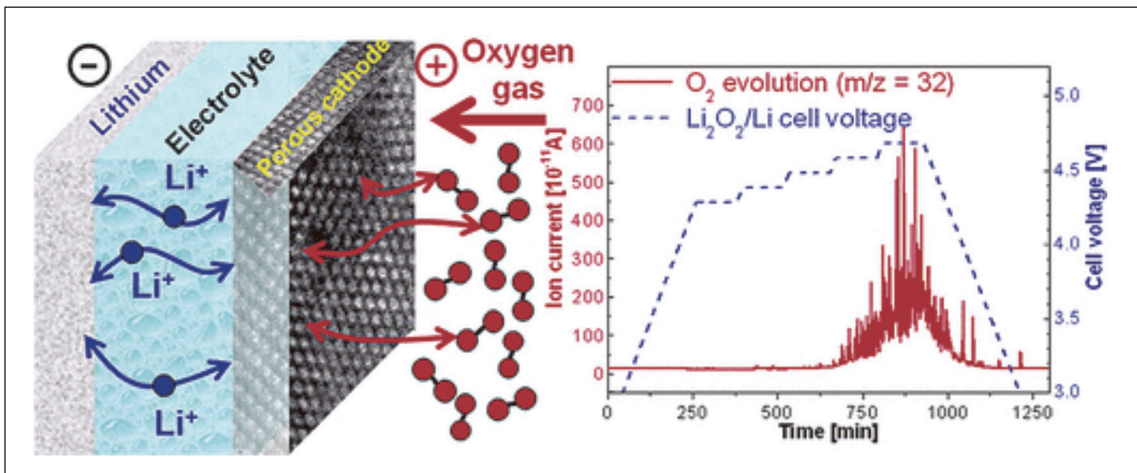
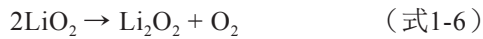
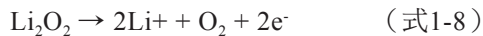


圖 3 鋰氧氣電池機制示意圖 [4]

與超氧化鋰反應生成過氧化鋰，其反應式如下：



充電時，過氧化鋰分解為鋰離子、氧氣與電子，並依循放電時之路徑遷移回至陽極，氧氣則由陰極孔洞析出至電池外部，即為析氧反應，其反應式如下：



#### (四) 鋰二氧化碳電池

因應近年來全球暖化加劇與溫室效應之

問題，故延伸鋰氧氣電池之新型鋰二氧化碳電池（Li-CO<sub>2</sub> Battery）誕生，因工業排放大量溫室氣體，其中二氧化碳氣體所占比例逐年上升。故藉二氧化碳氣體經電池之電化學反應轉化為碳酸鋰形成一新型儲能裝置。其最早發展於2011年Takechi等人[5]將鋰氧氣電池中摻入不同比例之二氧化碳，發現摻入適當比例之二氧化碳氣體可提升電池之放電容量並降低其過電位。鋰二氧化碳電池之示意圖如圖4所示。[6]

#### (五) 鋰二氧化碳電池反應機制

鋰二氧化碳電池利用多孔性碳材料結合二氧化碳氣體、鋰金屬陽極與液態電解質組成電池，圖5為鋰二氧化碳電池之機制示意圖

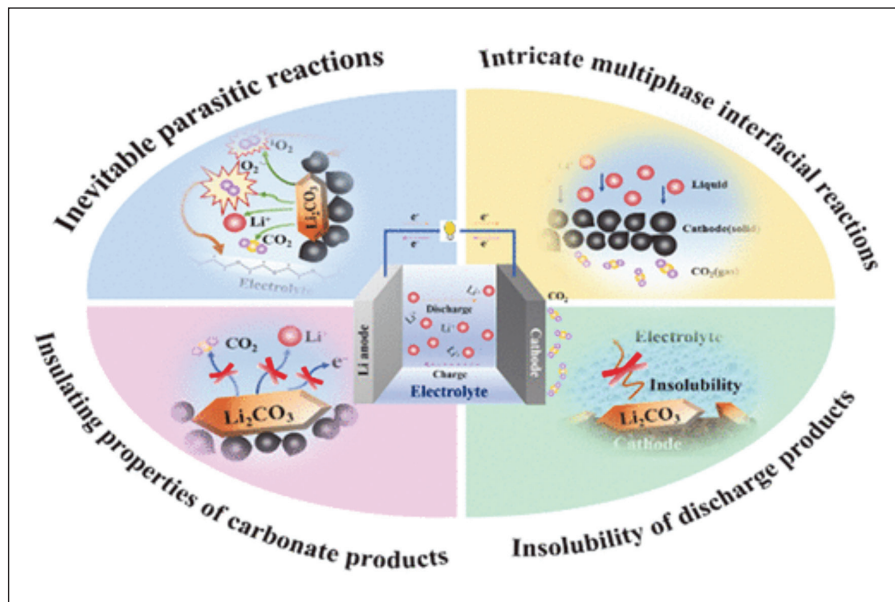


圖 4 鋰二氧化碳電池示意圖 [6]

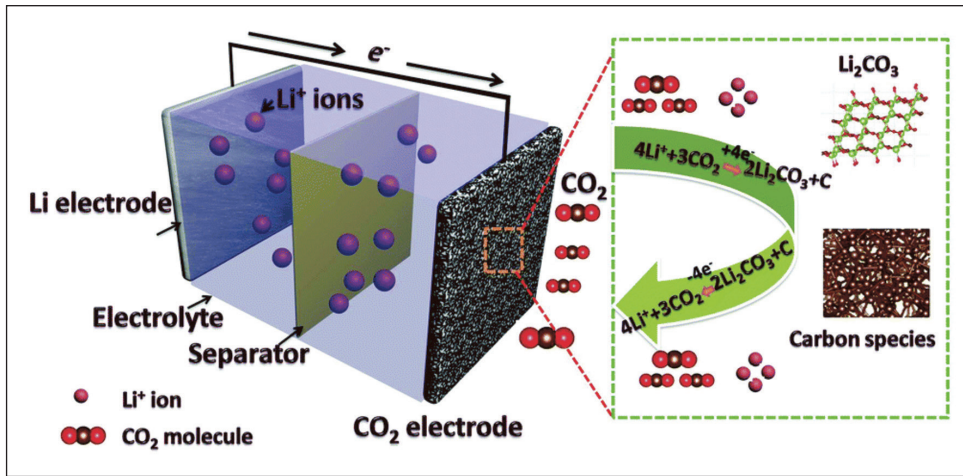


圖 5 鋰二氧化碳電池之循環機制示意圖 [7]

[7]，其充放電反應式如下

放電：



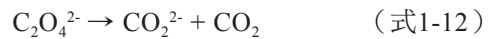
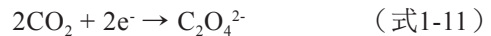
充電：



電池放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，與外部滲入之二氧化碳與多孔陰極反應，生成碳酸鋰與碳元素並沉積於陰極表面，充電時則逆向進行反應。

放電時，陽極之反應機制為鋰金屬解離成鋰離子與電子，如式1-3所示，解離後之電子經由外電路由陽極傳遞至陰極與多孔性碳材料陰極滲入之二氧化碳形成草酸根

(Oxalate;  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ) 離子[8]，緊接著草酸根離子再分解為 $\text{CO}_2$ 與 $\text{CO}_2^{2-}$ ，將 $\text{CO}_2^{2-}$ 與草酸根離子反應形成碳酸根 (Carbonate;  $\text{CO}_3^{2-}$ ) 與碳元素，最後再與電解質中之鋰離子結合形成最終放電產物碳酸鋰 (Lithium Carbonate;  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )，其反應式如下：[9]



充電時，沉積於陰極之碳酸鋰受外電壓影響分解為鋰離子、二氧化碳與電子，電子依循放電時之路徑遷移回至陽極，與鋰離子結合還原成鋰金屬，其總反應式如式1-14所示。[10]



## (六) 鋰空氣電池之電解質

鋰二氧化碳電池中，電解質扮演導通陰極與陽極之重要角色，將直接影響鋰離子傳輸速率與界面之穩定性，亦於充放電時直接影響電池之性能與其反應機制。以下介紹有機溶劑之電解質與其優缺點。

### 1. 有機溶劑之電解質

因鋰空氣電池反應電位與析氫反應電位重合，故無法直接使用水作為其反應溶劑，故改藉有機溶劑取代之。有機溶劑配製方式為使用含雙（三氟甲磺酰）亞胺鋰（LiTFSI）之鋰鹽溶於四甘醇二甲醚（TEGDME）之有機溶劑。[11] LiTFSI鋰鹽具高電化學與熱穩定性，而TEGDME為極性非質子溶劑，此液態電解質有效提升鋰離子導電性，為現今廣泛使用於鋰空氣電池之研究中，可展現其穩定之電化學性能。以下探討液態電解質須具備之條件：

#### (A) 低電子導電度

電池於充放電時，因電子經由外電路由陽極傳遞至陰極，須避免電子與電解質產生反應而影響電池之運作，故電解質應為低電子導電度。

#### (B) 高鋰離子導電度

液態電解質於電池充放電時，鋰離子由液態電解質由陽極遷移至陰極，若鋰離子電導率較低，則鋰離子遷移須較高之過電位驅動，使過電位增加進而降低電池之性能。

#### (C) 高沸點

因常見之有機溶劑於空氣中具揮發性，若電池於高溫環境下運作，將具劇烈揮發之風險，進而影響其性能。

#### (D) 電化學穩定性佳

鋰金屬陽極為高活性材料且電解液於陰陽極之間界面接觸極佳。為避免電解液於兩極間因高過電位而被分解並產生烷基鋰鹽之副反應，進而影響電池性能，故電解液須具備電化學穩定性。

#### (E) 低污染無毒性

電解液之使用應當考慮其毒性對人體與環境之危害，因近年環保意識抬頭，故具毒性與污染之電解液將面臨被淘汰之命運。

## (七) 鋰空氣電池陰極觸媒

鋰空氣電池於充放電循環中存在碳酸鋰不易分解，大量碳酸鋰沉積於陰極表面擋住陰極活性位點，導致循環壽命與穩定度降低等反應不可逆之現象，故尋找合適之陰極觸媒材料改善其電化學性能為當前解決之道。圖6所示目前應用於鋰空氣電池之陰極觸媒，以下著重介紹於碳材料、金屬氧化物與貴金屬催化劑之陰極觸媒材料。[12]

### 1. 碳材料

鋰空氣電池之陰極材料中，多孔性碳材料利於氣體擴散且具高比表面積與高電子導電性，故常被應用於鋰空氣電池之陰極材料。[13] 2013年Wang等人[14]首次利用多壁



奈米碳管（MWCNT）製成陰極觸媒材料，並應用於鋰空氣電池中。如圖7所示[14]，具多壁奈米碳管陰極之鋰空氣電池限制其最大放電容量於3000 mA h g<sup>-1</sup>避免過度放電，平均充電電壓降低至約3.5 V，放電與充電之截止電壓於循環過程中無顯著變化，循環後無觀察到未分解之排放產物與副產物，電池表現出良好之循環性能。其歸因於多壁奈米碳管為多孔性碳材料，其結構有助於氣體擴散，陰極材料具高表面積，於放電時可沉積大量之碳酸鋰。

## 2. 金屬氧化物

常見之金屬氧化物催化劑具二氧化碳還原反應（Carbon Dioxide Reduction Reaction; CDRR）與二氧化碳析出反應（Carbon Dioxide Evolution Reaction; CDER）之雙重催化活性，可減少電池充放電之過電位，其成本較貴金屬低且穩定性較高。然而此催化劑之缺點為導電性差且電子轉移之阻抗大，普遍之電池充電電壓高於4.5伏特，故金屬氧化物常與碳材料形成複合式陰極材料，大幅度提高氧化物催化劑本身之性能，2014年Liu

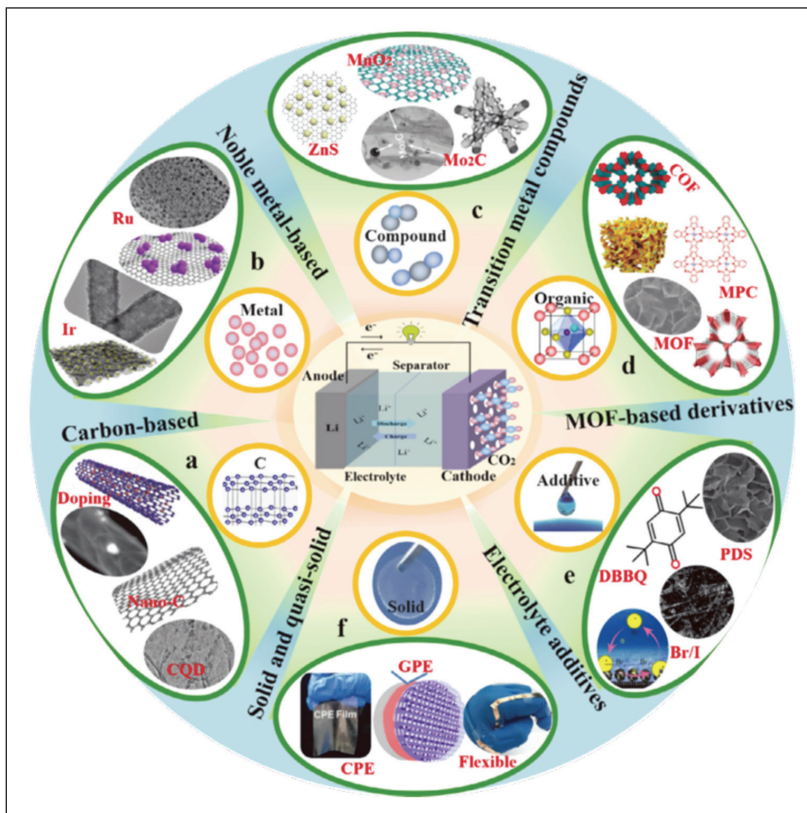


圖 6 應用於鋰空氣電池之陰極觸媒 [12]



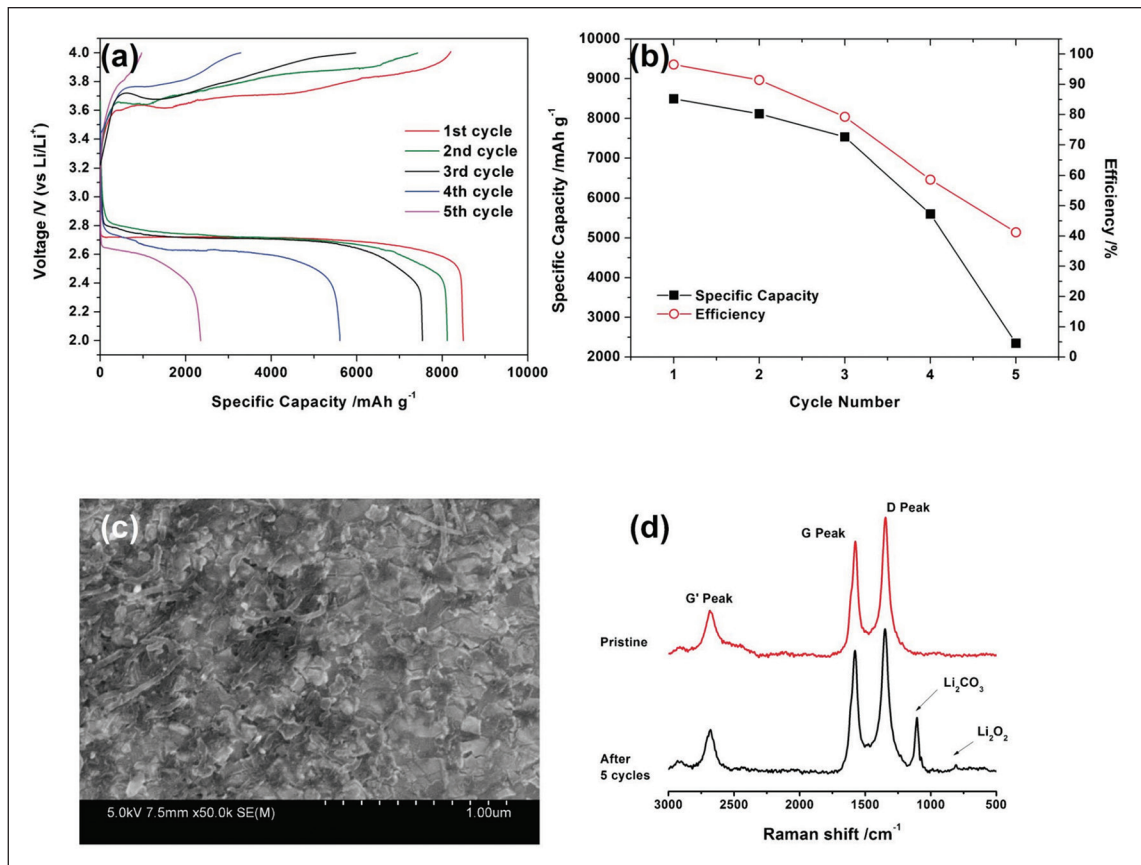


圖 7 (a, b) MWCNT 陰極之鋰空氣電池循環性能圖 (c) MWCNT 陰極之 SEM 影像圖 (d) MWCNT 陰極放電產物拉曼光譜圖 [14]

等人[15]利用無碳  $\text{MnO}_2$  之金屬氧化物，沉積於3D石墨烯表面上，形成 $3\delta\text{-MnO}_2$ 之高催化雙功能活性陰極。應用於鋰氧氣電池時，其放電容量高達 $3660 \text{ mAh g}^{-1}$ ，並且能量密度於110個循環期間顯示出非常高之平均值 $1350 \text{ Wh Kg}^{-1}$ 。化學性能歸因於花狀 $3\delta\text{-MnO}_2$ 高ORR與OER催化劑活性與3D-G- $\text{MnO}_2$ 獨特3D結構以利氣體擴散。此外，3D電子導電網路亦有助於增強ORR與OER動力學。3D-G-

$\text{MnO}_2$ 與 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 與其他碳材料之複合材料中皆可發現類似之效果。碳載體上之電催化劑負載對電池性能有重大影響。

### 3. 貴金屬

貴金屬具絕佳之導電性與穩定之物化性，其催化劑具CDRR與CDER之雙催化活性，然其價格昂貴，故其應用範圍受到較大之限制，常少量摻雜於碳材料中形成複合式

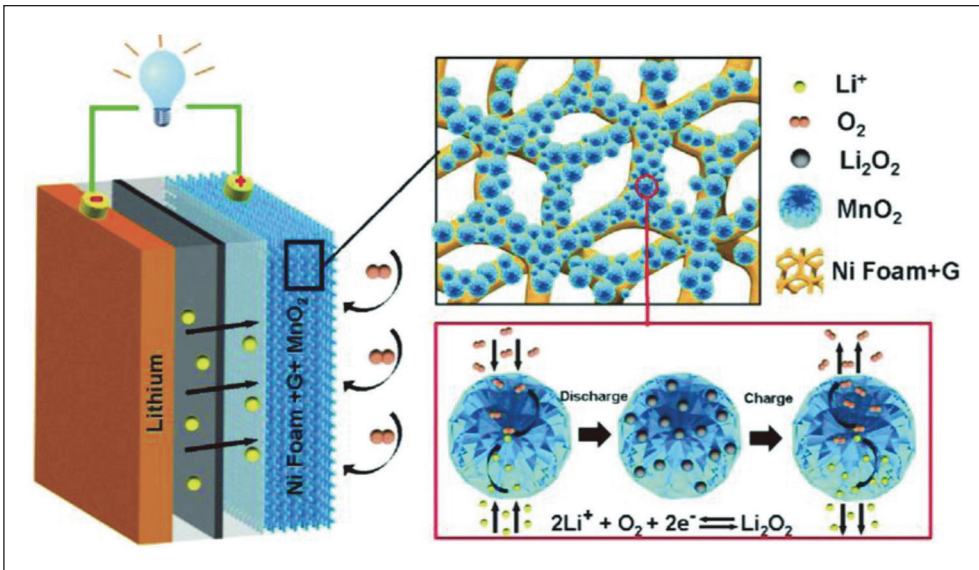


圖 8 金屬氧化物與碳材料之複合式陰極材料空氣陰極結構圖 [15]

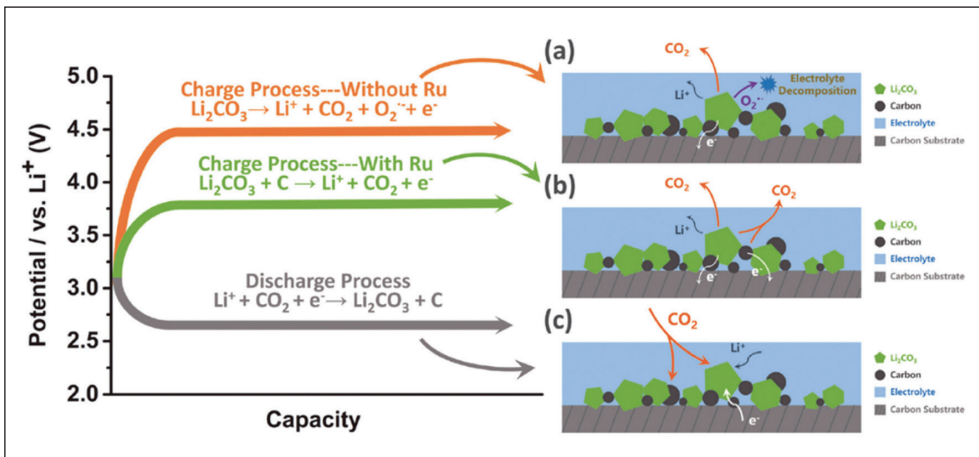


圖 9 鋰二氧化碳電池之充放電反應機制示意圖 [16]

陰極材料應用於鋰二氧化碳電池，常見之貴金屬如金、鈷、鈦等。2017年Yang等人 [16]藉貴金屬鈦作為陰極觸媒，與導電碳黑（Super P）合成複合式陰極材料，此即為 Ru@Super P陰極。將此陰極應用於鋰二氧化

碳電池，含鈦奈米粒子之陰極觸媒有效降低其過電位，並對其分解碳酸鋰表現良好之電催化活性。如圖9所示，具鈦奈米粒子之陰極觸媒鋰二氧化碳電池充電反應路徑由圖（a）轉變為圖（b），此區電位減少為超氧根離子

與電解液分解之副產物，形成一充放電之可逆反應。

### 三、鋰空氣電池之組裝

鋰空氣電池由三個主要部件組成，即鋰陽極、電解質與空氣陰極。於此介紹如何組裝鋰空氣電池，以常見之貴金屬參雜於碳材料之複合式陰極材料為例，於充滿氫氣環境下之手套箱 (<1 ppm之 $O_2$ 與 $H_2O$ )，使用陰極側開孔4 mm大小之鈕扣電池 (CR2032型) 組裝電池，其陰極側開孔主要以供氣體與陰極材料相互作用，採用鋰箔作為陽極，1 M LiTFSI溶解於TEGDME中作為電解質，玻璃纖維作為隔離膜組裝而成。如圖10所示，置放電池下蓋於底部，接著依序置放陰極、玻璃纖維隔離膜，此時滴入電解液、鋰金屬陽極片與含彈簧之電池上蓋，最後將電池放入

於特製玻璃血清瓶內之電池座並灌入氣體，即完成鋰空氣電池之組裝。

### 四、應用

近年來電動車市場日益普及與商業化，造成人們對於電池需求量增加，金屬空氣電池，具安全、環保、方便、經濟、可靠、高能量、高效率與壽命長等優勢，故未來有望應用於電動車市場挑戰成為市場新主流，2014年Gallagher等人[17]揭示非水鋰氧氣電池之研究促進電化學與材料科學基礎方面之價值。成功開發應用於電動車之鋰氧氣電池系統，包含整個電池之含氧壓力容器，使用鋰金屬負極與先進金屬氧化物正極之封閉電池系統，以實現接近高風險替代方案之能量密度與成本價值。鋰空氣電池重量較輕，具相當大之儲能潛力，相較於其他電池金屬空

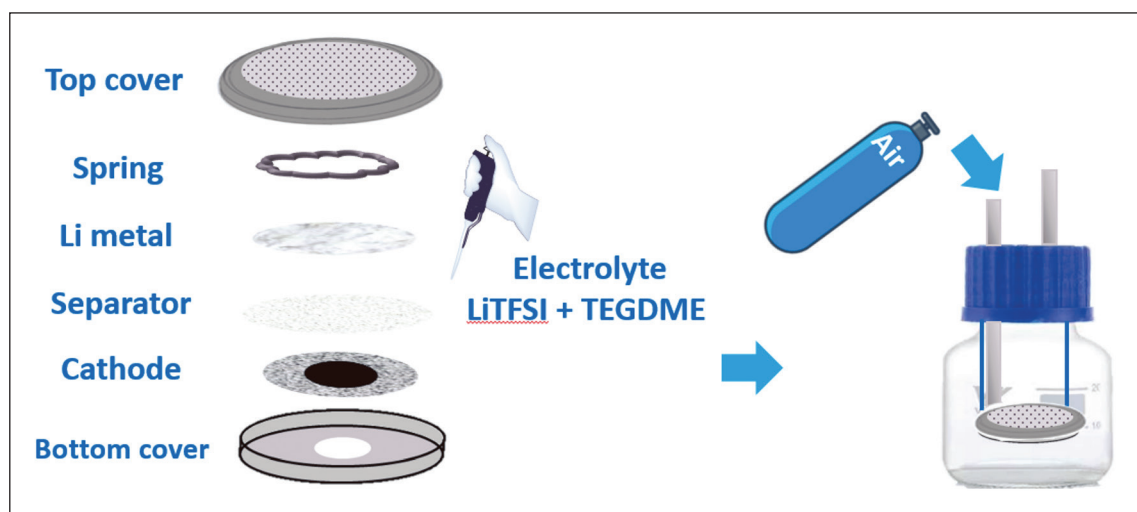


圖 10 鋰空氣電池組裝示意圖



氣電池因其極高之能量密度，可與汽油相媲美，使其成為未來電動交通有前途之儲能裝置，若應用於電動車，續航里程可高達800公里。2022年Hayat等人[18]揭示鋰離子電池與鋰空氣電池電動汽車之行駛里程示意圖，開發新型空氣陰極為實現高實用存儲容量之必然趨勢。如圖11所示鋰空氣電池具較高之行駛里程與高能量密度，鋰空氣電未來有望取代傳統鋰離子電池應用於電動車市場。

### 五、未來發展

儘管目前鋰空氣電池技術仍處於起步階段，要應用於日常生活中仍須投入大量之研究工作，克服一些可能產生之問題，然而，鋰空氣電池具極高之能量密度故科學家與工業界一致看好其發展潛力。因傳統鋰空氣電池使用液態電解質，其缺點為液態電解質容易發生燃燒等問題，造成火燒

車事件層出不窮，故未來將以固態鋰空氣電池為最主要之發展，凝膠與固體聚合物電解質已被引入鋰空氣電池中以解決此問題，然而，枝晶問題為機械性能較差之凝膠與聚合物電解質所面臨之挑戰。此外，鋰金屬陽極與聚合物或凝膠電解質之間界面寄生反應將縮短使用壽命。故須一種具更好機械與電化學穩定性之無機固態電解質。具鈉超離子導體（Sodium Superionic Conductor; NASICON）結構之氣體穩定鋰鉛鎢磷酸鹽  $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$  (LAGP) 無機固態電解質為最有前途之鋰空氣電池電解質之一，與液體與聚合物電解質相比，LAGP 對金屬鋰表現出更好之化學與電化學穩定性。藉正四價鎢離子 ( $\text{Ge}^{4+}$ ) 取代鈦離子 ( $\text{Ti}^{4+}$ )，優點為提高其鋰離子電導率且  $\text{Ge}^{4+}$  較  $\text{Ti}^{4+}$  穩定，使得其電化學穩定性提升，LAGP固態電解質結構如圖12所示。[19]

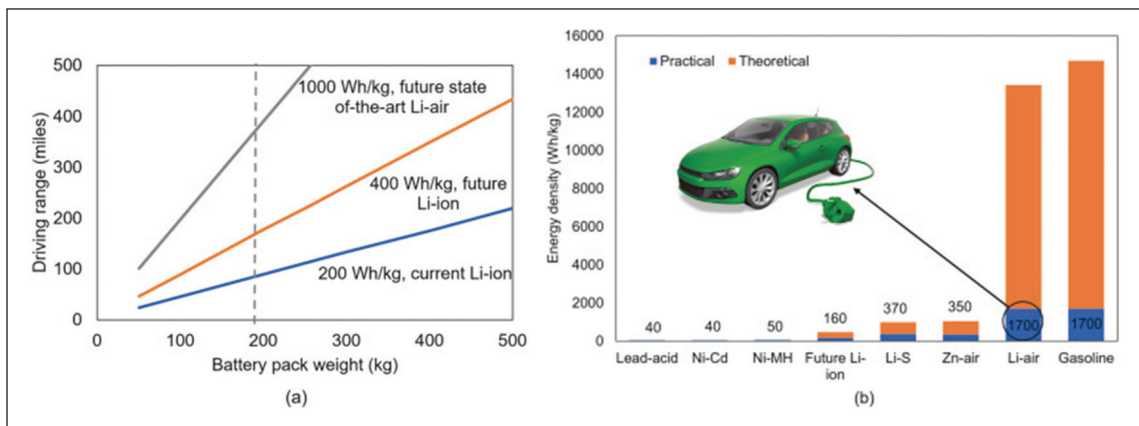


圖 11 不同電池電動汽車之行駛里程示意圖 [18]

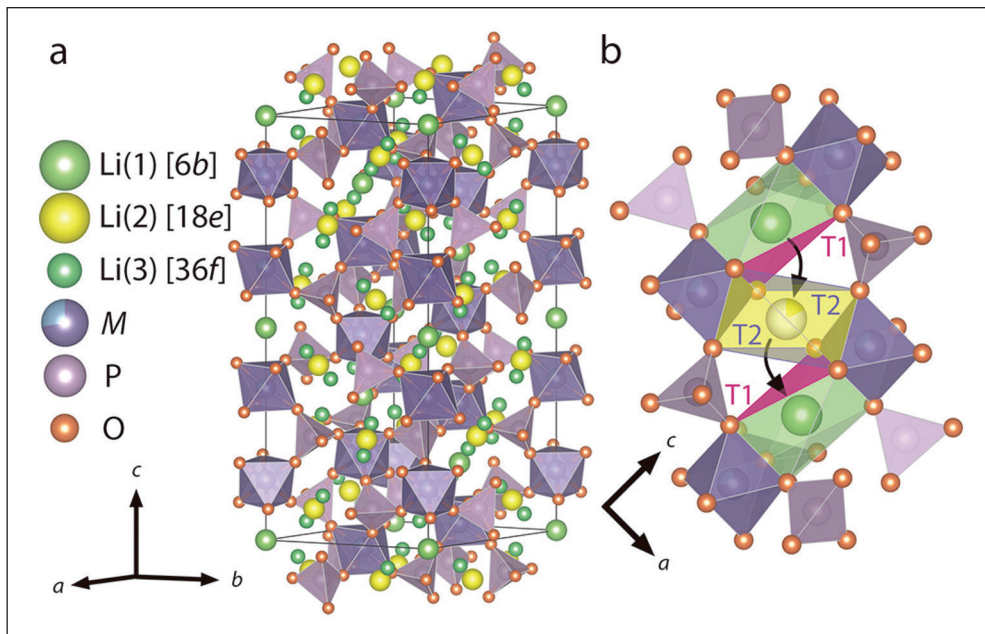


圖 12 LAGP 固態電解質結構示意圖 [19]

## 六、結論

鋰空氣電池基於其高能量密度為一種極具吸引力之電能存儲技術，於過去幾十年中，電化學儲能裝置已被揭示作為一種可能之解決方案，以滿足可再生能源存儲、便攜式設備與電動車等多種應用日益增長之能源需求，利用溫室氣體CO<sub>2</sub>作為陰極氣體與貴金屬參雜於碳材料之複合式陰極材料應用於鋰二氧化碳電池，有效提升ORR與OER之電催化活性，建立儲能與轉換系統減輕CO<sub>2</sub>對環境之不利影響，揭示新穎之綠色能源促進環境永續發展，使其成為未來電動車有前途之儲能裝置。

## 參考文獻

1. Girishkumar, G.; McCloskey, B.; Luntz, A. C.; Swanson, S.; Wilcke, W. Lithium-Air Battery: Promise and Challenges. *J. Phys. Chem. Lett.* Vol. 1 No. 14, pp. 2193-2203, 2010.
2. Abraham, K.; Jiang, Z. A Polymer Electrolyte-Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery. *J. Electrochem. Soc.* Vol. 143 No. 1, pp. 1-5, 1996.
3. Kwak, W. J.; Rosy, Sharon, D.; Xia, C.; Kim, H.; Johnson, L. R.; Bruce, P. G.; Nazar, L. F.; Sun, Y. K.; Frimer, A. A.; et al. Lithium-Oxygen Batteries and Related Systems: Potential, Status, and Future. *Chem. Rev.* Vol. 120 No. 14, pp. 6626-6683, 2020.
4. Ogasawara, T.; Débart, A.; Holzapfel, M.; Novák, P.; Bruce, P. G. Rechargeable Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Electrode for Lithium Batteries. *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 128 No. 4, pp. 1390-1393, 2006.
5. Takechi, K.; Shiga, T.; Asaoka, T. A Li-O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Battery. *Chem. Commun.* Vol. 47 No. 12, pp. 3463-3465, 2011.
6. Sun, X.; Hou, Z.; He, P.; Zhou, H. Recent Advances in Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Fuels*, Vol. 35 No. 11, pp. 19165-9186, 2021.
7. Liu, B.; Sun, Y.; Liu, L.; Chen, J.; Yang, B.; Xu, S.; Yan, X. Recent Advances in Understanding Li-CO<sub>2</sub>



- Electrochemistry. *Energy Environ. Sci.* Vol. 12 No. 3, pp. 887-922, 2019.
8. Németh, K.; Srajer, G. CO<sub>2</sub>/Oxalate Cathodes as Safe and Efficient Alternatives in High Energy Density Metal-Air Type Rechargeable Batteries. *RSC Adv.* Vol. 4 No. 4, pp. 1879-1885, 2014.
  9. Hou, Y.; Wang, J.; Liu, L.; Liu, Y.; Chou, S.; Shi, D.; Liu, H.; Wu, Y.; Zhang, W.; Chen, J. Mo<sub>2</sub>C/CNT: An Efficient Catalyst for Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Adv. Funct. Mater.* Vol. 27 No. 27, pp. 1700564-1700571, 2017.
  10. Yang, S.; Qiao, Y.; He, P.; Liu, Y.; Cheng, Z.; Zhu, J. j.; Zhou, H. A Reversible Lithium-CO<sub>2</sub> Battery with Ru Nanoparticles as A Cathode Catalyst. *Energy Environ. Sci.* Vol. 10 No. 4, pp. 972-978, 2017.
  11. Sun, X.; Hou, Z.; He, P.; Zhou, H. Recent Advances in Rechargeable Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Fuels*, Vol. 35 No. 11, pp. 9165-9186, 2021.
  12. Jiao, Y.; Qin, J.; Sari, H. M. K.; Li, D.; Li, X.; Sun, X. Recent Progress and Prospects of Li-CO<sub>2</sub> Batteries: Mechanisms, Catalysts and Electrolytes. *Energy Storage Mater.* Vol. 34 No. 1, pp. 148-170, 2021.
  13. Li, X.; Zhang, J.; Qi, G.; Cheng, J.; Wang, B. Vertically Aligned N-Doped Carbon Nanotubes Arrays as Efficient Binder-Free Catalysts for Flexible Li-CO<sub>2</sub> Batteries. *Energy Storage Mater.* Vol. 35 No. 1, pp. 148-156, 2021.
  14. Wang, H.; Xie, K.; Wang, L.; Han, Y. All Carbon Nanotubes and Freestanding Air Electrodes for Rechargeable Li-Air Batteries. *Rsc Adv.* Vol. 3 No. 22, pp. 8236-8241, 2013.
  15. Liu, S.; Zhu, Y.; Xie, J.; Huo, Y.; Yang, H. Y.; Zhu, T.; Zhang, S. Direct Growth of Flower-Like δ-MnO<sub>2</sub> on Three-Dimensional Graphene for High-Performance Rechargeable Li-O<sub>2</sub> Batteries. *Adv. Energy Mater.* Vol. 4 No. 9, pp. 1301960-1301968, 2014.
  16. Yang, S.; Qiao, Y.; He, P.; Liu, Y.; Cheng, Z.; Zhu, J. j.; Zhou, H. A Reversible Lithium-CO<sub>2</sub> Battery with Ru Nanoparticles as A Cathode Catalyst. *Energy Environ. Sci.* Vol. 10 No. 4, pp. 972-978, 2017.
  17. Gallagher, K. G.; Goebel, S.; Greszler, T.; Mathias, M.; Oelerich, W.; Eroglu, D.; Srinivasan, V. Quantifying the Promise of Lithium-Air Batteries for Electric Vehicles. *Energy Environ. Sci.* Vol. 7 No. 5, pp. 1555-1563, 2014.
  18. Hayat, K.; Vega, L. F.; AlHajaj, A. What Have We Learned by Multiscale Models on Improving the Cathode Storage Capacity of Li-Air Batteries? Recent Advances and Remaining Challenges. *Renew. Sust. Energ. Rev.* Vol. 154 No. 1, pp. 111849-111865, 2022.
  19. Weiss, M.; Weber, D. A.; Senyshyn, A.; Janek, J.; Zeier, W. G. Correlating Transport and Structural Properties in Li<sub>1+x</sub>Al<sub>x</sub>Ge<sub>2-x</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (LAGP) Prepared from Aqueous Solution. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 10 No. 13, pp. 10935-10944, 2018.



# 永續城市環境策略與風電發展潛能

國立臺北科技大學機械工程系助理教授 / 阮于軒  
國立臺北科技大學能源與冷凍空調工程系特聘教授兼系主任 / 楊安石

關鍵字：城市風能、永續發展、高層建築、密集城市

## 摘要

近年來全球再生能源之趨勢，風能作為其重點發展之一，城市推行永續環境策略也開始從建築規劃與設計層面考慮結合風力發電機之設置。而現今城市化地區建築群朝高密度與高層化發展，建築高度、城市配置與建築體量體構型設計皆能影響周圍微氣候風環境，故環境風能分析對城市風能應用極具重要性。本文探討永續城市環境風電發展潛能，針對密集城市高層建築地區進行風電評估，探討細部風場特性與查明具有風能潛力區域，在低風速或風速較不穩定之城市區域能有效利用低切入風速發電，並分析適合安裝微小型風力發電機的位置，以實現城市風能可開發蘊藏量的最大化。

## 一、前言

距離聯合國2030年需達成17項永續發展目標（Sustainable development goals, SDGs），已進入倒數十年，當中目標七SDG7明訂「確保所有的人都能取得可負擔、可靠的、永續的，以及現代的能源」，其一重點方法即是再生能源的廣泛使用。臺灣可再生能源占最終能源消費總量的份額雖已逐年增加至2021年的5.94%，其中太陽光電占比約2.75%，而風力發電占比約0.68%。然而面對實現政府「2025再生能源發電占比20%」的目標，仍急需更快的增長。近年來我國積極發展離岸風電，至2021年底已完成269MW建置。而陸上風電則因占地面積廣且易改變地貌、惱人噪音大，對環境生態負面影響而發展受限。因此能在既有設備發展之



城市風電正開始受到世界各城市新能源開發的青睞，其對土地較無獨占性，故可降低對環境與占地的疑慮，且能避免長距離電力輸送的耗損，與其他潔淨能源搭配能發展更多用途。

城市風能所具備良好開發潛力，使得環境風能分析對風能應用極具重要性。在城市中，高層建築的建築型態與風能利用密切相關，密集城市（Compact city）風場因空氣流動過程中與建築物量體群結構交互影響而變得複雜而形成獨特之風場分佈。臺灣地狹人稠，除開發偏遠沿海地區之大型風機之外，城市建築環境中亦具將風力發電與高層建築群體結合之可能性以最大化廣泛發展臺灣城市地區之風力發電。在永續發展的趨勢下，透過高層建築群體配置和高層建築本身設計，如何與環境結合有效運用風場，成為都市發展風力發電之重要議題。

## 二、研究背景

過去十年中，氣候變遷已成為造成我們環境日益嚴峻的關鍵問題。據 NASA 研究顯示，2020年的全球平均地表溫度是有記錄以來最熱的一年[1]。導致全球暖化的溫室氣體排放量約佔75%，同時消耗世界上三分之二的能源。城市作為氣候變遷的主因，同時也是人類社會受影響最大的區域，城市熱島效應和空氣污染透過快速的城市化更加劇這過程。因此，永續城市發展成為應對氣候變遷

解決方案的必須策略，透過城市環境設計方法將問題轉化為機遇，從而對我們微氣候環境產生積極影響。

隨著風電事業的飛速發展，風電場開發選址已成為一個重要的研究課題。近幾年風力發電技術純熟，被普遍用於具有良好風環境之陸域或大型離岸風場，然而，離岸風電礙於距離人口密集市區較遠，其電網傳輸電力損失問題大與大型風力發電機的安裝設置成本高。故風力發電機在城市環境中的使用也引起關注，整合建築與再生能源之應用[2-4]。城市環境中，氣流經過建築物可局部加速提高風速和能源產量，然而由於建築環境地形粗糙度的複雜性，使城市地區的風環境難以預測分析。當城市皆往高密度、高層發展，城市環境中建築物密集，高層建築的配置與結構形狀、街廓狹谷佈局、各地風力條件的不同，加以建築群體間的相互干擾造成氣流紊亂、風場非定向、不穩定特性，影響風強度及風能密度等分佈，尤其建築物屋頂、邊緣、垂直牆面等位置風速改變明顯。同時也因城市地區高樓林立和空間限制，局部風場甚或完全被上游結構體遮蔽而呈現幾乎無風狀態。目前城市環境的風能利用主要分為建築整合風機（Building integrated wind turbines, BIWT）或在現有建築上安裝小型或微型風力發電機組，利用環境自然資源考慮風機與建築設計直接結合，在不破壞環境基本生態平衡條件下達到永續發展建築。一般來說，小型或微型風力



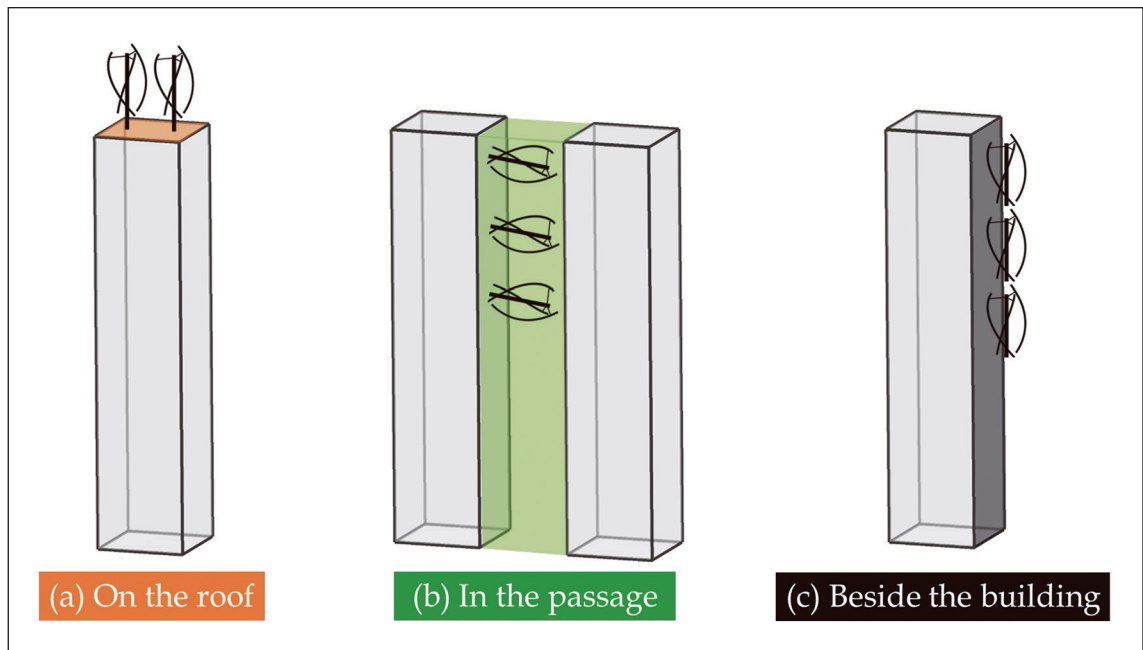


圖 1 高層建築整合風力發電機組可能安裝之討論區域

發電機組最可行設置於建築上之區域如圖1所示，包括：（1）建築物屋頂上方、（2）建築物之間的通道、和（3）建築物邊緣。以建築物之間的通道來說，密集城市中的高層建築高度（ $H$ ）和其相鄰建築之通道寬（ $W$ ）之高寬比值（ $H/W$ ）非常小易造成狹管效應，又稱峽谷效應或頸束效應，為氣流通過狹窄街谷時風速加快速的物理現象，使風能密度隨之增加[5, 6]。因此，高精度數值模擬之城市風資源評估對提供有效風力發電機潛在安裝地點等細節信息具有其必要性[7, 8]。

城市風能資源的研究方法包含現場實地

量測[9, 10]、縮尺風洞實驗[11, 12]、以及計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）進行數值模擬[13-15]。目前對風能資源評估的方法仍存在許多挑戰，例如：

1. 由於風是一種氣候現象，其預測值易有波動，且具有不確定性。
2. 基於長時間對於氣象條件記錄，風能資源評估可能會因為依據平均風速而低估實際的風能密度。
3. 風速可能會受到地形與建築構型的影響，造成實驗量測與實際風機安裝位置會預期有約±10%之誤差。
4. 風能資源評估會需要與風速分布、風向與



紊流強度相關的數據以確立或調整風機安裝位置與高度。

5. 無論是實驗測量位置、設備精確度，還是量測儀器之設置方位皆可以影響量測數據與驗證結果。

CFD模擬作為早期城市設計的有效工具，經濟實惠且適用於城市環境設計的有效分析，可控制初始和邊界條件以獲得完整計算域中的流場數據和相關參數，並可進行不同城市形態參數來定量評估城市規劃中不同建築佈局的設計策略優劣。除了要考慮風機裝設位置擁有最高平均風速外，風向、氣流

的穩定性與建築風場的交互作用都是必須納入考量的，避免高強度紊流導致風機渦輪葉片耗損而降低性能、提高維修成本，除此之外，也應當避開低風速且風電潛能較低的區域，以排除浪費資源的可能性。城市風能潛力可通過改變城市形態參數來顯著提高，例如城市佈局[16-18]、城市密度[19-21]、建築幾何形狀[22-24]、以及建築物角落修改[25-27]等如圖2密集高層建築群中所示，若在早期城市規劃中能採取有效的城市設計策略作為氣候控制解決方案，便提早優化風能條件，促進城市風能發電的永續發展。

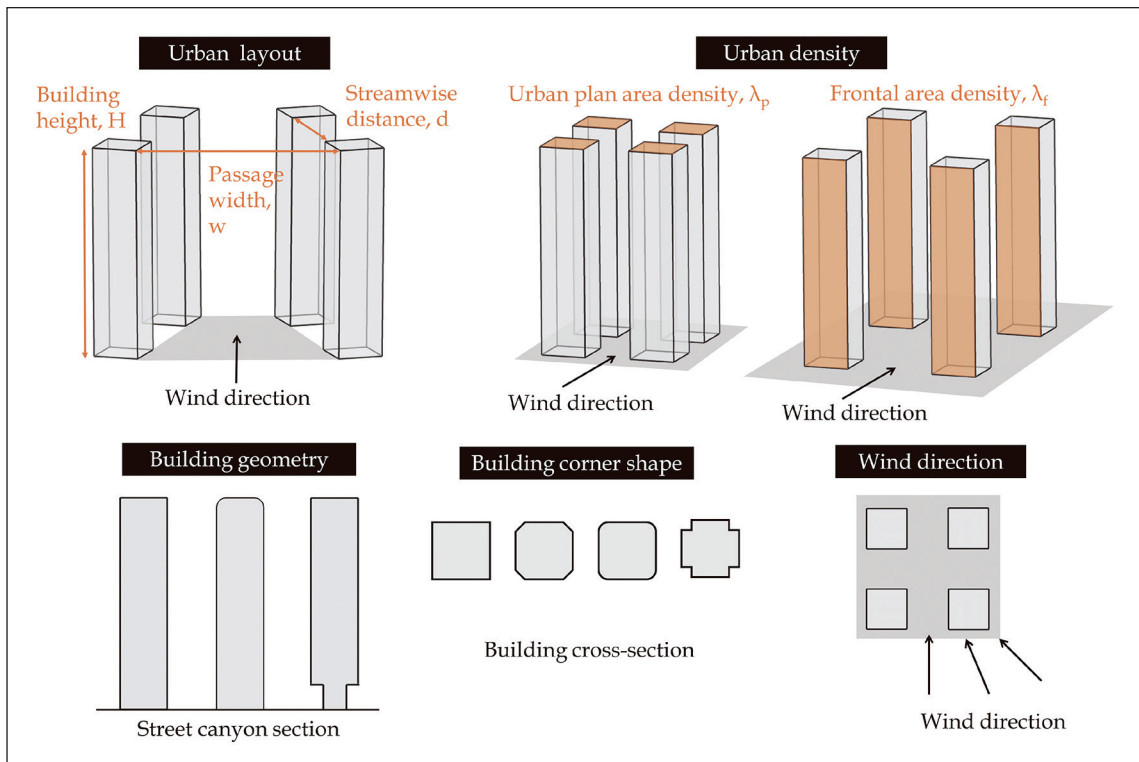


圖 2 高層建築群之城市形態參數

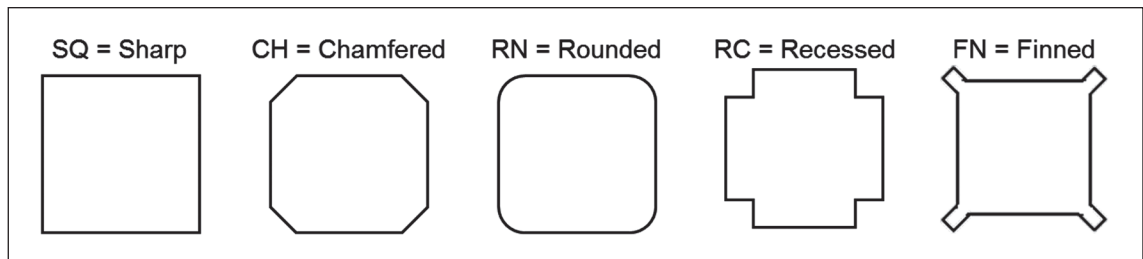


圖3 高層建築截面之不同建築角隅形狀修正

本文透過CFD模擬了解不同城市形態參數對高層建築周圍城市風力發電的影響，將重點關注城市風能潛力和高層建築周圍相關的複雜氣流現象，應用於理想密集高層建築區域和真實高密度建築群案例。CFD 模擬依據城市建築群體與環境狀況擬真建置三維立體數值分析模型，用以決定計算域內風場速度、壓力等。本研究之基本假設基於穩態、三維、不可壓縮紊流穿越建築結構，並以連續、動量、紊流動能與紊流動能消散率方程式，採用計算流體力學軟體ANSYS Fluent®求解速度與壓力場。理想城市部分採用高精度CFD模擬來研究不同形態參數對可能的風力發電機安裝區域的風能潛力的影響；真實高層城市地區的城市風能潛力CFD模擬則以香港中環地區為案例，進行風能潛力的高精度CFD模擬以評估香港風資源的應用。

### 三、透過高層建築設計提高密集城市風力發電潛力

高層建築的建築型態與風能利用密切相

關，密集城市風場因空氣流動過程中與建築物量體群結構交互影響而變得複雜，形成獨特之風場分佈。城市風場結構受高層建築本身量體構型而影響其氣流之速度大小、方向及紊流強度，當氣流穿越建築物時繞過建物經兩側的自由流區形成分流風，其中又以流線型建築物容易引導氣流而加大風速。當氣流通過建築邊緣，也可藉由改變不同建築角隅（Corner）構型修正（如圖3）作邊緣導角優化設計，風速會因建物形狀改變加速，產生亂流、上升流及下降流等，故可藉由優化邊緣稜線處使之滑順以增加風速，此效應稱為寬德效應（Coanda Effect），亦稱附壁作用或康達效應。氣流離開本來的運動方向，改為隨著凸出的物體表面摩擦時，流體的流速會減慢。只要物體表面的曲率不是很大，依據流體力學中的伯努利原理，流速的減緩會導致流體被吸附在物體的表面上流動。實際上利用此效應可誘導空氣氣流在高層建築邊緣和角落表面提升氣流速度，以實現城市風能。

在傳統的高層建築設計及城市規劃的實



踐中，一般建築師常缺乏對城市風能發展的關注，較少考慮高層建築修正其角隅形狀以提升風力的概念。本節探討理想城市中 $2 \times 2$ 之四棟建築陣列，針對密集街廓配置之影響設計因子 - 高層建築角隅構型修正，討論其對城市風能利用之影響。在城市風環境的評估過程中，考慮當今城市地區高密度化建築物開發，導致風穿越建築群體間因相互干擾造成氣流紊亂之非定向風場，透過高精度CFD模擬搭配縮尺風洞實驗驗證，進行理想密集城市風場之參數化設計分析，以評估其氣動優化提高其潛在風能。案例亮點在於考量高層建築型態和其不同建築邊緣角隅構型設計，包括尖角、導角與圓角，將高層建築本身配合密集城市街廓配置設計進而增大街廓環境風速以提升風力發電潛力，並提出在高層建築上有利集風最大化之安裝位置。研究結果顯示，當氣流通過高層建築間空隙時，導角與圓角構型發生流動膨脹並使氣流在角隅間風速加速，如圖4。

城市風電潛能評估指標除風速外還包括風能密度及紊流強度，尤其針對風機適宜安裝之三潛在位置：現有建築物屋頂、間距間、與側邊垂直牆尤為重要，除選定高風能密度區域外，更需配合考量選擇紊流強度較低之位置，尤其城市環境中紊流風易受建築構型與地形影響而造成高紊流強度區域，導致風力渦輪機旋轉葉片受過大疲勞應力而損壞，故評估應集中選定高風能密度且低紊流強度區域，以提供風機穩定運轉發電條件。圖5圓角角隅構型除了藉由氣動優化角隅邊緣使滑順增加風速能提高風能密度，亦更為降低其紊流強度。針對潛在風機安裝位置，顯示建築垂直面之建築間距間以高層建築一半高度處為最佳安裝區域，而側邊垂直牆部分以下游建築之後圓角角隅邊緣一側為最佳安裝區域。同時，增加圓角角隅構型之圓角半徑長度可增大風能密度及降低紊流強度[7, 28, 29]。

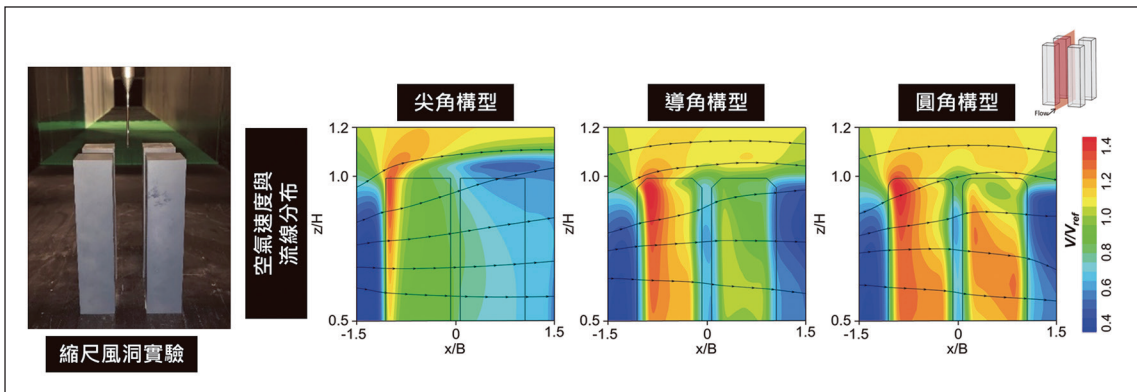


圖 4 縮尺風洞實驗與 CFD 數值模擬結果之空氣速度與流線分布

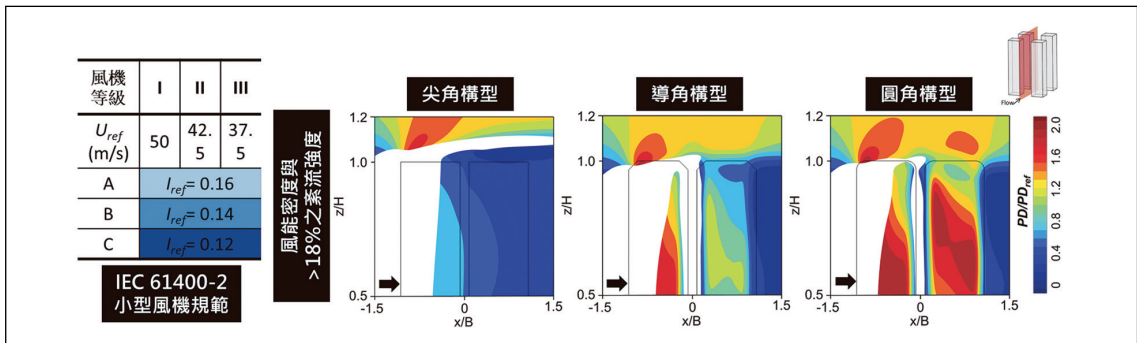


圖 5 IEC 61400-2 小型風機規範與 CFD 數值模擬結果之風能密度（紊流強度大於 18% 以白色區塊呈現）

#### 四、真實密集城市環境之風能評估

將高層建築本身配合密集城市街廓配置設計增大街廓環境風速，因此在城市規劃和高層建物設計時，除提出在高層建築上有利於集風的風力發電機的安裝位置外，配合城市街廓佈局來選擇合適位置建置風機以充分利用城市風能，對於城市永續發展和近零能耗建築實現有重大意義。如何通過合理設計，有效增加建築環境中的風資源，分析風能密度與紊流強度分佈，從建築設計的角度

探討適合於風力發電高層建築的形態下，提供建築師理論參考進而達到潛在風能利用最大化。為探討真實高都市化區域的風能資源，本文選定以擁有世界最密集高樓大廈之香港中環為研究案例，針對以人口稠密且高層建築密集的城市進行風能發電潛力的評估。本研究探討了香港中環的城市風能發展，並以全港第二高415公尺的第二期國際金融中心（International Finance Centre, IFC）為中心，如圖6所示建置半徑一公里內建築物的三維立體擬真數值模型。

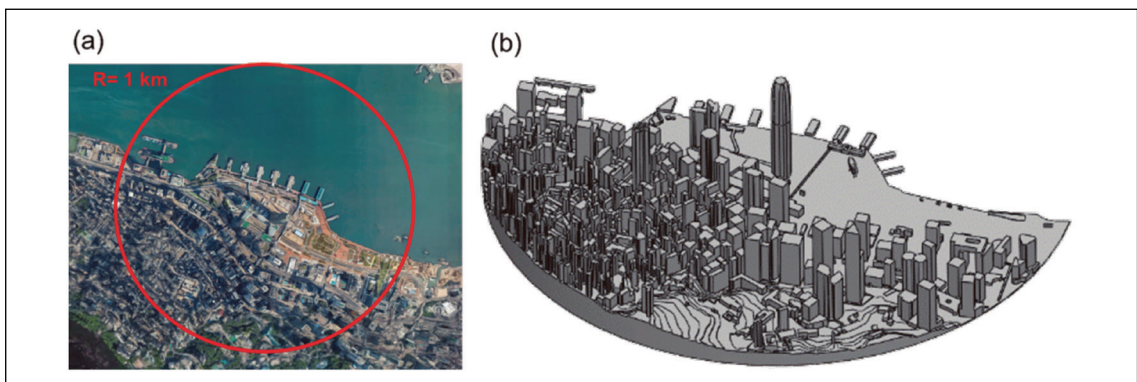


圖 6 研究範圍香港中環地區之 (a) Google Map 實景圖與 (b) 數值模型

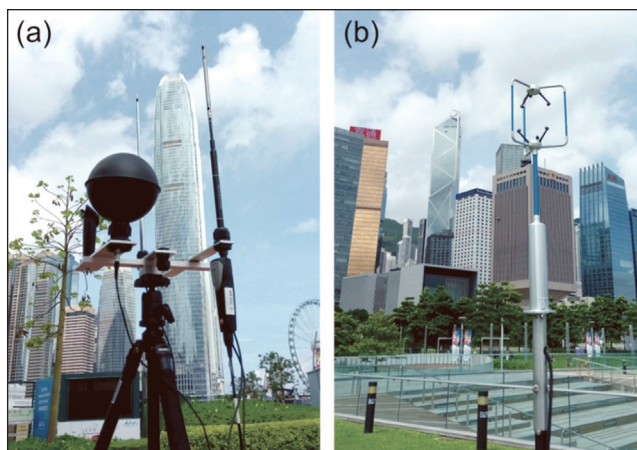


圖 7 (a) Testo 0635 1050 熱球式風速計與 (b) WindMaster 三軸風速風向計

表 1 實測儀器基本資料

儀器名稱		儀器功能
Testo 系列	熱球式風速計 Testo 0635 1050	主要用來感測風速大小，其量測範圍為 0~10 m/s，量測精度為 ±0.03 m/s。
	多功能測量儀 Testo 480	用於連接各感測器與主機，紀錄量測數據，可以測量溫度、濕度、風速、壓力等多種參數與長期監測。
WindMaster 三軸風速風向計		整套風速風向計系統安裝包含：風速風向計、資料擷取設備、電源供應模組以及安裝基座系統可量測之風速範圍可至 0 至 45 m/s，量測解析度為 0.001 m/s，量測精度 <1.5% RMS，而風向可量測範圍為 0 至 359.9°，量測解析度為 0.1°，量測精度為 ±2。

以CFD模擬計算細部風環境，並透過現場量測夏、冬兩季節之風速大小、風向與紊流強度，於選定範圍採用Testo系列微氣候量測儀器與WindMaster三軸超音波風速風向計（如圖7），其儀器功能、量測範圍、與精準度如表1所示。CFD模擬代入當地氣候數據做為入口邊界條件，其以實驗數據驗證CFD模擬結果證明其預測準確性，再針對不同高度與區域進行風能密度與紊流強度的分析，以評估研究區域的風能潛勢，由整體風場特性

（包含：風速、風能密度與紊流強度）趨勢來觀察為評估風能可行性，研究每棟建築物近屋頂水平高度的風能密度與紊流強度之空間分布，決定適合安裝小型風機且能供應穩定風電輸出的位置。

整體來說由圖8可知背風測的風能密度相對較低，且紊流強度高於18%，不符合IEC 61400-2安裝風機規範。隨著氣流通過建築物周圍，所產生的風速可換算成風能輸出；

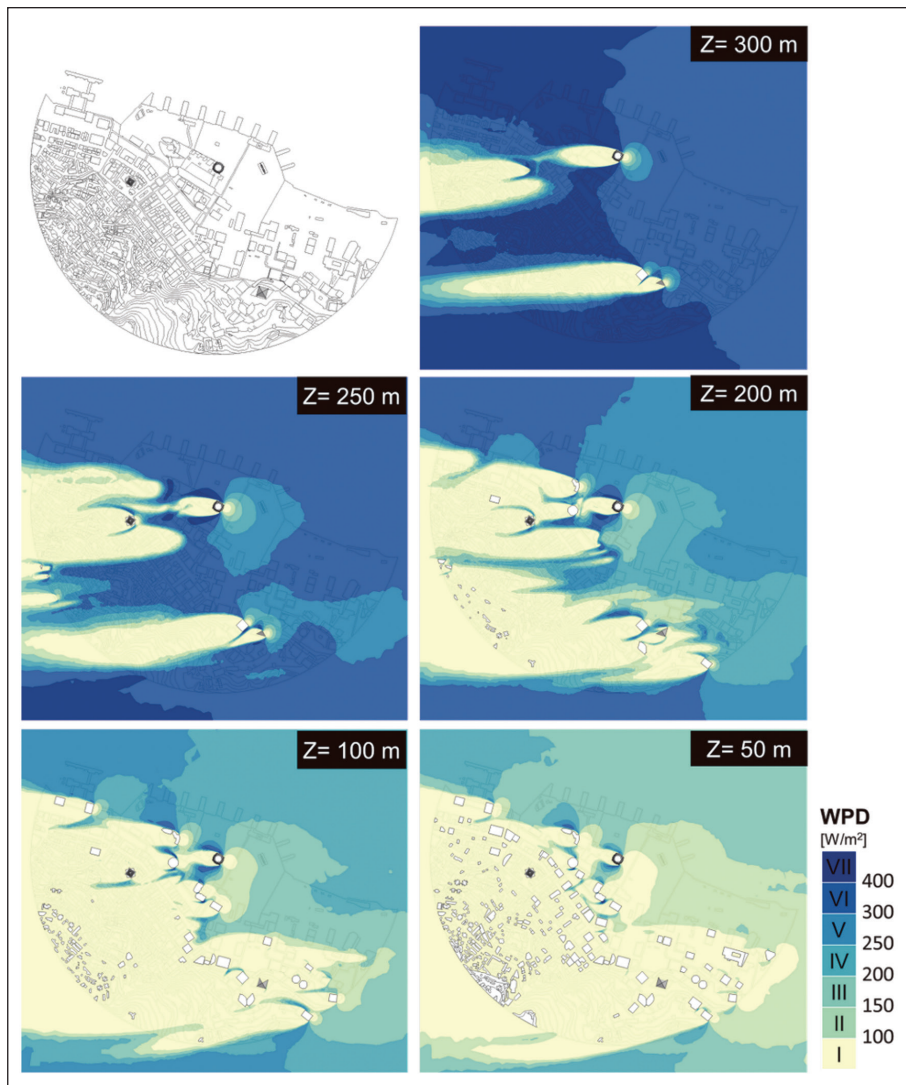


圖 8 數值模擬全區不同高度之風能密度分布圖

除此之外，盛行風流經建築屋頂會因受到屋角擴展（Corner expansion）加速作用的影響而增加風能密度，而屋頂角隅處也會有相對較低的紊流強度且都滿足適合安裝風機的標準。根據尾流與角隅風流擴展作用，可從冬

季模擬結果評估有機會安裝風機的位置能否被風能所應用。

針對所建置之數值模型範圍內具有較高風能潛力之單棟高層建築作細部討論，其城

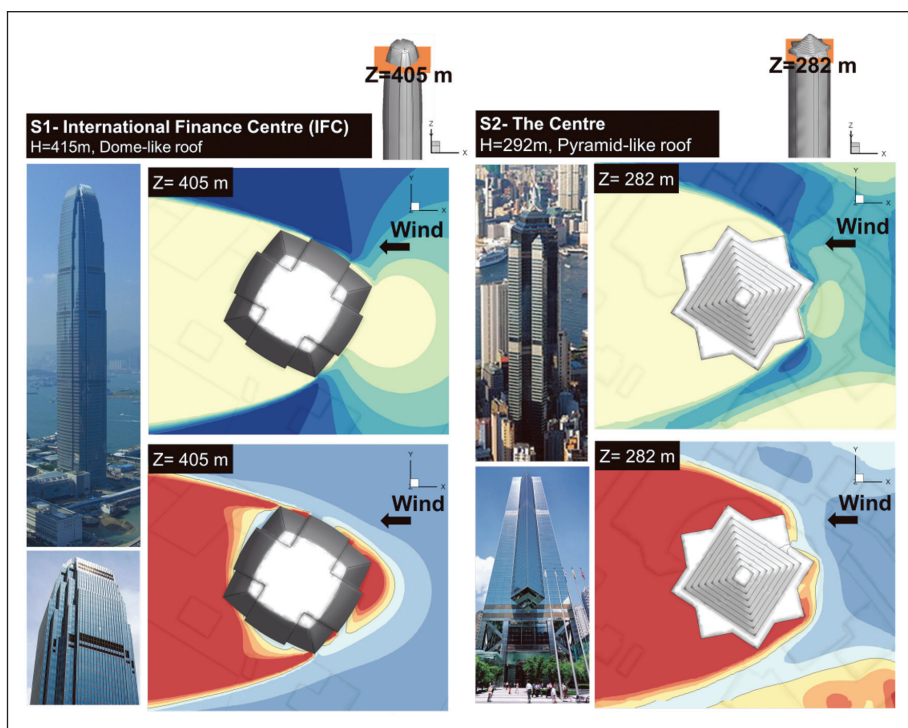


圖 9 數值模擬預測目標建築量體之風能密度與紊流強度分布圖

市型態參數之不同建築構型、屋頂構型、上游建築的遮蔽、相鄰建築群體間的通道間距、與平行雙棟建築街谷深度對風能特性的影響。舉例來說，圖9顯示不同建築構型為參數討論下，國際金融中心（IFC）具有建築角隅構型修正，其邊緣導角優化設計使建築側邊同時具有高風能、紊流強度低於18%且適合安裝風機之位置區域。而具八角形尖角構型之中環中心（The Centre）受其建築角隅構型影響，於尖角銳處造成邊界層分離低速且高紊流強度，建築側邊並不適合安裝風力發電機。

圖10則顯示相鄰建築群體間的通道間距之效應，交易廣場（Exchange Square I&II）因兩棟高層建築近90度夾角排列，當氣流流經窄小通道速度會因截面積縮小而上升，此為文丘里效應（Venturi effect）影響，使得在建築間通道產生速度最大值，因此在建築間通道的上游處可製造約300 W/m<sup>2</sup>的風能，同時紊流強度低於18%，可作為可安裝風機之建議位置。而告羅士打大廈（Gloucester Tower）和公爵大廈（Edinburgh Tower）雖然兩棟高層建築也呈近90度夾角排列，但因具有上游高層建築的遮蔽阻擋，導致背風測



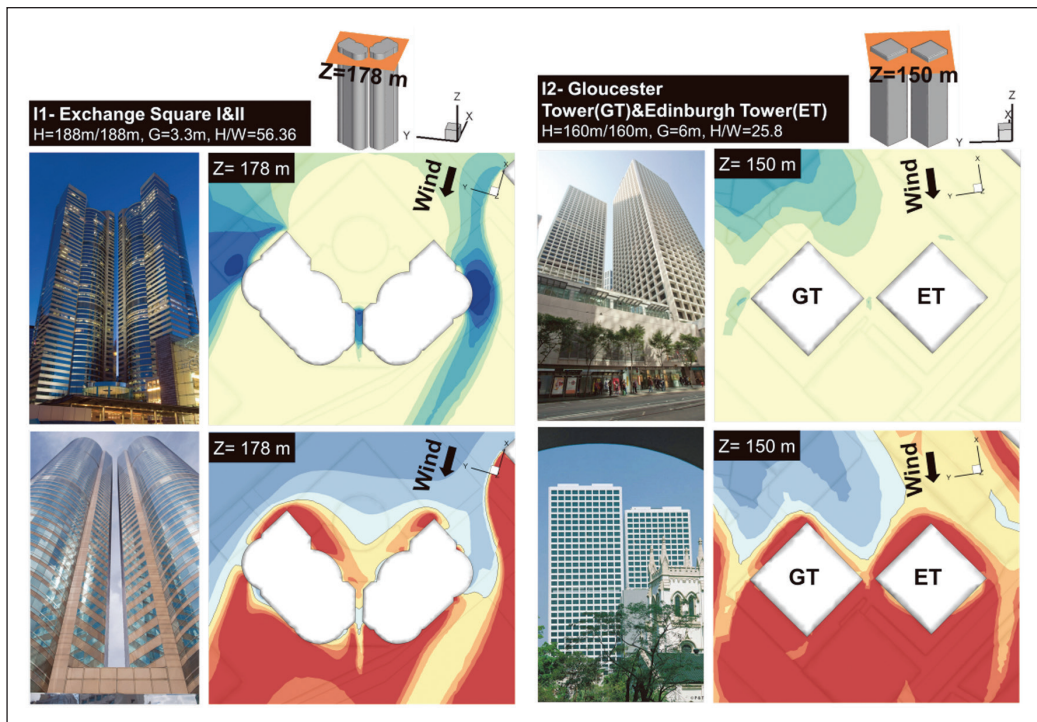


圖 10 數值模擬預測目標建築量體之風能密度與紊流強度分布圖

氣流較迎風面微弱，故下游處建築之風能明顯較上游建築低，並未能產生街谷風速加速效應。

本案例考慮真實城市型態、建築構型與微氣候條件，可由垂直與水平安裝風機評估結果發現因夏季季風風速小於冬季季風，故整體風能評估發現大部分區域之夏季風能密度皆小於 $200 \text{ W/m}^2$ ，而冬季風能產量皆有超過 $200 \text{ W/m}^2$ ，僅有IFC在夏冬兩季所產生之風能都符合商業應用需求[8]。儘管實地量測與應用CFD計算都較為費時，但從本研究結果

可得知CFD模擬對於氣流流動之物理現象有效互動極具重要性，另外由擬真數值模型所模擬的結果可觀察到高層建築之構型設計對氣流分布的影響，可作為未來建築設計用於提升風能潛勢之參考依據。

## 五、結論與未來發展

受惠疫情後歐美國家陸續解封及全球轉單效應及半導體擴廠效應，供應鏈產銷步調與新興高科技應用持續發展，帶動我國整體產業動能強勁，同時也導致全國用電量大幅



成長。故雖然再生能源裝置容量之分子不變，但因分母能源消費總量變大，以致再生能源佔比值並無達到預期。對於政府以再生能源及低碳燃氣發電為主之能源轉型規劃，太陽光電與離岸風能部分仍須持續擴增，才能達到2025年再生能源占比20%之目標。城市風能做為潛在新興綠能雖然尚未被具體規劃於綠能科技產業創新推動方案之中，但本研究結果證明城市風力發電潛能之可發展性，以達擴大SDG 7-可負擔的潔淨能源之目標，藉由城市形態參數設計討論風能利用最大化。本文利用實驗和數值方法以評估城市風能發展於密集城市化區域的初探，期望引起更多各界跨域專家的投入永續城市環境策略與風電發展潛能的研究發展。

## 謝誌

本研究於科技部計畫MOST109-2221-E027-011-MY2支持下完成。

## 參考文獻

1. N.A.a.S.A. (NASA), 2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows, NASA News & Feature Releases, <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20210114/>, 2021.
2. M. Zabarjad Shiraz, A. Dilimulati, M. Paraschivoiu, Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities, *Sustainable Cities and Society* 53 (2020) 101905.
3. A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines, *Energy Conversion and Management* 214(2020) 112770.
4. K.C. Anup, J. Whale, T. Urmee, Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review, *Renewable Energy* 131 (2019) 268-283.
5. B. Li, Z. Luo, M. Sandberg, J. Liu, Revisiting the 'Venturi effect' in passage ventilation between two non-parallel buildings, *Building and Environment* 94 (2015) 714-722.
6. B. Blocken, T. van Hooff, L. Aanen, B. Bronsema, Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect, *Computers & Fluids* 48(1) (2011) 202-213.
7. A.-S. Yang, Y.-M. Su, C.-Y. Wen, Y.-H. Juan, W.-S. Wang, C.-H. Cheng, Estimation of wind power generation in dense urban area, *Applied Energy* 171 (2016) 213-230.
8. Y.H. Juan, C.Y. Wen, W.Y. Chen, A.S. Yang, Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110165.
9. A.-S. Yang, Y.-H. Juan, C.-Y. Wen, C.-J. Chang, Numerical simulation of cooling effect of vegetation enhancement in a subtropical urban park, *Applied Energy* 192 (2017) 178-200.
10. B. Blocken, W.D. Janssen, T. van Hooff, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environmental Modelling & Software* 30 (2012) 15-34.
11. T. Stathopoulos, R. Storms, Wind environmental conditions in passages between buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 24(1) (1986) 19-31.
12. T. Stathopoulos, Wind environmental conditions around tall buildings with chamfered corners, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 21(1) (1985) 71-87.
13. Y.-H. Juan, A.-S. Yang, C.-Y. Wen, Y.-T. Lee, P.-C. Wang, Optimization procedures for enhancement of city breathability using arcade design in a realistic high-rise urban area, *Building and Environment* 121 (2017) 247-261.
14. C.-Y. Kuo, R.-J. Wang, Y.-P. Lin, C.-M. Lai, Urban Design with the Wind: Pedestrian-Level Wind Field in the Street Canyons Downstream of Parallel High-Rise Buildings, *Energies* 13(11) (2020) 2827.
15. T. van Druenen, T. van Hooff, H. Montazeri, B. Blocken, CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed, *Building and Environment* 163 (2019) 106293.
16. Y. Ishida, T. Okaze, A. Mochida, Influence of urban configuration on the structure of kinetic energy transport and the energy dissipation rate, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 183

- (2018) 198-213.
17. W. You, Z. Gao, Z. Chen, W. Ding, Improving Residential Wind Environments by Understanding the Relationship between Building Arrangements and Outdoor Regional Ventilation, *Atmosphere* 8(6) (2017) 102.
  18. W. Wang, Y. Xu, E. Ng, S. Raasch, Evaluation of satellite-derived building height extraction by CFD simulations: A case study of neighborhood-scale ventilation in Hong Kong, *Landscape and Urban Planning* 170 (2018) 90-102.
  19. R. Giridharan, S.S.Y. Lau, S. Ganesan, B. Givoni, Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong, *Building and Environment* 42(10) (2007) 3669-3684.
  20. J. Liu, M. Heidarinejad, S. Gracik, J. Srebric, The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities, *Energy and Buildings* 86 (2015) 449-463.
  21. W.S. Tang, J.W.Y. Lee, T.W. Hui, M.K.C. Yip, The "Urban density" question in Hong Kong: From absolute space to social processes, *City, Culture and Society* 17 (2019) 46-53.
  22. T. Tamura, T. Miyagi, The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83(1) (1999) 135-145.
  23. X. Xu, Q. Yang, A. Yoshida, Y. Tamura, Characteristics of pedestrian-level wind around super-tall buildings with various configurations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 166 (2017) 61-73.
  24. A. Elshaer, G. Bitsuamlak, A. El Damatty, Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization, *Engineering Structures* 136 (2017) 133-148.
  25. F. Toja-Silva, C. Peralta, O. Lopez-Garcia, J. Navarro, I. Cruz, On roof geometry for urban wind energy exploitation in high-rise buildings, *Computation* 3(2) (2015).
  26. I. Abohela, N. Hamza, S. Dudek, Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines, *Renewable Energy* 50 (2013) 1106-1118.
  27. L. Ledo, P.B. Kosasih, P. Cooper, Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, *Renewable Energy* 36(5) (2011) 1379-1391.
  28. Y.-H. Juan, A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, C.-Y. Wen, A.-S. Yang, CFD assessment of wind energy potential for generic high-rise buildings in close proximity: Impact of building arrangement and height, *Applied Energy* 321 (2022) 119328.
  29. Y.-H. Juan, C.-Y. Wen, Z. Li, A.-S. Yang, Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays, *Applied Energy* 299 (2021) 117304.



# 陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐

國立臺北科技大學兼任助理教授、離岸風電工程研究中心計畫經理 / 蘇進國  
國立臺北科技大學特聘教授、離岸風電工程研究中心主任 / 宋裕祺  
國立臺北科技大學土木工程系博士生 / 陳儀諺  
國立臺北科技大學土木工程系碩士生 / 陳致融  
達德能源集團工程規劃部總監 / 林世豪

關鍵字：風力機支撐結構、模態分析、系統識別、健康診斷

## 摘要

本研究利用光纖感測器執行陸域風力機支撐結構的監測工作，希冀有效掌握支撐結構的模態振型與振動頻率變化。研究過程首將簡述陸域風力機之基本組成和規格，並提前進行支撐結構的有限元素模態分析，俾利規劃監測系統各項感測器布設位置與用途。待說明風力機原有運轉監控資料後，隨即針對場址風速超過額定風速之時段，進行塔柱頂部加速度歷時的快速傅立葉轉換，期能求得支撐結構的關鍵振動頻率，後將該時段之加速度歷時進行正規化均方根值運算，藉此比對場址風速、轉子機艙總成方位角與加速

度歷時之關聯性。再者，本研究亦將簡介隨機子空間識別法的基本理論，俾利採用有別於一般結構數值分析方法，另以直接量測所得之訊號評估結構振動反應，完成風力機支撐結構系統識別，並綜合檢討有限元素分析、頻率域頻譜及時間域系統識別之成果，完成陸域風力機健康診斷研究。

## 一、前言

因應全球氣溫急速上升的氣候變化，2021年COP26研擬之氣候協議中[1]，為達成2050淨零碳排的全球共識，已要求世界各國明確提出低碳政策，藉由碳排放占比、碳

中和規劃及方案、減碳機制、列舉優先減碳產業等方式，提升再生能源發電效能及生活產品的低碳供應鏈產量，冀能減少溫室氣體排放並減緩氣候變遷。經濟部能源局於西元2000年發布「風力發電示範系統設置補助辦法」[2]，鼓勵官方及民間企業積極投資陸域風電產業，並於2004年開放民營電廠，而全台至2020年約有400部風力機，迄今已成為重要的再生能源發電來源。惟毋論陸域或離岸風力機，其使用年限多為20~25年，隨著澎湖中屯台電陸域風力機即將於2023年屆齡退役事件發生，對於先期設置之陸域風力機而言，已逐漸面臨設備汰換之議題，而風力機支撐結構之安全性能、運轉維護、除役或延役等事項，實則蔚為現今重要研究課題。

爰此，本研究主要針對陸域風力機支撐結構，進行運轉與服役階段之即時監測研究，期能經由感測器的系統識別方法，完成風力機支撐結構健康診斷之目標，以保障本土化風力發電再生能源的永續經營與發展。

## 二、陸域風力機簡介暨監測系統規劃

### (一) 陸域風力機之組成

如圖1所示，國內常見之陸域風力機若由外觀進行分別，可略分為轉子葉片、輪轂、機艙、塔架、艙門和基礎結構。轉子葉片、輪轂和機艙內部機構常統稱為轉子機艙總成(Rotor-Nacelle Assembly, RNA)；塔架及基

礎結構則是風力機的主要支撐結構。相關組成構件簡述如下：

1. 轉子葉片：國際常見為二葉式與三葉式翼型葉片，惟因輪轂結構平衡力及機械疲勞之穩定性等問題，國內常採三葉式翼型葉片。
2. 輪轂：輪轂位於葉片前方，由轉子連接至機艙，為風力發電設備的重要零件。
3. 機艙：機艙內部由傳動發電機、齒輪調速器、轉向控制系統和相關機電設備組成，常被稱作是「風力機的心臟」，組裝完成重達數百噸。

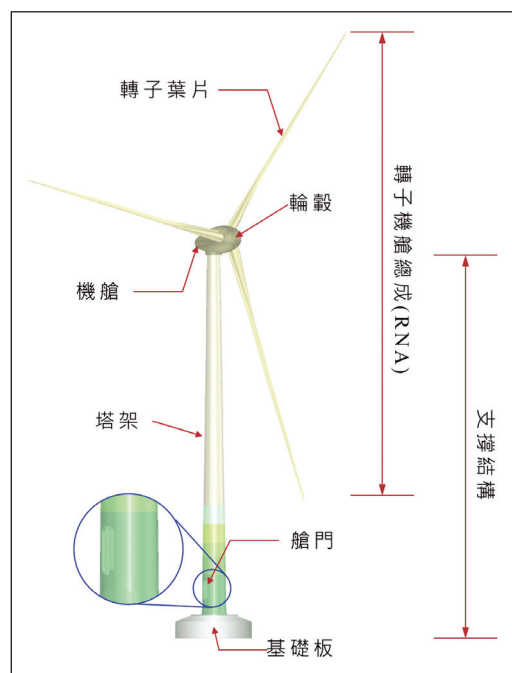


圖 1 陸域風力機組成構件圖



4. 塔架：由不同厚度與直徑之巨型鋼管結構組成，為利葉片轉動，塔架高度常高達數十公尺。
5. 艙門：位於塔架底部，提供運轉維護人員進入風力機內部進行檢修工作。
6. 基礎結構：又稱基座，由鋼筋混凝土構造組成，提供風力機底部完整支承力。

風況下轉動，並得以直接推動後方發電機組，大幅降低齒輪箱系統造成之耗材磨損及能量損耗等問題。

本研究監測之陸域風力機位於臺灣北部西側沿海地區[3、4]，其結構尺寸與基本性能如表1所示。其中，輪轂高度為68.91公尺，轉子葉片掃掠面積約6,648平方公尺，切入風速為2 m/s、切出風速為28~34 m/s，而額定風速達13 m/s時之輸出功率為2,350 kW。

## (二) 監測目標之規格及基本性能

本研究監測對象為市售2.35 MW陸域風力機，該風力機之RNA系統採用直接驅動式之環狀同步發電機（Direct-Drive Annular Synchronous Generator），除有別於大量傳動軸承接連，其內部無齒輪箱之配置，因此旋轉過程中可降低磨耗次數。此外，該系統僅需兩個慢速滾珠軸承，即可使葉片於一般

## (三) 有限元素結構分析求取模態振型與頻率

為瞭解支撐結構振動特性，本研究提前透過有限元素軟體進行分析，探討結構振動模態變化與反曲點概略位置，分析結果如圖2所示。根據初步分析結果顯示，風力機之正向（Fore-Aft）與側向（Side-Side）結構頻率

表 1 本研究監測目標之規格及基本性能

項目	內容說明
風力機類型	陸域
額定功率 (Rated power)	2,350 kW
輪轂高度 (Hub height)	68.91 m
輪轂高度可承受之極端風速	3 秒最大陣風：59.5 m/s
轉子直徑 (Rotor diameter)	92 m
轉子葉片掃掠面積 (Swept area)	6,648 m <sup>2</sup>
葉尖速度 (Tip speed)	81.89 m/s
轉子速率 (Rotor Speed)	5~17 rpm
切入風速 (Cut-in wind speed)	2 m/s
額定風速 (Rated wind speed)	13 m/s
切出風速 (Cut-out wind speed)	28~34 m/s (暴風情境)

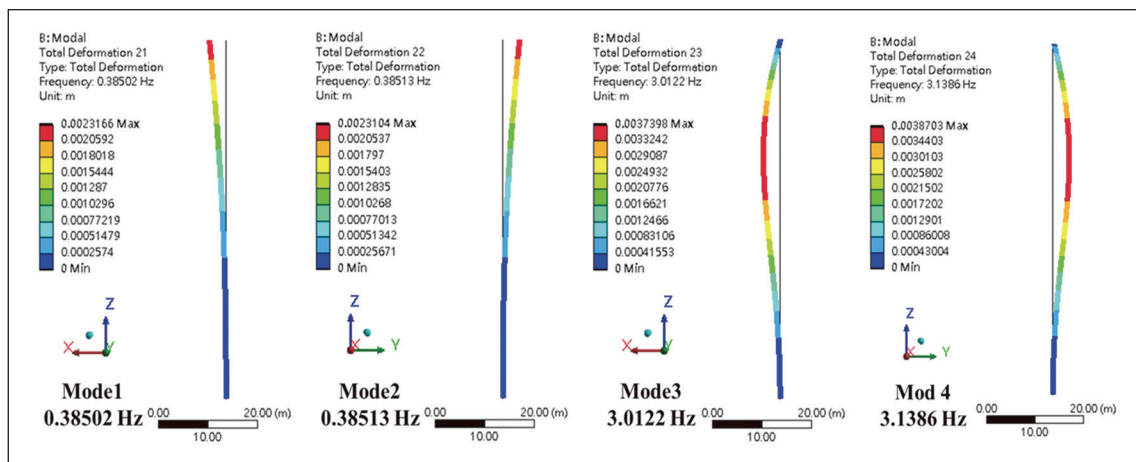


圖 2 風力機支撐結構梁元素模態分析結果

為0.38502 Hz及0.38513 Hz，可定義為風力機塔架的雙向第一振動模態；雙向第二模態各為3.0122 Hz及3.1386 Hz，且反曲點約為塔架結構之2/3~3/4處。

據此，本研究進行監測儀器布設前，冀能藉由監測數據研析風力機支撐結構的前兩個振動模態，而風力機塔柱高度約為67.335公尺，艙門底部距地表約3.514公尺，艙門進入後已擺放各式機構且無安置儀器空間，因此監測點布設以能夠裝設的最低和最高為基礎，儘量均布架設各式儀器，俾求完整量測各振動模態振型，並求得相對應的振動頻率。

#### (四) 陸域風力機支撐結構監測系統規劃

根據前述陸域風力機之組成可知，其主

要支撐結構為鋼製塔架及混凝土基座。鋼製塔架聳立於高空中，相關振動模態與振動頻率近似於單柱式結構的動態行為，惟須特別考量RNA追風轉向、偏心載重變化和不同轉子葉片轉速改變所造成的轉動慣量。基於前述因素，本研究參考國際期刊所示之案例，於塔架不同高度的塔身處，設置五個不同高程點位的兩向（又稱為X、Y向）加速度計，監測點①之高程為EL. 59.535 m、監測點⑤之高程為EL. 10.48m，此五點位置均以人力所能觸及並且不干擾風力機正常運維動線為主，亦儘量由塔柱底部至頂部均勻分布，監測點位與距地面高程關係如表2所示。其中，監測點⑤中的儀器配置，除雙向加速度計之外，亦設置一組溫度計和四組應變計（如圖3），溫度計用於記錄塔柱內部溫度變化，應變計則裝設於塔柱底部間隔90度之方位，除可用於觀察鋼材之應變變化，亦可藉由偏



表 2 監測儀器配置總表

項目	距地面高程	儀器配置
監測點①	59.535 m	X、Y 向加速度計
監測點②	44.55 m	X、Y 向加速度計
監測點③	28.57 m	X、Y 向加速度計
監測點④	18.255 m	X、Y 向加速度計
監測點⑤	10.48 m	X、Y 向加速度計、四組應變計、溫度計

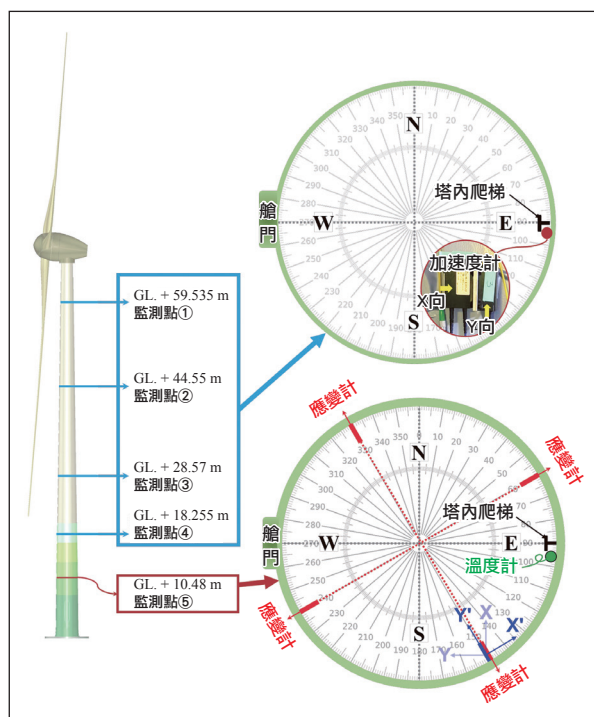


圖 3 監測儀器裝設位置

心載重位置的推估過程，間接求得RNA的轉向方位。

此外，針對監測儀器與設備部分，有別於一般電子式儀器，本研究主要採用光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)感測器進行規劃，包含加速度計、應變計和溫度計等共15

個感測器（如表3）。於現地即時監測取得數據後，本研究透過資料擷取器將FBG感測器資訊先儲存於現地工業電腦，後由4G網路傳送至雲端監測系統，俾利監測人員即時取得監測資料。另為保障工業電腦及資料擷取器之正常運作，現地電力系統配置不斷電設備，並將資料擷取器、工業電腦和不斷電系



表 3 監測儀器及設備統計

編號	儀器與設備品名	數量
1	光纖光柵加速度計(單軸向)	10 個
2	光纖光柵應變計	4 個
3	光纖光柵溫度計	1 個
4	工業電腦(含 CPU 及監測資料儲存碟)	1 台
5	4G 網路模組	1 組
6	不斷電系統	1 台
7	資料擷取器	1 台
8	不鏽鋼觀測箱	1 個

統放置於不鏽鋼觀測箱中，同步保障設備財產安全。

### 三、監控及監測數據分析及比對

#### (一) 運轉監控資料說明與分析

常見之市售陸域風力機均設置資料採集與監控系統(Supervisory Control and Data Acquisition System, SCADA)，其可視為風力機之「神經中樞」，主要用於監控風力機的運轉狀態。SCADA常以每 10 分鐘為間隔，記錄風力機場址風速、轉速、發電功率、RNA轉向、累積產能時數和異常狀態等資料，除提供歷史紀錄外，亦得供為風力機製造商日後研發或修訂產能曲線的重要依據，並為控制機艙轉向和葉片角度的主要來源。綜觀相關參數定義中，又以風力機的切入風速、額定風速和切出風速等規格最為重要。

根據前述監測目標之規格及基本性能可知，待測風力機之切入風速為2 m/s、額定風速達13 m/s，因此本研究先將SCADA記錄得之場址風速(Wind Speed, WS)進行分類如下：

##### 1. WS1：0 < WS ≤ 2 m/s。

該場址風速下，風力機呈現怠速狀態，此時葉片角度未控制轉動，風力機亦無產能。

##### 2. WS2：2 < WS ≤ 13 m/s。

風力機藉由場址風速提高而開始轉動，風能轉換器亦開始運轉並產出能源。

##### 3. WS3：WS > 13 m/s。

場址風速達到額定風速，RNA內部各項控制器藉由管制轉速、葉片旋轉角或煞車系統等，控制風力機穩定發電。

分類說明完成後，本研究針對本土冬季

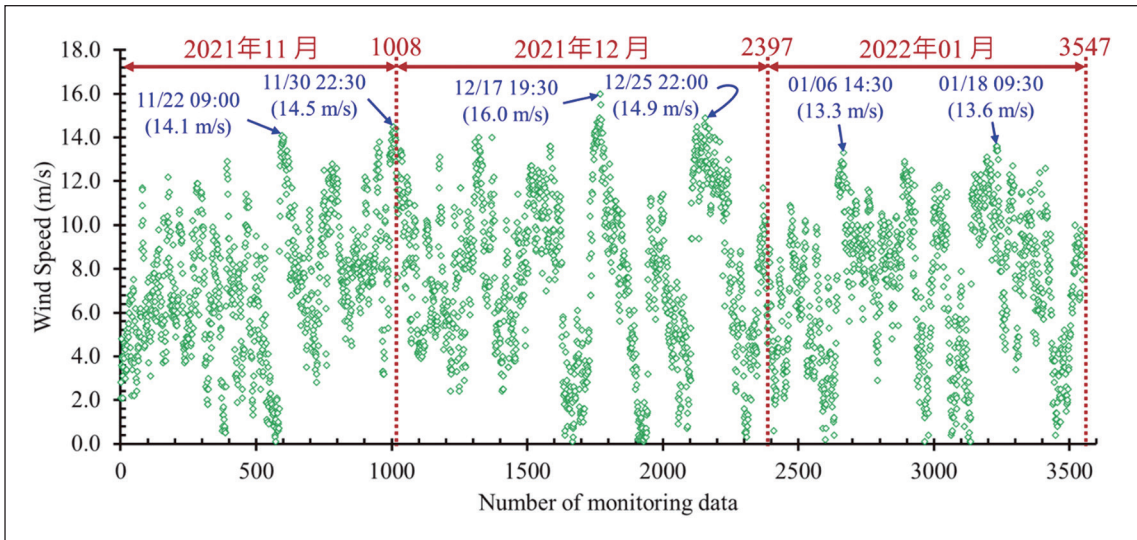


圖 4 SCADA 記錄得之監測期間場址風速分布圖

監測期間（2021年11月~2022年1月）之運轉監控資料進行場址風速彙整，可求得如圖4所示之隨時間推進的風速變化分布圖。觀察圖中可發現：(1) 2021年11月份共記錄有效資料1,008筆資料；(2) 2021年12月份記錄1,389筆、總累積筆數為2,397；(3) 2022年1月份記錄1,150筆、總累積筆數為3,547。再者，場址於各月份之最大風速中，11月份為14.5 m/s、12月份為16 m/s、1月份為13.6 m/s，顯示場址於冬季的每月最大風速都超過額定風速，並達到前述WS3分類狀態。

## (二) 場址風速超過額定風速之塔柱頂部加速度監測數據分析

本節將針對圖4所示之6個場址風速超過

額定風速時段，利用前述監測點位①的X向加速度監測數據，進行快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform, FFT），並說明陸域風力機器的各種振動頻率反應。

首先，本研究監測數據的取樣頻率為100 Hz，以SCADA每10分鐘間隔之監控資料為例，相對應之10分鐘監測數據有 $100 \times 60 \times 10 = 60,000$ 筆，數據資料量十分龐大。為利數值分析成效，本研究採用VBA（Visual Basic for Applications）進行資料批次處理與分析，經資料切割、擷取與執行FFT研析後，可求得6個場址風速超過額定風速期間（如圖5所示）的塔柱頂部振動頻率與振幅關係圖。值得注意的是，由圖中可發現三個具有物理意義的主要振動頻率，依序分別為0.284 Hz、

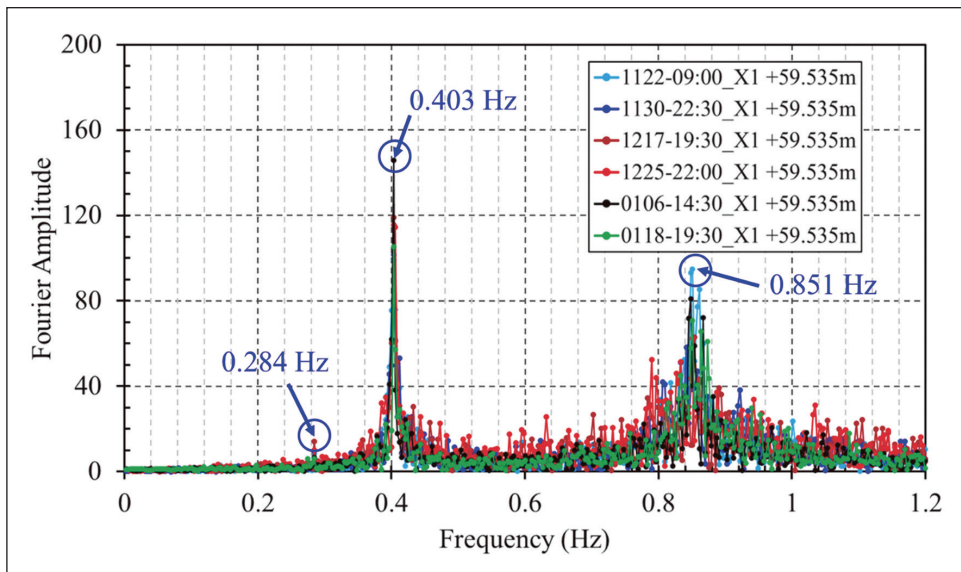


圖 5 監測點①加速度歷時經快速傅立葉轉後結果

0.403 Hz 和 0.851 Hz，相關說明如下：

1. 0.284 Hz：根據風力機之規格及基本性能顯示，其轉子速率介於 5~17 rpm 之間，轉子所造成之振動頻率（Rotor Frequency，又稱為 1P）約為 0.083~0.283 Hz。此分析結果顯示，當場址風速超過額定風速時，風力機的 1P 振動頻率上限值大概可藉由塔頂加速度反應求得。
2. 0.403 Hz：此振動頻率稱為塔柱模態（Tower Mode），其值與前述由有限元素結構分析初步求得之正向與側向結構第一振態頻率（0.38502 Hz 及 0.38513 Hz）相近，亦可由後續系統識別結果求得，並可藉此相互驗證監測成果的正確性。

3. 0.851 Hz：如同前述說明，風力機轉子速率介於 5~17 rpm 之間時，三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（Blade-Passing Frequency，又稱為 3P）約為 0.250~0.850 Hz。因此，該頻率係為 3P 振動頻率之上限值。

### （三）塔柱頂部兩向加速度監測數據與場址風速監控資料比對

為觀察塔柱振動加速度及場址風速之關聯性，本節利用第 3.1 節的場址風速分類原則，先將監測及監控資料進行劃分，俾利研析風力機於惰轉至高速運轉下的振動反應。分析比對前，為避免感測器量測單位之影響，本研究針對場址風速監控資料，以不同



風速區間之監控平均值為基準，進行無因次正規化運算。另一方面，對於塔柱頂部兩向加速度監測數據，則是參考國際研究之作法，採用加速度的均方根值（Root Mean Square, RMS）進行計算，其後亦以不同風速區間之加速度均方根值的平均值為基準，對監測資料再次執行無因次正規化運算，俾利

尋求兩者的關聯性。其中，加速度的均方根值計算公式如下：

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n-1}^2 + x_n^2}{n}} \quad (1)$$

圖6~8為不同風速範圍下，塔柱頂部水平兩向加速度監測數據經均方根及正規化

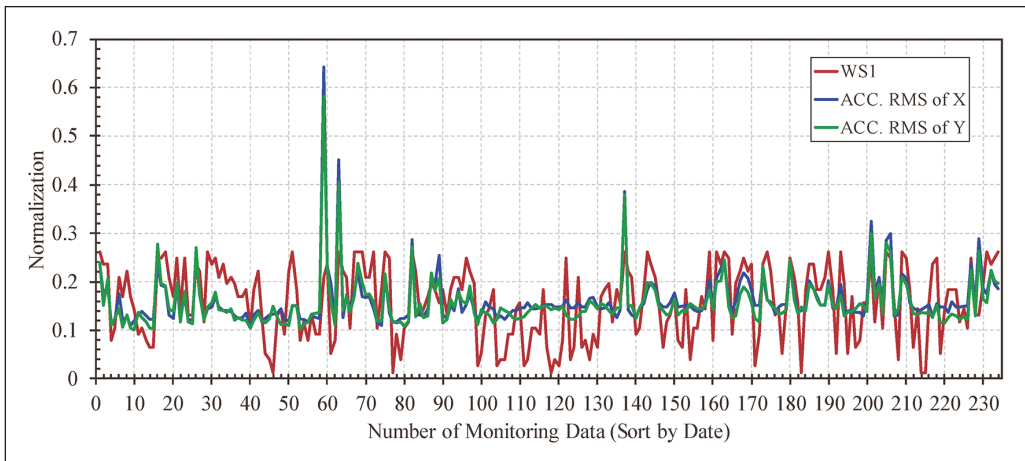


圖 6 WS1 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

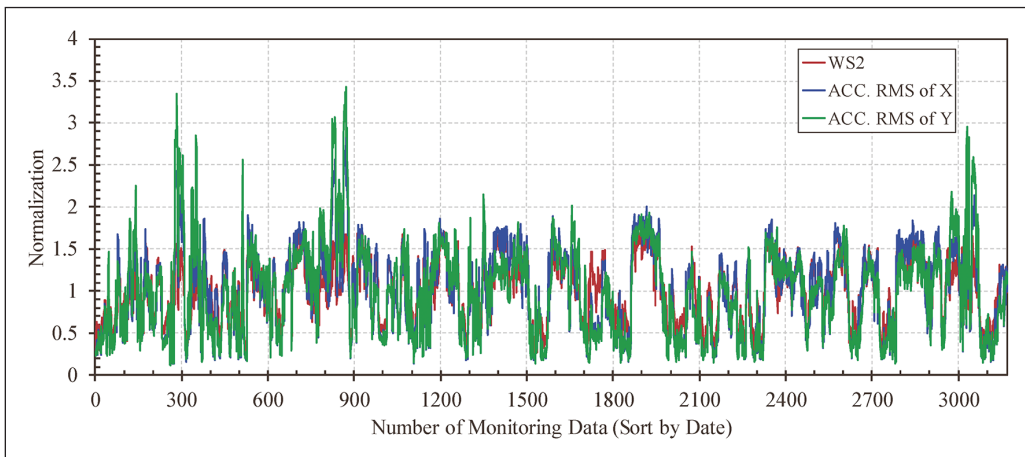


圖 7 WS2 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

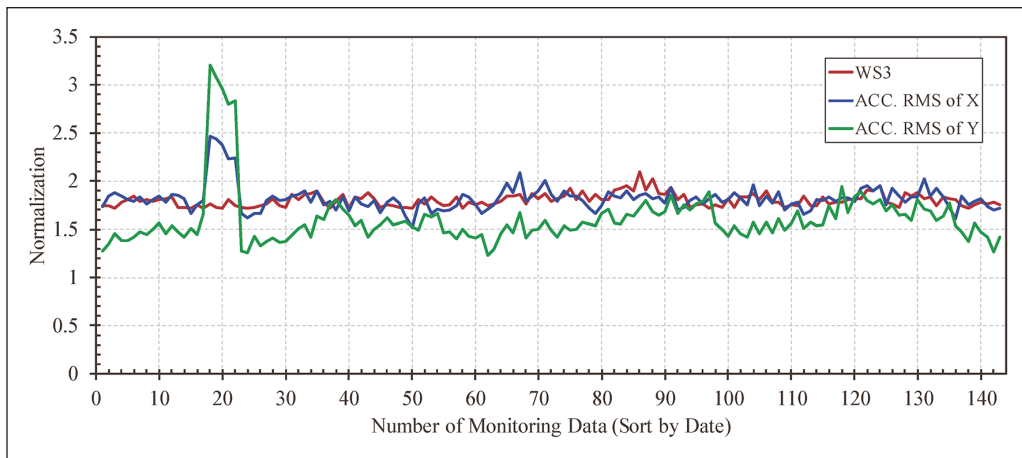


圖 8 WS3 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

運算後（圖例編號為ACC. RMS of X and Y），與正規化風速分布趨勢（圖例編號為WS1~WS3）之套疊比較圖。於圖6中，當場址風速為WS1： $0 < WS \leq 2$  m/s時，風力機未發電，塔柱頂端水平兩向加速度反應相近，但與風況變化未具明顯相關性；另於圖7中，當場址風速為WS2： $2 < WS \leq 13$  m/s時，風力機以不同功率進行發電，除塔柱頂端水平兩向加速度反應相近之外，亦與風況變化產生極度正相關；而圖8顯示，當場址風速為WS3： $WS > 13$  m/s時，風力機以穩定的額定功率進行發電，雖塔柱頂端水平兩向加速度數值略有差異之外，其發展趨勢仍與風況維持相當的關聯性。

#### （四）塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角監控資料比對

本節利用前節所述之塔柱頂部兩向加速

度監測數據的RMS，以及SCADA監控資料所記載之RNA方位角，疊代至圖9所示的羅盤方位，冀能窺探本土風力機於冬季捕風的方向性。

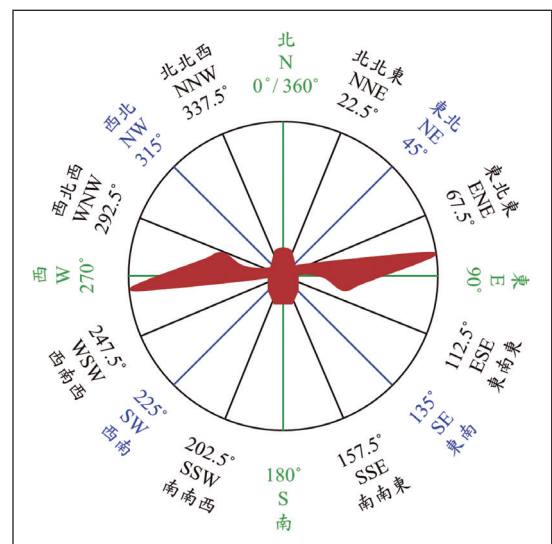


圖 9 陸域風力機俯視圖-16個羅盤方位與真方位角



圖10~12為不同風速範圍下，塔柱頂部水平兩向加速度監測數據經均方根運算後（圖例編號為ACC. RMS of X and Y），與RNA方位角分布趨勢（圖例編號為WS1~WS3）的套疊比較圖。於圖10中，當場址風速為WS1： $0 < WS \leq 2$  m/s時，機艙方位角顯示風向來自四面八方，與塔柱頂部兩向加速度無明顯關聯性；另於圖11中，當場址風速為WS2： $2 < WS \leq 13$  m/s時，因風力機之設計係採迎風策略，資料顯示RNA遍佈於 $0^\circ \sim 120^\circ$ 的方向（正北至東南東方向），塔柱頂端水平兩向加速度反應亦與RNA角度發展趨勢一致；而圖12顯示，當場址風速為WS3： $WS > 13$  m/s時，RNA方位角集中於 $15^\circ \sim 45^\circ$ 的方向（北北東至東北方向），塔柱頂端水平兩向加速度與其方位角呈現趨勢一致。

此外，根據監測結果顯示，風力機的

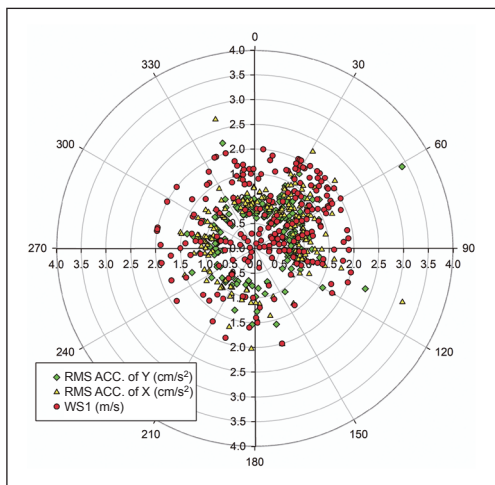


圖 10 WS1 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

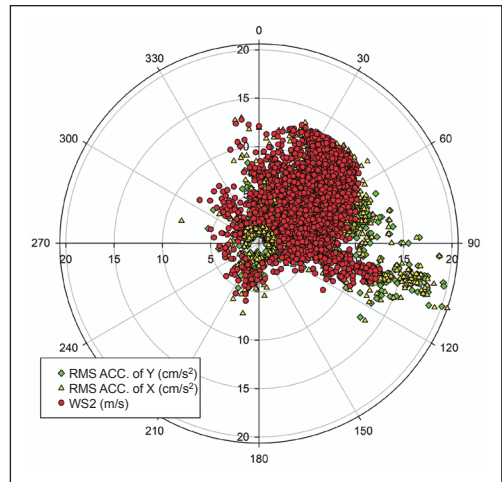


圖 11 WS2 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

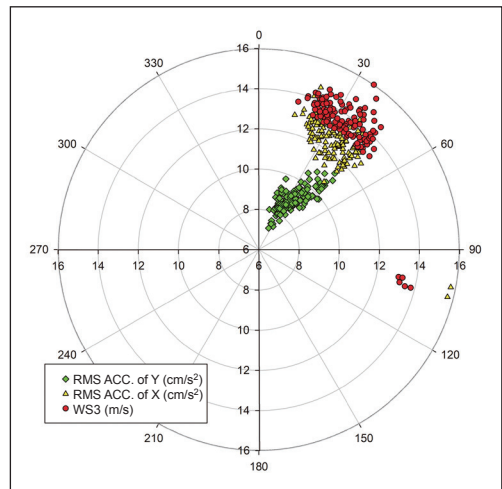


圖 12 WS3 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

RNA方位角與本土冬季風況特性相近，當風速很小時（ $WS \leq 2$  m/s），風可能來自各個方向，但伴隨風速加大時，風向大多來自東北方，符合西部沿海地區於冬季東北季風侵襲期間的氣候特性。



#### 四、隨機子空間識別法於結構監測之應用

##### (一) 隨機子空間識別法基本理論

隨機子空間識別法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) 係從統計學、線性代數和系統理論等發展而來，主要用於時間域分析，可直接利用量測所得之訊號，評估待測物體的結構振動反應，與經由結構分析所得振動模態的傳統方法不同，適合用於結構細部資訊不明或變數過多的模態分析之上[5]。

根據Brincker和Andersen [6]研究指出，當系統的隨機反應定義為時間的函數時，連續時序下的系統反應 $y(t)$ 可表示為：

$$y(t) = \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中， $m$ 為量測通道數 (Number of measurement channels)。若以 $M$ 、 $D$ 和 $K$ 分別代表質量、阻尼和勁度矩陣，另以 $f(t)$ 代表載重向量 (也是系統輸入值)，則由結構動力學的經典公式，可將多自由度的結構系統表示如下：

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad (3)$$

為將此連續時間之公式帶入離散時間域，可適當引用狀態時間方程式：

$$x(t) = \begin{Bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中，已帶入系統工程的概念，而 $x(t)$ 代表狀態，其與系統的輸入 $f(t)$ 不同。若將連續時間的系統矩陣 $A_c$ 和載重轉換矩陣 $B$ 帶入 $x(t)$ 的一次微分，並以 $C$ 為輸出影響矩陣，則可求得：

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B f(t) \quad (5)$$

$$f(t) = C x(t) \quad (6)$$

式中， $A_c$ 和 $B$ 可表示為：

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此公式之優點為通解可直接求得，例如Kailath [7]提出：

$$x(t) = \exp(A_c t)x_0 + \int_0^t \exp(A_c(t-\tau))Bf(\tau)d\tau \quad (8)$$

前式的第一項次係為齊性解 (Homogeneous Solution)，第二項次屬於特殊解 (Particular Solution)。為於離散時間域使用該方程式，可帶入變數 $y_k = y(k\Delta t)$ ，則齊性解可表示為：

$$x_k = \exp(A_c k\Delta t)x_0 = A_d^k x_0 \quad (9)$$

$$A_d = \exp(A_c \Delta t) \quad (10)$$

$$y_k = C A_d^k x_0 \quad (11)$$

式中， $A_d$ 為離散時間的系統矩陣。另一方面，在漢克爾矩陣 (Hankel Matrix) 的定



義中，離散時間下的系統反應常由資料矩陣 (Data Matrix) 表示如下：

$$y(t) = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N] \quad (12)$$

上式中， $N$  為資料點數。若移除最後  $k$  個資料點，資料矩陣可表示為  $Y_{(1:N-k)}$ ；同理，若移除一開始的  $k$  個資料點，資料矩陣可表示為  $Y_{(k:N)}$ 。則  $k$  個時間延滯時的可信賴矩陣運算可表示如下：

$$\hat{R}_k = \frac{1}{N-k} Y_{(1:N-k)} Y_{(k:N)}^T \quad (13)$$

值得討論的是，SSI中的區塊漢克爾矩陣  $Y_h$  (Block Hankel Matrix) 僅為一系列矩陣的集合，主要透過移動資料矩陣為主，常表示如下：

$$Y_h = \begin{bmatrix} Y_{(1:N-2s)} \\ Y_{(2:N-2s+1)} \\ \vdots \\ Y_{(2s:N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{hp} \\ Y_{hf} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中， $Y_{hp}$  代表過去輸出矩陣， $Y_{hf}$  代表未來輸出矩陣， $2s$  代表區塊的列數， $N-2s$  為行數，而總量測通道數  $m$  下的列數為  $2sM$ 。再者，進行隨機反應分析時，常將未來輸出矩陣投影至過去輸出矩陣之上：

$$O = E(Y_{hf} | Y_{hp}) \quad (15)$$

此公式可利用協方差 (Covariance) 改寫如下：

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp} \quad (16)$$

一般而言，投影矩陣  $O$  的大小為  $sM \times sM$ ，若利用公式(9) ~ (11)之計算方式，可另將投影矩陣  $O$  之每行  $O_{col}$  表示為：

$$O_{col} = \Gamma_s x_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA_d \\ CA_d^2 \\ \vdots \\ CA_d^{s-1} \end{bmatrix} x_0 \quad (17)$$

式中， $\Gamma_s$  稱為觀測矩陣。在卡爾曼狀態 (Kalman State) 中，簡化投影矩陣  $O$  每行的初始條件，並假設  $X_0$  矩陣代表無時間遲滯 (Time Lag) 的卡爾曼狀態，可得：

$$O = \Gamma_s X_0 \quad (18)$$

當觀測矩陣  $\Gamma_s$  為已知時，即可利用此公式求得所有的卡爾曼狀態，但觀測矩陣  $\Gamma_s$  為未知時，則需進一步利用奇異值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 完成投影矩陣  $O$  分解：

$$O = USV^T \quad (19)$$

式中， $U$  為左奇異向量矩陣， $S$  為奇異值對角矩陣， $V$  為右奇異向量矩陣。藉由此式所得之奇異值分解結果，若再執行狀態空間分析，即可求得觀測矩陣與卡爾曼狀態：

$$\hat{\Gamma} = US^{1/2} \quad (20)$$



$$\hat{X}_0 = S^{1/2}V^T \quad (21)$$

而離散時間狀態空間的系統矩陣 $A_d$ 和輸出影響矩陣 $C$ ，即可藉由觀測矩陣的區塊運算求得：

$$\hat{\Gamma}_{(2:s)} \hat{A}_d = \hat{\Gamma}_{(1:s-1)} \quad (22)$$

$$\hat{C} = \hat{\Gamma}_{(1:1)} \quad (23)$$

最後於結構模態分析和實際運算部分，經針對系統矩陣 $A_d$ 進行特徵值分解：

$$A_d = \Psi[\mu_i]\Psi^{-1} \quad (24)$$

式中， $\Psi$  為特徵向量矩陣， $\mu_i$  為離散時間極點， $[\mu_i]$  代表  $A_d$  之特徵值矩陣。則連續時間極點  $\lambda_i$  可由下式求得：

$$\mu_i = \exp(\lambda_i) \quad \lambda_i = \ln(\mu_i) / \Delta \quad (25)$$

則角速度 $\omega_i$ 、頻率 $f_i$ 及模態的阻尼比 $\xi_i$ 可計算如下：

$$\omega_i = |\lambda_i| \quad (26)$$

$$f_i = \omega_i / 2\pi \quad (27)$$

$$\xi_i = \text{Re}(\lambda_i) / |\lambda_i| \quad (28)$$

最後，系統模態振形 $\Phi$ 即可由輸出影響矩陣 $C$ 與特徵向量矩陣 $\Psi$ 求得：

$$\Phi = C\Psi \quad (29)$$

## (二) 模態分析基本原理與說明

模態分析之目的係為求得待測結構的自然振動頻率、阻尼比和模態振型，常見方法有實驗模態分析（Experimental Modal Analysis, EMA）和操作模態分析（Operational Modal Analysis, OMA）。

EMA主要假設結構為彈性且其性質不隨時間發生變化，並利用外力激發結構產生振動反應，藉由外力的輸入訊號及結構反應之輸出訊號即可完成分析。分析過程需利用快速傅立葉轉換，將輸出訊號由時間域轉為頻率域，再由頻率域輸出訊號除以輸入訊號，藉此計算系統轉換函數，並得以評估結構模態相關參數。此方法的主要限制條件為輸入與輸出訊號均需同步量測，對於外力來源不明或難以量測者，仍具有發展空間。

OMA最大優勢為不需外力等之輸入訊號，僅利用結構反應的輸出訊號即可進行分析，惟其針對模態參數之求取難度較高，亦需投入相當學術理論和分析經驗。採用OMA前，因量測結構反應的輸出訊號常受各種環境因素影響，其訊號可能存在一定程度的誤差，故需要進行訊號的前處理工作，如零平均（Zero-Mean）、自相關函數（Autocorrelation Function）計算、交叉相關函數（Cross-correlation Function）計算等，之後再利用快速傅立葉轉換，將時間域的量測資料轉換至頻率域，或直接採用前述SSI之



方法，可求得結構振動模態及相關資訊。

本研究待測目標為陸域風力機，現地裝設監測儀器時，根據安全作業標準，整體風力機必須停機方能進入塔柱內部施工。爰此，結構反應的輸出訊號係由RNA不轉動開始記錄，對於參考OMA精神所進行之SSI模態分析，具有一定的助益。

### (三) 隨機子空間識別法之未加權主成分擴展

常見的隨機子空間識別法之中，時間域的資料導向分析方法有5種[8]：(1)未加權主成分（Unweighted Principal Components, UPC）；(2)未加權主成分擴展（Extended Unweighted Principal Components, UPCX）；(3)主成分（Principal Components, PC）；(4)典型相關分析（Canonical Variate Analysis, CVA）；(5) UPC合併資料集。本研究主要採用未加權主成分擴展進行分析，並將該法簡稱為SSI-UPCX。

主成分分析（PC）主要係針對多維數據進行降維動作，同時保留資料集貢獻最大的特徵，進而有效尋找資料中的關鍵元素和主結構，隸屬一種應用分差分解的分析方法，而UPC則是未使用權重進行評估。SSI-UPCX係藉由增加自然振動頻率、阻尼比和複雜模態振型信賴界（Confidence Bounds）等之不確定性的計算，擴展了UPC的功能，並具有

以下三點優勢：

1. 相較於傳統採用數據平均值(mean value)概念，此法可更準確掌握模態參數。
2. 可有效過濾雜訊所引致的誤導模態（Noise Mode）和不穩定模態（Unstable Mode）。
3. 因加入不確定性分析計算過程，可使結構模態參數及健康診斷的可靠度提升。

爰此，本研究將採用SSI-UPCX，針對前述加速度光纖感測器於現地量測陸域風力機之監測成果，進行時間域加速度歷時分析，俾利求得風力機於運轉過程的可信賴模態振型。

## 五、基於隨機子空間識別法之系統識別

### (一) 系統識別結果表列說明

為釐清監測期間風力機之第一、第二振動頻率，本節將延續第3.2節做法，針對圖4所示之6個場址風速超過額定風速之時段，先將各時段不同高程之加速度數據區分為X向與Y向資料集，並各自採用SSI-UPCX進行系統識別（如表4、表5所示），待確認各頻率之範圍後，再將SCADA記錄之場址風速結合監測期間SSI-UPCX頻率識別結果進行研析比對。

表 4 高風速時段 X 向 SSI-UPCX 分析結果

高風速時段		2021 11/22 09:00	2021 11/30 22:30	2021 12/17 19:30	2021 12/25 22:00	2022 01/06 14:30	2022 01/18 09:30
區段	頻率範圍 (Hz)	SSI-UPCX 計算所得振動頻率					
1	0.4~0.5	0.403	0.405	0.403	0.404	0.403	0.404
2	0.8~0.9	0.847	0.845		0.828	0.846	0.851
3	1.6~1.7	1.699	1.694			1.685	
4	1.7~1.8			1.711	1.718		1.707
5	1.8~1.9		1.852				
6	1.9~2.0	1.984			1.934		
7	2.5~2.6	2.553	2.568		2.595	2.554	2.552
8	2.6~2.7			2.601			
9	2.7~2.8	2.729	2.74	2.776	2.723	2.759	2.709
10	3.0~3.1	3.049	3.06	3.098		3.066	3.057

表 5 高風速時段 Y 向 SSI-UPCX 分析結果

高風速時段		2021 11/22 09:00	2021 11/30 22:30	2021 12/17 19:30	2021 12/25 22:00	2022 01/06 14:30	2022 01/18 09:30
區段	頻率範圍 (Hz)	SSI-UPCX 計算所得振動頻率					
1	0.4~0.5	0.403	0.406	0.399	0.407	0.408	0.405
2	0.8~0.9	0.872	0.875	0.868	0.861	0.855	0.878
3	1.7~1.8	1.703		1.762		1.714	1.733
4	1.8~1.9	1.82			1.823		
5	1.9~2.0	1.936					1.944
6	2.1~2.2	2.115		2.14			
7	2.2~2.3					2.243	
8	2.5~2.6	2.544	2.579	2.534		2.549	2.522
9	2.7~2.8	2.783	2.781	2.773	2.77	2.772	2.708
10	2.9~3.0			2.941			2.954
11	3.0~3.1	3.06	3.023	3.07	3.053		3.099

表4為6個高風速時段X向SSI-UPCX分析結果，若以0.1 Hz頻率間格區分振動頻率範圍，每個高風速時段均具有高識別率的頻率範圍可被過濾並求得：(1)區段1，頻率範圍為0.4~0.5 Hz，6個時段均可求得；(2)區段2，頻率範圍為0.8~0.9 Hz，5個時段可求取；

(3)區段7，頻率範圍為2.5~2.6 Hz，5個時段可求取；(4)區段9，頻率範圍為2.7~2.8 Hz，6個時段均可求得；(5)區段10，頻率範圍為3.0~3.1 Hz，5個時段可求取。

透過X向SSI-UPCX分析結果，在區



段1中，可發現各時段的振動頻率約為0.403~0.405 Hz，近似於有限元素模態分析中的第一模態，亦與前述快速傅立葉轉換所得之塔柱模態結果一致。在區段2中，可發現各時段的振動頻率約為0.828~0.851 Hz，其近似於三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（3P）上限值（0.850 Hz）。在區段7與區段9中，兩者於各高風速時段的振動頻率約為2.552~2.595 Hz和2.709~2.776 Hz。在區段10中，可發現各時段的振動頻率約為3.049~3.098 Hz，近似於有限元素模態分析中的第二模態。

另根據表5之Y向SSI-UPCX分析結果顯示，每個Y向具有高識別率的頻率範圍為：

- (1)區段1，頻率範圍為0.4~0.5 Hz，6個時段均可求得；
- (2)區段2，頻率範圍為0.8~0.9 Hz，6個時段均可求得；
- (3)區段8，頻率範圍為2.5~2.6 Hz，5個時段可求取；
- (4)區段9，頻率範圍為2.7~2.8 Hz，6個時段均可求得；
- (5)區段11-頻率範圍為3.0~3.1 Hz，5個時段可求取。

透過Y向SSI-UPCX分析結果，可發現具有高識別率的5個頻率區段，其結果與X向結果相近。首先，於區段1之各時段的振動頻率，近似於有限元素模態分析中的第一模態及FFT轉換所得之塔柱模態。再者，區段11之各時段的振動頻率，與有限元素模態分析的第二模態相近，另外在區段2、區段8、區段9之各時段的振動頻率，亦與表4中區段2、

區段7、區段9結果相近。據此，可驗證本研究布設之X向與Y向加速度感測器能有效量測風力機實際振動反應，並得與有限元素模態分析結果交互比對，求出風力機之第一、第二振動頻率。

## （二）場址風速資料與X向SSI-UPCX頻率識別之關係

根據前節高風速時段之頻率區間分析結果，本研究透過SCADA記錄之風速資料以及監測期間之SSI-UPCX頻率結果進行彙整，可得圖13監測期間風速與振動頻率之關係圖。其中，0.35~0.45 Hz淡紅色透明區域，係為風力機支撐結構之第一振動頻率；另當場址風速達到額定風速後，圖中顯示3P之振動頻率約於0.850 Hz，與圖5之FFT研析成果吻合。此外，在縱軸3.0~3.2 Hz區間，亦可觀察到風力機支撐結構之第二振動頻率，此頻率隨風速增加而有遞增之現象。

## 六、結論與建議

本研究採用光纖感測器監測陸域風力機支撐結構於冬季之振動反應，除利用傳統的有限元素法進行結構模態分析之外，亦由加速度歷時的FFT結果求取頻率域上主要振動頻率，並以加速度歷時均方根值比對場址風速特性，確保監測數據的正確性。最後，利用驗證後之監測數據，以SSI-UPCX系統識別法求取支撐結構的主要振動頻率與振型。相

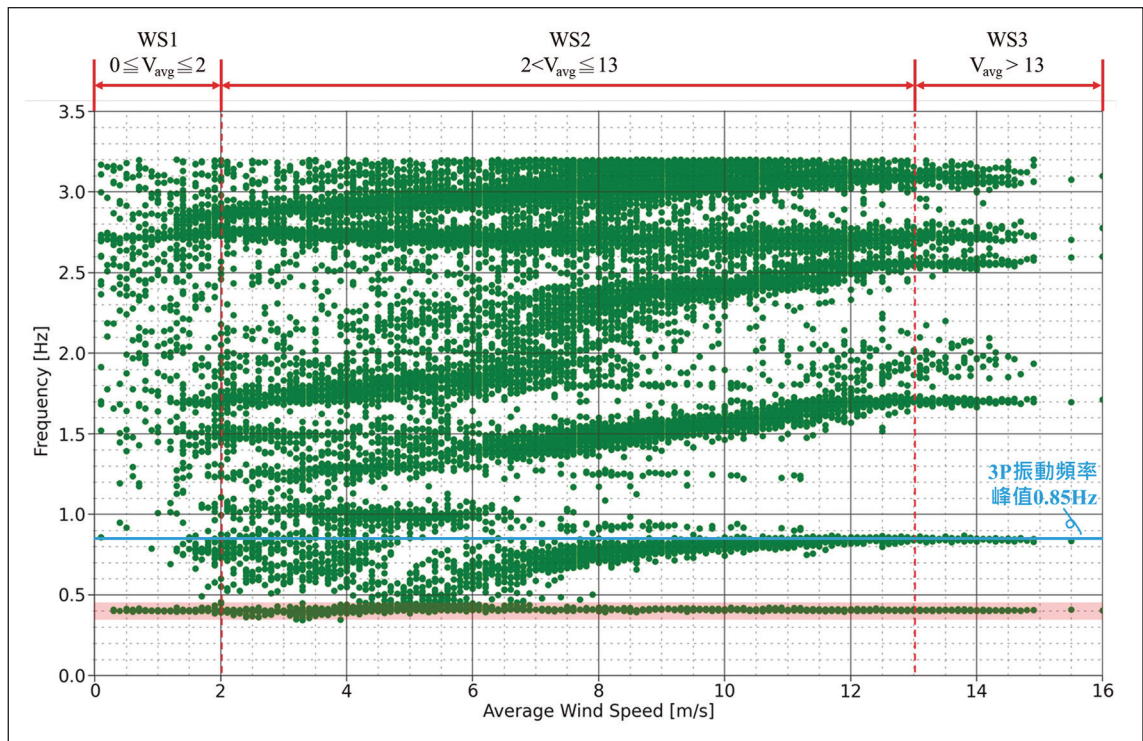


圖 13 場址風速資料與 X 向 SSI-UPCX 之頻率關係 (0~5 Hz)

關結論與建議彙整如下：

1. 風力機轉子速率介於5~17 rpm之間，轉子所造成之振動頻率（1P）約為0.083~0.283 Hz，而三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（3P）約為0.250~0.850 Hz。
2. 根據支撐結構的有限元素模態分析結果顯示，塔柱正向與側向第一振態頻率為0.38502 Hz及0.38513 Hz，而兩向第二模態各為3.0122 Hz及3.1386 Hz，且第二模態振型的反曲點高度約為塔架2/3~3/4處。
3. 風力機正常運轉發電狀態下，塔柱頂部水平兩向加速度歷時之正規化均方根值與場址風速及RNA方位角分布趨勢高度相似，可驗證監測資料的正確性。
4. 經由監測資料的SSI-UPCX分析結果可知，當場址風況達額定風速時，X向與Y向所識別之振態區間，與塔柱第一振態頻率（0.385 Hz）、3P上限值（0.850 Hz）和塔柱第二振態頻率（3.01 Hz）結果相近，然而透過監測期間之SSI-UPCX頻率分析以及SCADA風速資料所彙整之結果，可更加瞭



解陸域風力機於冬季東北季風吹拂下之運轉頻率變化。。

5. 陸域風力機的塔架內部構造中，艙門塔層及其上、下方通常布設儀控、冷卻設備和電梯設施等，可能造成塔底感測器訊號過於複雜，並導致塔底模態振型系統識別誤差，另因1P頻率過於低頻，亦難以藉由系統識別過程求得。

#### 參考文獻

1. United Nations, “The 26th UN Climate Change Conference of the Parties (COP26)”, Glasgow UK, 31 October-13 November 2021.
2. 經濟部，「風力發電示範系統設置補助辦法」，民國八十九年三月二十二日經能字第 89314400 號令訂定發布全文 13 條，民國九十二年廢止。
3. 陳致融、陳儀諺、陳致源、賴明俊、蘇進國、宋裕祺、張家銘、楊卓諺、林世豪、翁偉誠，「陸域風力機支撐結構監測與分析」，中國土木水利工程學刊-強震預警與結構健康診斷特刊，第 34 卷第 4 期（已接受），民國 111 年。
4. 周肇昱、張家銘、莊奕婕、楊卓諺、宋裕祺、蘇進國、林世豪、翁偉誠，「基於模態特徵之風力機監測可行性研究：以一林口風力機為例」，中國土木水利工程學刊-強震預警與結構健康診斷特刊，第 34 卷第 4 期（已接受），民國 111 年。
5. 羅俊雄、趙書賢、曾敏軒，“結合感測、系統識別及健康診斷技術探討橋梁結構破壞預警模式及機制 (II)”，交通部中央氣象局精簡報告。
6. Rune Brincker, Palle Andersen (2006), “Understanding Stochastic Subspace Identification”, International Modal Analysis Conference, IMAC-XXIV.
7. T. Kailath, “Linear Systems”, Prentice Hall Inc., 1980.
8. ARTEMIS Modal Help, “SSI-UPCX”, Structural Vibration Solutions.



# 有機朗肯循環應用於回收低溫廢熱： 一種負碳方式之發電系統

國立臺北科技大學機械工程系特聘教授 / 洪祖全  
江蘇大學能源與動力工程學院副教授 / 馮永強  
西安交通大學能源與動力工程學院副教授 / 席 奐  
國立臺北科技大學機電整合研究所研究生 / 賴昭宏  
國立臺北科技大學機電整合研究所研究生 / 林君瑋

關鍵字：有機朗肯循環、負碳發電方式、廢熱回收發電、工作流體

## 一、低溫廢熱

低溫廢熱幾乎出現在所有的熱與機械的過程中，以往由於缺乏有效的回收方法，所以工業界的低溫廢熱經常都是被丟棄，因此造成直接的熱污染與間接的氣體排放所造成的環境顧慮。圖1的數據圖是引用美國在2012年的廢熱與各種再生能源的總量，最左邊的條狀代表的是溫度低於177°C的廢熱能量，我們可以發現所有再生能量的總和還沒有它多，可以想像工業廢熱量的巨大。如果能夠回收工業廢熱供生產製程使用將可減少石化燃料的消耗、降低二氧化碳排放以及水資源的浪費。電力是高品位的能量，方便遠距輸

送，比較熱能，也方便儲存與釋放，所以如果能夠將廢熱轉換成電力將是上上之策。廢熱與碳排放造成的溫室效應，也會造成各種環境問題，許多流行的疾病與氣候變遷有關，從熱浪引起的心血管死亡率和呼吸道疾病，到傳染病傳播的改變和作物歉收造成的營養不良[2]。

## 二、氣候變遷

位於北極圈的Global Seed Vault（如圖2所示[3]）建築主要目的是用來保存全球各地的食物種子，避免世界各地天災所造成的食物危機。竟然在2017年發生進水的情形，

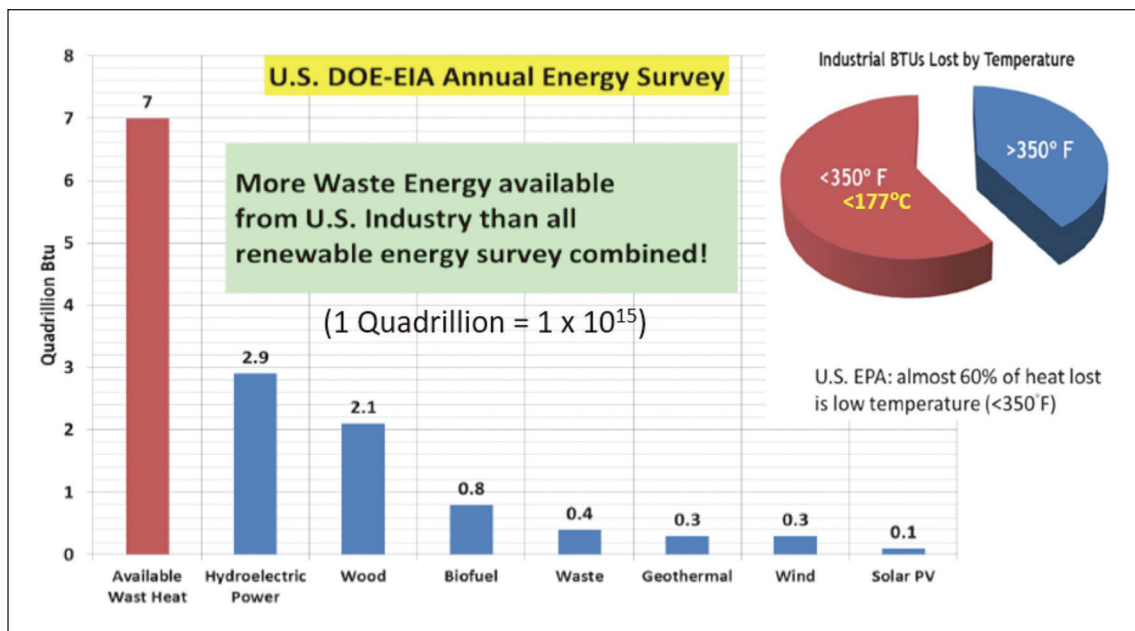


圖 1 美國在 2012 年的廢熱與各種再生能源的總量分佈 [1]



圖 2 位於北極圈的 Global Seed Vault [3]

主要原因是地球之溫室效應造成永凍層正在溶解中[4]。我們都瞭解這問題的嚴重，但是仍然有一些利益團體及政客們卻不願承認這氣候變遷的事實，而任由石化燃料的大肆利用。

二氧化碳排放減量及降低溫室效應之議題天天在全球各處都有抗議活動，且被討論著，受到普世相當大的關注，尤其年輕人更是憂慮！大家應該都認得在2020聯合國氣候高峰會（United Nations Climate Action Summit）上撻伐各國領袖的18歲瑞典女孩 Greta Thunberg吧。世界各國終於積極正視氣候變遷的問題了，對於環境保護與經濟發展而言，開發永續且乾淨之能源列為能源政策的首要項目，並針對如何提高能源使用效率、增加能源利用的附加價值，尤其是朝向零碳排放與碳中和目標等議題展開多元化的研究與推動。

聯合國政府間氣候變遷專門委員會



(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2018發布《地球暖化1.5°C》特別報告[5]，指出全球暖化要控制在攝氏1.5度內，則全球的碳排放量在2030前，減少二分之一，並在2050達成零碳排放目標，因此減碳是目前最迫切的工作。Baker等人[6]於2022最新的回顧性文章更是特別提到，即使是全球的公共衛生與衛生保健都有顯著的進展，近年來的氣候變遷，所造成的溫度上升、水災、南北極永凍土融化[7]等因素，已經大大提升傳染性疾病的爆發程度。

### 三、碳交易與碳稅

「碳權」簡單來說就是排碳的權力。碳

權又分以下兩種：第一種為碳稅由政府強制的管制與交易產生；第二種為碳交易由企業之間自願性的交易產生[8]。政府會為碳排總量訂定上限，而企業可透過減碳或再生能源等專案，向境內或國際機構申請認證，獲取碳權，多餘的碳權則可在碳市場進行碳交易獲取利潤。碳權、碳稅與碳交易如圖3，只要運用得當就能成為一個有效的減碳政策。該如何有效減碳取得碳權，可以利用企業生產出的低溫廢熱配合諸如有機朗肯循環 (Organic Rankine Cycle, ORC) 系統，既可將熱能轉換成電能，又不會產生額外碳排，即可達到更少碳排，並獲取更多電能以及碳權，減少溫室氣體排放、減緩氣候變遷。



圖 3 碳排與碳稅示意圖 [9]



隨著各國氣候的變化，全球溫室氣體的排放日益增加，全球碳市場開始發生變化。為了減少溫室效應，碳排放交易系統（Emission trading systems, ETS）成為了減少碳排的重要政策之一。世界上的碳市場都有自己的一套規則，但關鍵的特性是一樣的。碳交易價格是由近期和長期供需平衡、燃料價格、經濟趨勢以及政策和監管發展之間的相互作用所制定的。由圖4可以看到全球碳市場價格大幅上升。根據《巴黎協定》的溫室氣體排放量規定，使碳排放交易系統有著更進一步的發展，且世界上越來越多的國家正在考慮發展ETS。如中國在2021年開始了ETS，而ETS在氣候變遷執行著重要的工作，預計在2030年之前達到碳排放峰值，且

在2060年實現碳中和。碳排放的量測方式是以二氧化碳為1GWP，根據不一樣的材料產生不一樣的GWP，通過計算的方式來瞭解碳排放量的多寡。

#### 四、有機朗肯循環

ORC的系統結構與傳統蒸汽朗肯迴圈較為相似，為了能夠對低溫熱源進行利用，採用的迴圈工作流體大多為有機物（如鹵代烴、碳氫化合物等）。有機流體在常壓下的沸點通常較低，能夠在較低的溫度下產生蒸汽進而推動膨脹機等動力機械作功，從而將低溫的熱能轉化為電能。ORC的運作原理如圖5所示。該系統主要由四個設備組成：迴

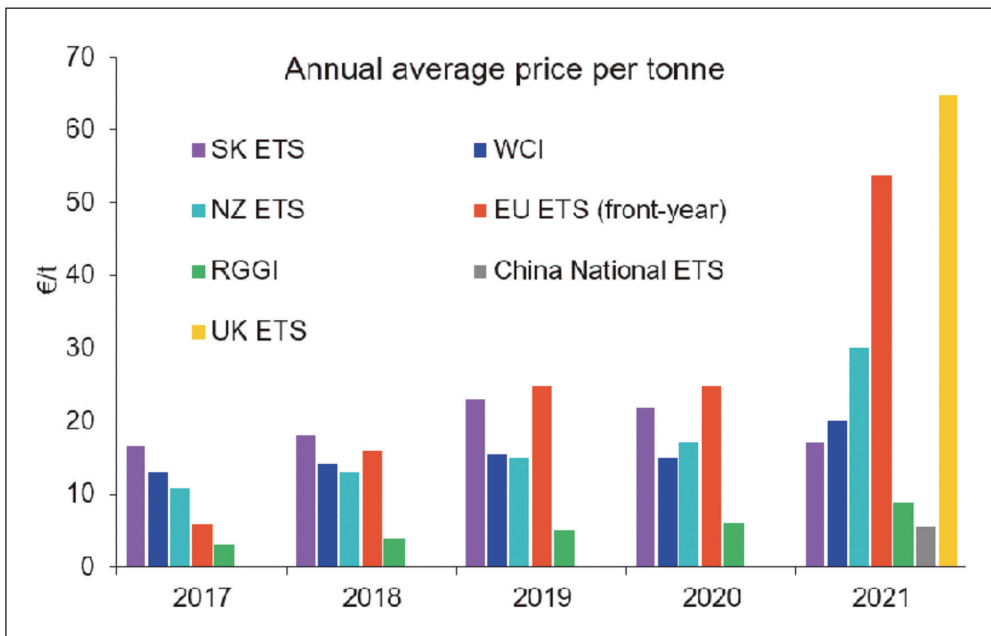


圖 4 近年來碳交易市場價格 [10]  
(RGGI: Regional Greenhouse Gas Initiative)

圈泵、蒸發器、膨脹機及冷凝器。具體工作過程如下：有機工作流體首先在蒸發器內吸收低溫熱源 ( $T_H$ ) 的熱量，蒸發成為高壓蒸氣，隨後在膨脹機內膨脹作功並帶動發電機發電；作功後的工作流體乏氣經過冷凝器向低溫之冷源 ( $T_L$ ) 介質釋放熱量，變為飽和（或過冷）液體；低壓工作流體冷凝液經過迴圈泵增壓後，重新返回蒸發器，如圖 5。

為何我們要利用 ORC 來回收低溫的熱源？因為我們可以從眾多的流體選擇出適當的流體，配合廢熱源溫度以及環境冷卻溫度的狀況與介質種類進行最佳的熱功轉換。從技術面角度來看 ORC，它相對的技術門檻及複雜度較低。圖 6 說明可作為 ORC 熱源的多元性，諸如海洋溫差、工業廢熱、地熱或溫泉、生物質能、太陽熱能等；其實舉凡小規

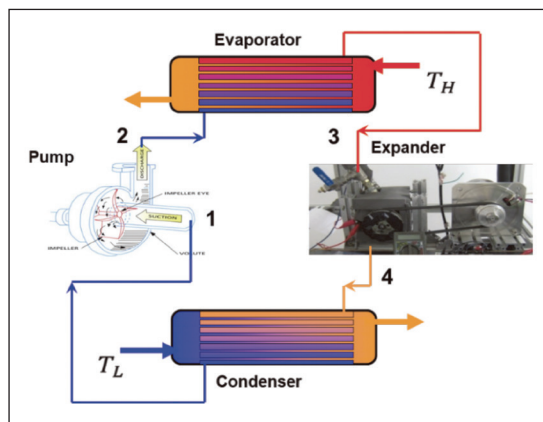


圖 5 簡易 ORC 示意圖

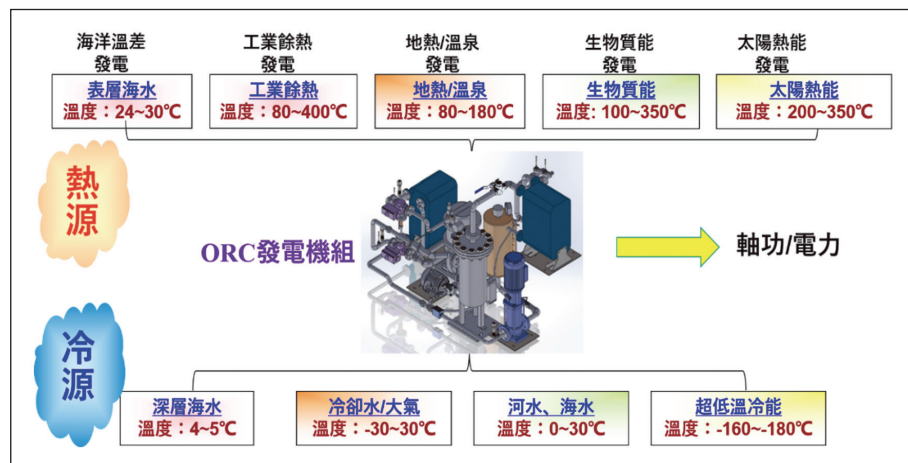


圖 6 ORC 與可利用的熱源及冷源間的示意關係

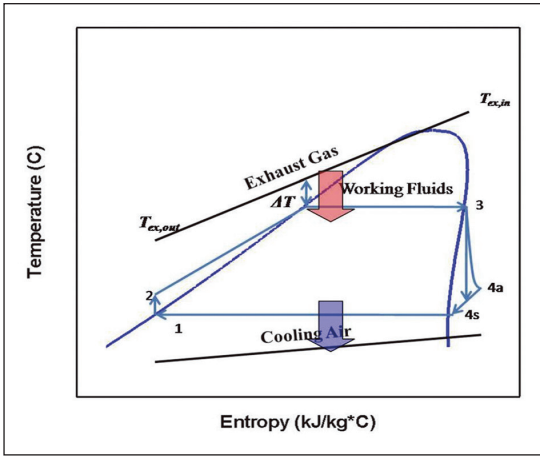


圖 7 ORC 與熱源及熱沉在溫度 - 熵圖上的相互關係

模溫差的存在都有可能成為ORC用來轉換成動力或電力的對象。ORC與熱源及熱沉在溫度-熵圖上的相互關係如圖7所示。

學術界的研究者對能源與環境影響問題的敏銳度總是在普羅大眾之先。圖8顯示有關ORC期刊論文著作的統計，告訴我們近十幾年來與ORC相關的研究在快速成長中，國際很有名的期刊Energy Conversion and Management也提到近年來ORC相關的文章是此刊物的大宗。這個資訊說明了人們體認到在能源危機以及氣候變遷的威脅下，ORC的發展是非常被重視的。

### 五、廢熱回收與負碳的概念

具體來說，一般所說的廢熱代表的是經由石化燃料產生動力或發電之後所產生的餘熱，例如船舶引擎，或是工廠製程用掉高溫熱能後所排掉的剩餘熱能。他們一般是經由

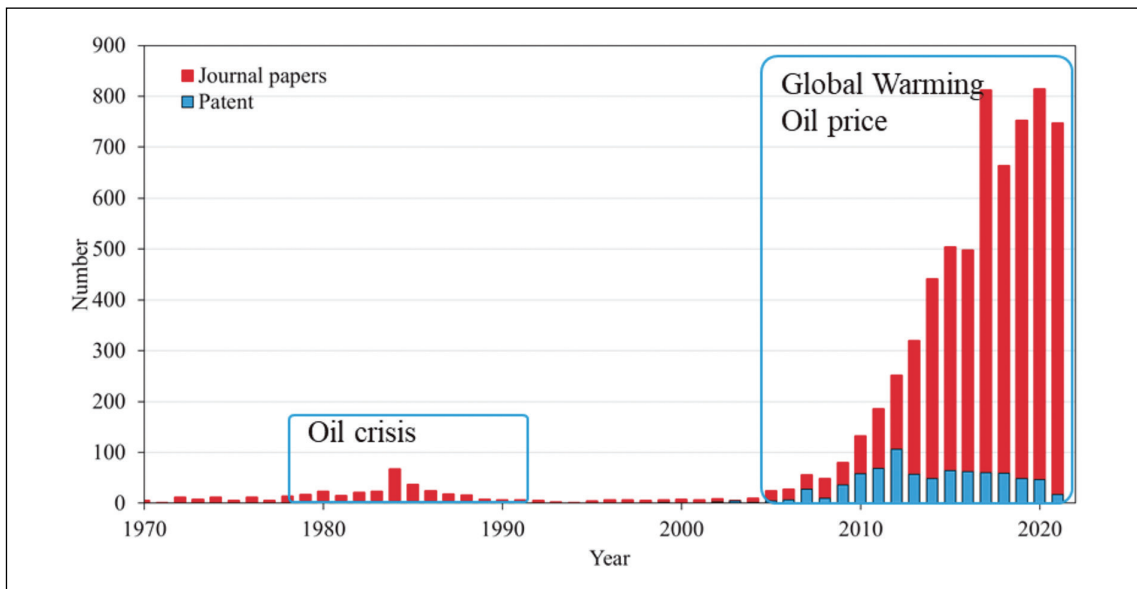


圖 8 過去半個世紀與 ORC 有關的期刊著作與專利 [11、12]

大氣或海洋冷卻掉，因此如果能夠將這些原本經由會產生CO<sub>2</sub>的石化燃料所產生的廢熱再回收產生動力或發電，不但這些沒有再用到會產生CO<sub>2</sub>的燃料，又可得到更多的動力或電力，因此這樣的電力生產系統，我們可以闡釋為是一種「負碳」的發電方式，值得在碳稅議題上給予獎勵與支持，這樣的論述作者在這兩次國內外研討會都詮釋過[13, 14]。

讓我們舉例，海上以引擎為發動機航行的船隻，假使其動力轉換效率是35%，表示它將有65%的引擎廢熱將排放到大氣以及海洋，其中包括了大量的二氧化碳。如果我們可以利用ORC將這些熱能轉換成動力或電力，以引擎排放廢熱溫度的品質，加上海洋穩定的散熱效果，不難多得原本產生動力的

1/3。如此一來，省下了可觀的耗油，又減少了大量的二氧化碳排放，也見證了一種負碳的發電方式 [15]。

圖9所列舉的情況是普遍存在於工業界的某溫度範圍內任意丟棄可用能量的例子，我們可以經由ORC的善加利用，改善後可以多得電力。Li及Hung等人[16]針對核能產氫過程類似的狀況，也研究經由ORC的引用，將原本278°C要冷卻到35°C的工作流體的丟棄能量回收多得動力，如圖10所示，這不也是一種廢熱發電概念的呈現嗎！

## 六、ORC 之工作流體

圖11列舉了選擇工作流體時，在安全及

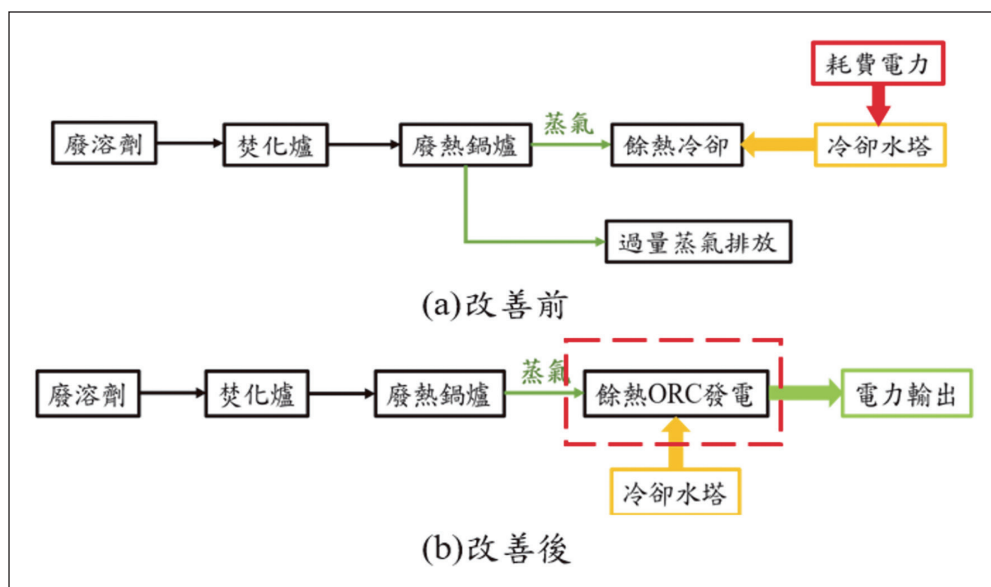


圖 9 工業製程丟棄的某溫度區間能量利用 ORC 回收發電的圖例

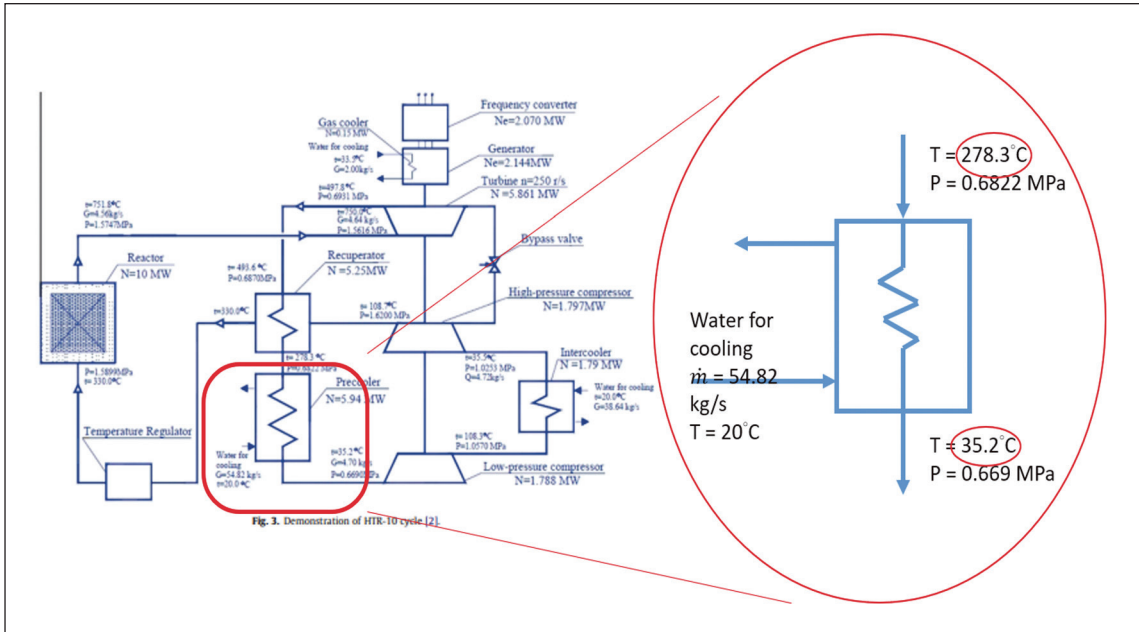


圖 10 工業製程某溫度區間能量丟棄範例

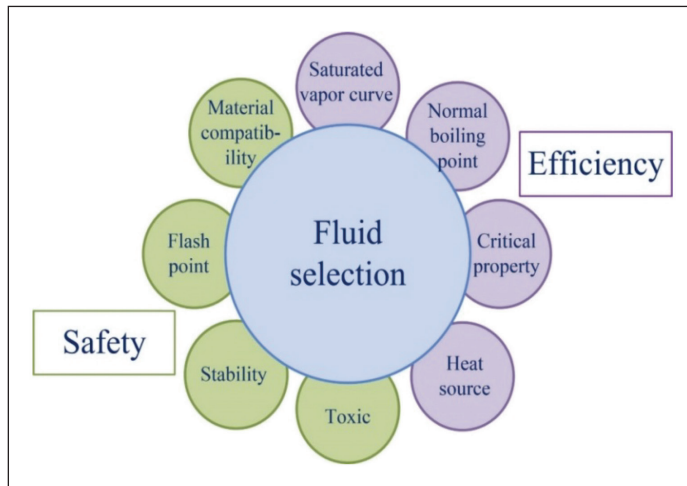


圖 11 工作流體篩選的基本考量

系統性能上的考量重點。其實也必須考量對環境的衝擊，所以對於臭氧層的保護指標

ODP以及全球變暖潛值GWP的要求也應該遵守。當然，其他的因素，例如生態的影響，



或經濟面的考量也都得一併考慮。ORC所使用的工作流體對於人體常有其一定的負面影響。其含量在某一固定的數值時，對人體會造成如何的效應，皆須作一番的整理以維護實驗人員的安全。某些冷媒會是我們考慮使用的工作流體，美國冷凍空調學會ASHRAE修訂冷媒安全相關標準，其中列出冷媒編號，並根據毒性和可燃性數據分配安全分類[17]，通過嚴格的毒性、可燃性等安全性檢測後，才能成為被ORC採用的流體。

為了選擇適當的工作流體，必須得進行熱物性質的分析整理與計算，同時對於流體的化學性分析亦必須配合實驗測試逐步地進行。工作流體的選擇不僅僅是對系統效率有相當重要的影響，對於系統設備的壽命與成本的考量，亦是不容忽視的問題。系統在運轉上，理想的流體也是希望擁有高溫度穩定性、低壓下維持液態、低汽化點、高分子量與低價格之特性。此外，在選擇流體時，對於流體與管路元件材料之間的相容性、是否會產生腐蝕或化學變化、流體在高溫高壓狀態下的分解劣化現象，也需要深入探討與掌握。

工作流體的飽和曲線與冷、熱源條件是影響ORC系統表現的重要因素。這會影響其適用性、系統效率與合適的系統元件。目前也還無法從單一熱力性質作為評估工作流體的指標，並且工作流體影響系統之運行效率會隨操作溫度不同而有所變化。雖然如此，

選擇工作流體時有幾項重要因素需要納入考量[18]。

甚多的文獻探討了工作流體的選擇。Saleh等人[19]針對31種ORC流體篩選，選擇最佳ORC工作流體需要考慮工作流體的最高溫度。在沒有內部熱交換器（Internal heat exchanger, IHE）的情況下發現，過熱度很小系統效率表現最好；反而有IHE時會發現過熱度增加，系統效率降低。Chen等人[20]篩選了35種工作流體，並分析了流體性質對系統性能的影響，討論了工作流體的類型、潛熱的影響、密度、比熱以及過熱的有效性。具有高密度和高潛熱的工作流體可提高渦輪機工作輸出。過熱對於ORC中的濕流體是必要的；然而，對於乾流體，過熱度可能對系統效率產生負面影響。

Aslam等人[21]提出從燃氣輪機的廢氣、地熱資源和工業工廠中回收廢熱，通過有效轉換廢熱能，為合理利用能源提供了絕佳的機會。研究了正戊烷到正十二烷的烴類與水、苯和甲苯的比較。經模型計算，在低溫範圍內（ $<250^{\circ}\text{C}$ ），正己烷，正戊烷等碳氫化合物是合適的。Roy等人[22]提出利用煙道氣的廢熱當熱源進行參數優化和性能分析，以R-12、R-123和R-134a為工作流體進行發電，對渦輪機入口壓力進行優化。最大限度地提高系統的功率和效率，並對所選流體進行不同壓力下的等壓過熱。結果表明，R-123在所有選定的流體中具有最大的輸出功和效



率。在341.2 kg/s流量下，產生作功19.1 MW與熱源5°C夾點（Pinch temperature），系統效率為25.30%和炯效率為64.40%。

我們也瞭解到熱源及冷源的溫度或焓值與循環內之流體搭配的重要性，最佳的流體應該選用在系統最低壓力狀態下，它還是在次冷（Subcooled）狀態。設法讓整個系統皆是正壓，避免外界大氣壓力使得空氣，亦即不可冷凝氣體滲入環路而降低熱傳效果與膨脹器的作功，也可避免負壓可能造成泵的空蝕（Cavitation）現象。

在實驗環路中，工作流體的選擇對於ORC系統之性能影響非常重要，從文獻回顧整理中發現，等熵或乾流體常常是ORC系統之優先選項，因此在工作流體選擇上，本研究針對幾種流體進行初步評估，以挑選出實驗環路之工作流體。圖12(a)為工作流體在不

同操作溫度範圍下對系統效率的變化行為，圖中可知R123為理論效率最高者，其次為R113、Pentane、R245ca、R245fa、R124與R236fa。雖然R123之理論效率最高，但此流體將在2010年被禁用，並且該流體在20°C之飽和蒸汽壓低於一大氣壓見（圖12(b)），在實際循環中可能會導致空氣洩漏進入ORC環路而影響工作流體純淨度，因此在所有納入評估的流體中，若在20°C之飽和蒸汽壓低於一大氣壓則不納入考慮。

以圖12之幾種流體為例，在還未考慮溫室氣體效應之前，綜合以上分析結果，配合臺灣的氣候條件，R245fa是相對上在目前分析的流體中為較適合者。並且20°C下的飽和蒸汽壓略高於一大氣壓，在安全性、毒性等方面皆為可接受者，因此選用R245fa作為實驗工作流體。

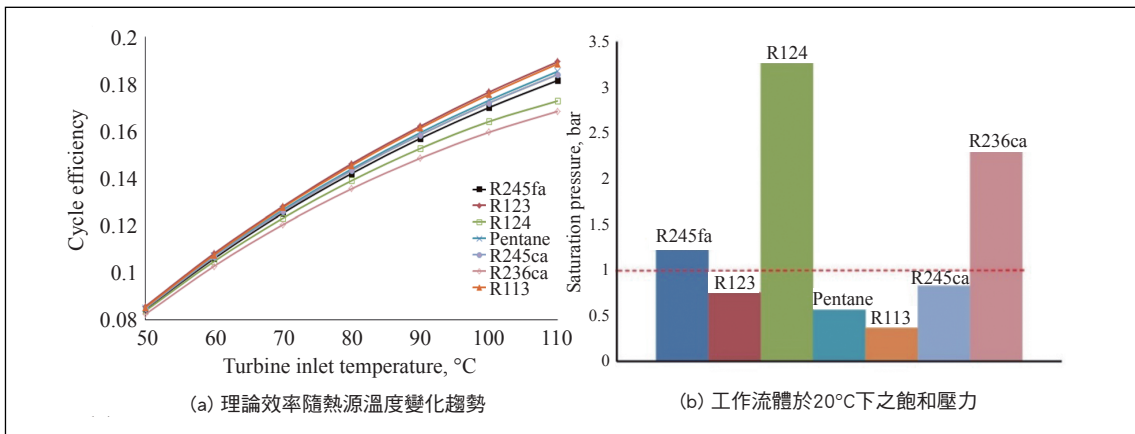


圖 12 工作流體理論效率分析。模擬條件：泵入口 20°C 之飽和液態；膨脹機入口乾度 :1.0；膨脹器與泵效率：100%；忽略熱交換器壓降。



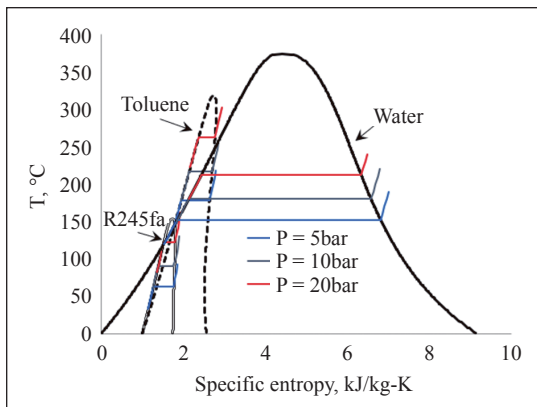
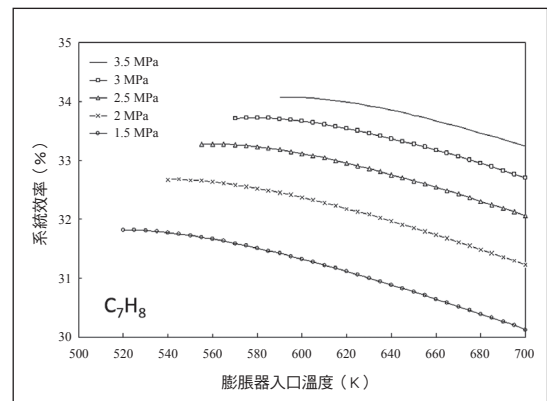


圖 13 有機流體與水的飽和曲線之差異

ORC能在工業裝置運行過程中排放的低溫熱能回收及其轉化為更高品質的機械能。Nguyen等人[23]提到與水相比，有機流體的沸點較低，因此可以從低溫廢熱源中回收能量。圖13為水與有機溶劑飽和曲線的差異，可以看出有機溶劑的潛熱較小，且能在低溫廢熱下進行蒸發。在ORC系統中，選擇適用的工作流體是非常重要的。Qyyum等人[24]對於工作流體提出了參考參數，分別為低ODP、低GWP、系統安全性，不易燃、無爆炸、無毒、無腐蝕、可用性、低成本、環境永續、臨界溫度、蒸汽壓力與熱穩定性，並統合了多種流體與混合流體的特性。

除了以上流體的考慮參數外，流體的熱力性質也有很大的影響，而Hung等人[25]使用苯、氨、R11、R12、R134a和R113作為工作流體，根據飽和蒸汽曲線的斜率和形

圖 14 乾流體  $C_7H_8$  過熱度變化對 ORC 效率的影響 [25] (泵入口溫度： $20^{\circ}C$ )

狀將工作流體分為濕流體、乾流體與等熵流體。假如針對一理想的ORC，等熵流體最適合回收低溫廢熱，而乾流體過熱度的變化對於ORC系統效率的影響如圖14，可以發現過熱度越高，效率則越低。圖中每一條曲線最左端的狀態代表流體乾度為100%的飽和蒸汽。因此膨脹機入口溫度增加代表過熱度越高，所以其答案可以很容易由圖15的綠色區塊（因過熱所增加的作功）的面積小於藍色區塊（因過熱所增加的不可逆性）的面積得到解釋。Hung [26]率先針對使用乾流體苯，甲苯、對二甲苯、R113和R123作為工作流體進行研究。之後Hung等人[27]又研究了11種工作流體根據其熱物理性質進行理論分析來優化系統效率。當膨脹器沒加以過熱的情形下，在膨脹作功過程中，濕流體的主要缺點為在膨脹作功過程中會進入雙相區產生液珠，乾流體與等熵流體不會發生。

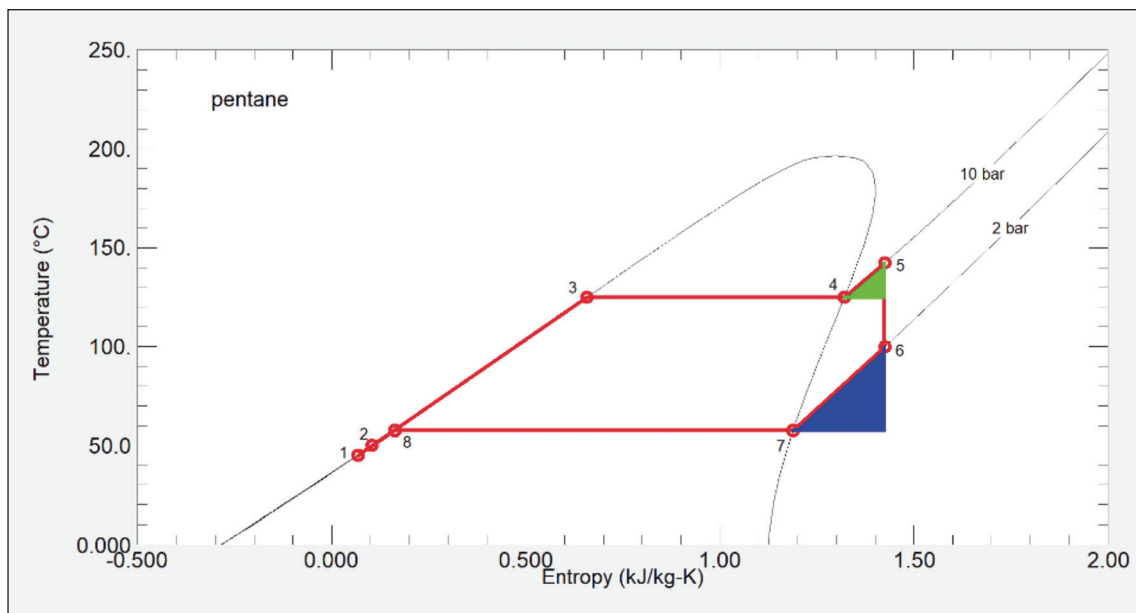


圖 15 膨脹器入口之過熱程度對系統性能的影響

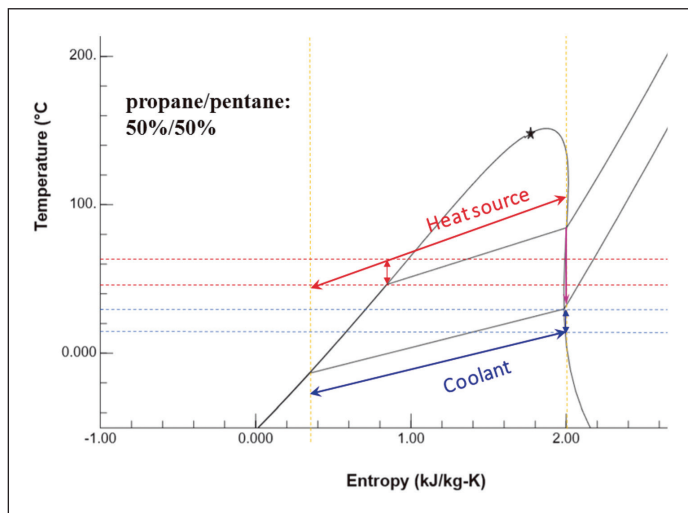


圖 16 T-s 圖顯示混合流體與 ORC 的最佳搭配案例

Gunning等人[28]使用Benedict-Webb-Rubin方程式預測出了混合流體產生的熱力性質。當不同流體在相同壓力下的蒸發溫度

相距甚遠時，其混合流體的溫度滑移會更大，以圖16為例，兩種不同流體所產生的溫度滑移。結果表明，如果適當選擇使用混合



流體，特別是對於低品位熱源，可以明顯提高ORC性能。熱源溫度線與混合流體在飽和區的溫度線呈現接近平行，可以有效降低熱源與ORC蒸發器間的熱交換所造成的不可逆性（Irreversibility）。相同的情形也可以降低在冷源與ORC冷凝器間的熱交換所造成的不可逆性。如果混合流體的飽和蒸汽線呈現出介於些微乾流體與等熵流體，則其在做功過程，膨脹器入口也只需要些許的過熱，則整體焓效率（Exergy efficiency）與系統的循環效率將可以達到流體搭配ORC的最佳化。

Jakobs等人[29]也提出了配合混合流體產生的溫度滑移在熱泵中使用能有更好的熱效率。藉此瞭解混合流體比起單一流體擁有更高的效率，Oyeniyi等人[30]計算有機流體及混合流體的熱力性質，在ORC中選擇最佳工作流體，通常純流體更有成本效益，但是在冷卻水量受到限制時（非無限），整體性能會下降，而混合流體則會成為最佳工作流體。Lecompte等人[31]將R245fa、正戊烷、R365mfc、異戊烷、異己烷、環己烷相互混合並進行實驗，發現與純工作流體相比，使用混合流體可將效率提高7.1%至14.2%，而主要原因為冷凝器與蒸發器中不可逆性的降低。

Bao等人[32]提出工作流體的選擇是整個熱力學循環的關鍵核心，混合流體具有良好的溫度匹配性，以提高整體效率。然而混合流體成分和組成比率的篩選需要進一步研

究；工作流體的選擇受限於工作情況、工作流體特性、設備結構和環境安全考慮。Chen等人[33]分析了一種利用混合流體將低品位熱量轉化為電能的超臨界ORC。與傳統的亞臨界（Subcritical）ORC不同，超臨界ORC在加熱過程中不經過兩相區域，研究發現，在高壓段，溫度為120°C-200°C的情況下，超臨界ORC可以達到10.8-13.4%的系統效率，而亞臨界ORC的系統效率為9.7-10.1%。

## 七、膨脹器種類

膨脹機作為ORC餘熱回收系統的核心做功部件，其工作效率與可靠性極大地影響了ORC餘熱回收系統的效率及技術經濟性。如圖17所示，動力型（Dynamic type）與正排量型（Positive-displacement type）兩大類。利用工作流體在流道中流動時速度的變化來進行能量轉化的稱為速度型膨脹機。渦輪屬於速度型膨脹機械，其輸出功率大，但膨脹比相對較低，同時對工作流體乾度有一定要求。Pethurajan等人[34]也提到渦輪機有分為二種形式，分別為軸流式渦輪機和徑流式渦輪機，兩者的特點分別為，軸流式較適合高流速和低壓力比的工作環境，徑流式適合高壓力比的環境，而且尺寸較小，效率更高。常見的容積型膨脹機相對而言種類繁多，主要有活塞式、螺桿式、渦捲、旋葉式、滾動轉子式等[35, 36]。活塞式膨脹機械結構簡單，膨脹比較大，但是對系統配氣相位要求較高，如採用凸輪頂杆式配氣相位，則系

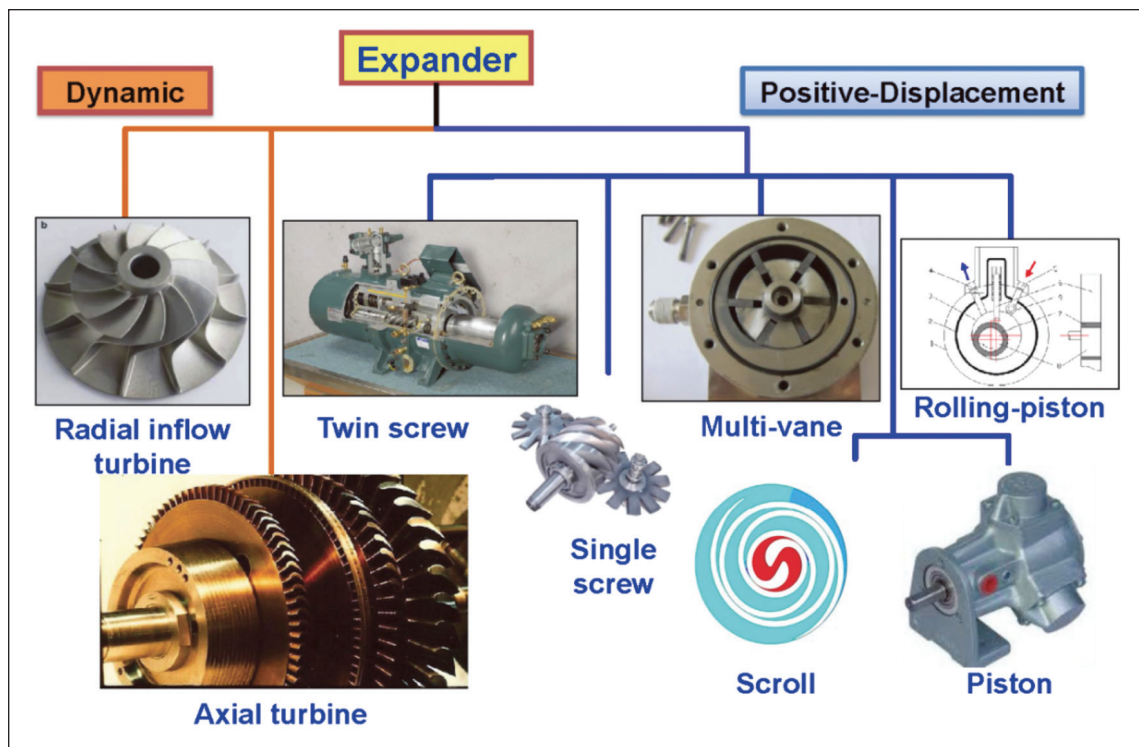


圖 17 膨脹器分類

統機械結構較為複雜，同時對凸輪型線的設計有較高的要求。如採用電控方式控制系統配氣相位，則對電磁閥回應頻率和回應時間有較高要求。螺桿式膨脹機械具有結構簡單，排氣溫度低，對工作流體中含有大量潤滑油不敏感等優點，但是其體積、重量相對較大。與其他型式的容積式膨脹機相比較而言，渦捲膨脹機以其運轉平穩、雜訊低、效率高、結構緊湊及可靠性好等突出優點和小流量、高膨脹比的運行工況要求。當系統輸出功率大於50kW時，渦輪膨脹機是ORC餘熱回收系統中較好的作功部件，如圖18顯示各類膨脹器所示和操作的輸出功率範圍。

## 八、經濟面

ORC系統採用不同結構形式和選取不同工作流體，旨在提高系統的熱力學性能，同時也考量了系統的經濟性能。經濟性是ORC系統性能評價的重要組成部分，其中ORC系統的投資成本主要包括蒸發器和冷凝器、膨脹機和工作流體泵等部件投資成本。

目前，對於ORC這種耦合式能源系統，其經濟性評價參數因系統而異，常用的經濟性指標有傳熱需求、平均化電力成本、單位焓成本、內部回報率（IRR）、年折現回收

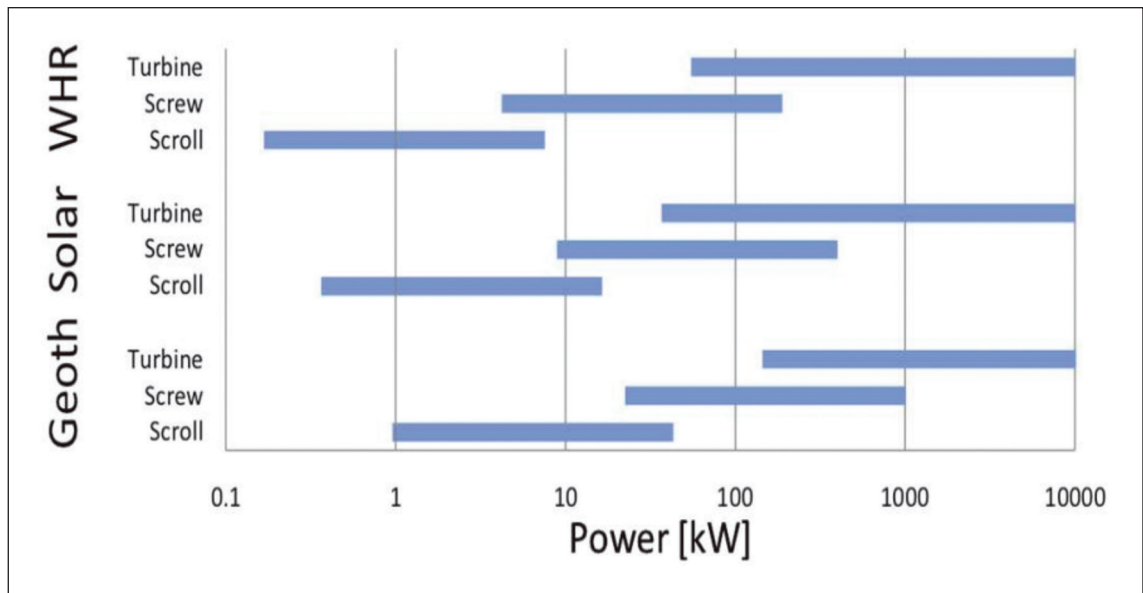


圖 18 膨脹器工作範圍 [37]

期 (DPP)、淨現值等。Zhu 等人[38]設計了一種以單乙醇胺基二氧化碳捕獲相結合的生物質燃燒 ORC-CHP 系統，選取淨現值、淨功率指標和平均化電力成本等作為經濟評價指標，優化了生物能源系統中的冷凝溫度，顯著提高了系統的熱經濟性能。Feng 等人[39]利用 R1234ze 對超臨界-亞臨界 ORC 進行了參數分析，選取傳熱需求 ( $UA_{sys}$ ) 作為經濟指標。結果發現，隨著超臨界階段溫度的超臨界溫度增大， $UA_{sys}$  先降低再增大。較高的超臨界級壓力和溫度不利於系統的經濟性能，而較高的冷凝溫度則有利於提高系統的經濟性能。Kong 等人[40]選取單位焓成本作為生物質直燃 ORC 耦合輔助熱泵系統的經濟性能參數，結果發現，當冷凝溫度為  $33^{\circ}\text{C}$

或以下時，焓的單位成本基本穩定，基本在  $0.08\text{USD/kWh}$ 。

同時，對 ORC 系統的經濟性分析並不是單一進行地，通常是與熱力學性能、環境性能等其他性能參數進行綜合評價，尤其是在多目標優化時，解決了系統性能衝突的問題。Lu 等人[41]採用序列方法和遺傳演算法 (GA) 對一種新型的成分可調的共沸 ORC 進行了熱經濟優化。結果表明，該 ORC 的平均發電成本比傳統 ORC 低 21.43%。Pan 等人[42]研究了一種新型的 ORC 和熱泵迴圈 (ORC-HP) 組合系統。對組合系統進行多目標優化後發現，新組合系統的最優回收期為 0.48 年。Nondy 等人[43]將系統成本率和焓效率作



為目標函數，優化了基本ORC、再生ORC、回熱ORC和再生回熱ORC系統。結果發現，與基本ORC相比，再生回熱ORC系統成本率降低了1.68%，並且在所有四種配置中，焓損失的成本率約占系統總成本率的60%。Wang等人[44]分析了基於地熱的亞臨界ORC系統的經濟-環境-可持續性能，並進行了四目標優化，其中單位焓成本作為經濟性能目標函數。在所選的流體中發現，R600a在經濟性方面表現得更好。

用於廢熱回收的ORC，就相當於無消耗發電，又能夠吸收廢熱減少對環境產生的熱污染。假設一台10 kW的機台，一天運轉24小時，一個月能發出約7200 kWh的電量，而在臺灣住戶的平均每個月的用電量大約為330度，也就表示一台ORC大約可供22戶家庭用電，再依據電價，以住宅用電價格計算2.56 NTD/kWh [45]，一年下來能夠省下約22萬台幣的電費，並且只要是低溫熱源就能夠有ORC的發揮之處。根據臺灣能源報導[46]，低於250°C的廢熱占了臺灣全部廢熱的85%，若是能夠善用這些資源，不僅能為環境付出大量幫助外，還能夠為臺灣能源造成更進一步的發展，同時解決廢熱以及發電兩大問題。

## 九、本研究團隊的努力方向與成果

本研究團隊這些年來主要是以小型模組化0.3~10kWe ORC為研究對象。其實從工程研發的角度，我們可以想像機組越小，

相對發電功率的不可逆性（Irreversibility or exergy loss）會越大，也就是研發產出的困難度越高。有感於對於地球環境的保護，我們致力於回收低品位（所謂的低溫或低焓）熱源轉換成動力或電力。因此我們團隊近年來鎖定的廢熱源條件大致上包括：

- 大約低於 120°C 的單相液態熱能
- 大約 1 atm 的水蒸汽
- 大約低於 160°C 的單相氣態熱能
- 工作流體要求安全且滿足對臭氧層（ODP）以及溫室氣體（GWP）的要求

整體而言，這些低溫低壓條件看似簡單，其實是一個挑戰！本研究團隊的系統建構主要包含五個子系統：泵、熱源與蒸發、膨脹做功與發電、冷凝與冷卻、再生器（Regeneration），如圖19所示。

圖20所示，該實驗數據是當熱源（液態水）與冷卻水溫度差 $\Delta T = T_{H,in} - T_{L,in}$ 只有大約83°C，本團隊很榮幸在3 kW機組，以及搭配的熱源及環境邊界條件下，在2014年底，達到冠全球的ORC熱功轉換效率9.6% [47]。其邊界條件對應的卡諾效率以及理想朗肯循環效率分別是22%以及14.42%。雖然效率高，但對於沒有相變化的熱源，其入出口溫度差 $\Delta T_H = T_{H,in} - T_{H,out}$ 很小，表示廢熱用掉的比率太小。然而所採用的膨脹器卻是加工門檻較高，體積比為4的渦捲式膨脹器。因此，為了有效將廢熱加以回收利用，

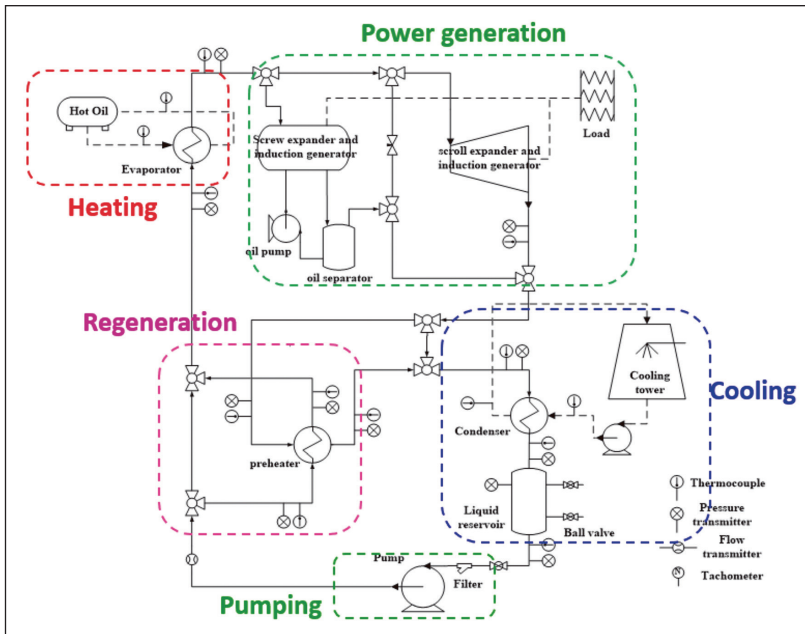


圖 19 本研究團隊的 ORC 系統流程示意圖

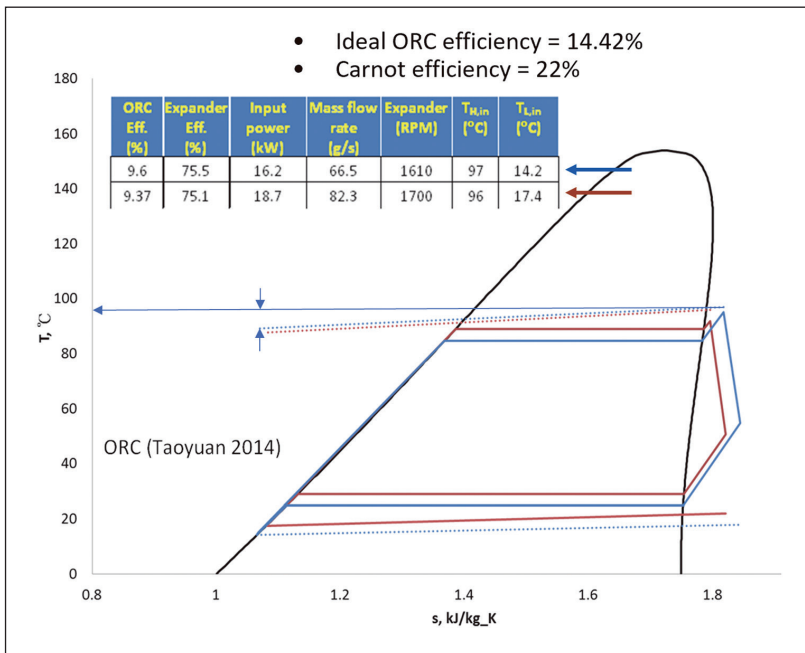


圖 20 本研究團隊的 ORC 系統流程示意圖

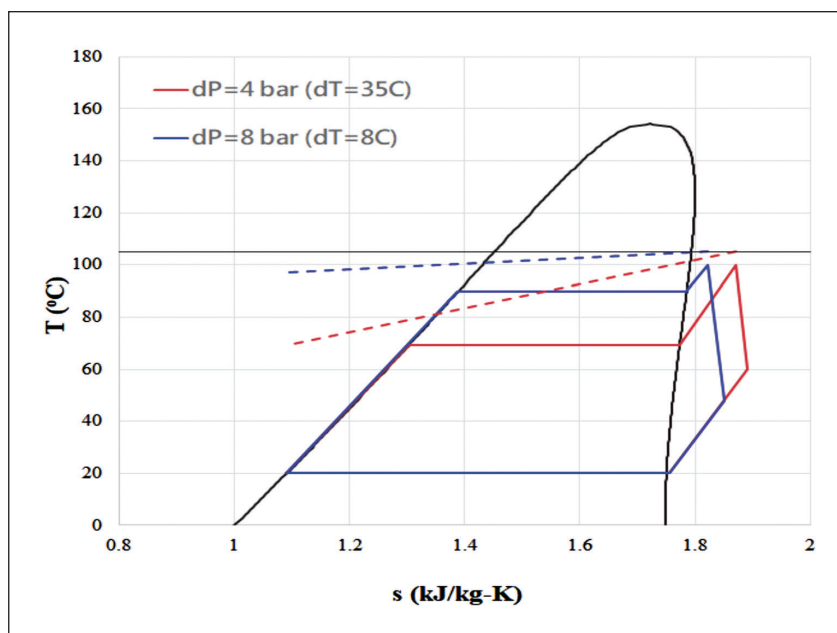


圖 21 ORC 系統壓差所對應的熱源利用示意圖

高效率之ORC機組不見得是我們所追求的唯一目標。高ORC系統壓差代表運轉與技術門檻較高！因此在追求有效利用低溫廢熱的目標下，一味的追求高效率並不必要。圖21的紅色熱源溫度線的斜率與所匹配的紅色循環的系統壓力差很清楚地告訴我們這事實。

因此本團隊建立了新的3 kW渦捲ORC環路，如圖22之照片所示，並進行一系列的實驗研究，所量測到的數據也發表的十餘篇SCI期刊文章，列舉四篇供參[48-51]。對於ORC實際運轉之性能研究有相當深入的探討，對於缺乏實驗數據的ORC領域有著實在的貢獻。

本團隊先後針對10 kW渦捲式ORC機組組裝了兩套，如圖23之照片所示，第二版本機組KNT-100-2在諸多的改良之後明顯性能提升。

兩個10 kW渦捲式ORC版本的結果（淨發電量與淨發電效率）比較於圖24，原始版（KNT-100-1）在熱源輸入介於53-113 kW的情況下，獲得淨發電量介於0.4 kW~5.2 kW，對應的熱電轉換效率由0.61%增加到4.59%。經過改良後的KNT-100-2版本，由於當時實驗室電力限制，只能提供34 kW-77 kW的熱源，獲得淨發電量介於1.5 kW~6.0 kW，對應的熱電轉換效率卻高達接近8%。結果遠遠超過原本預期要有120 kW熱源才能達到的境



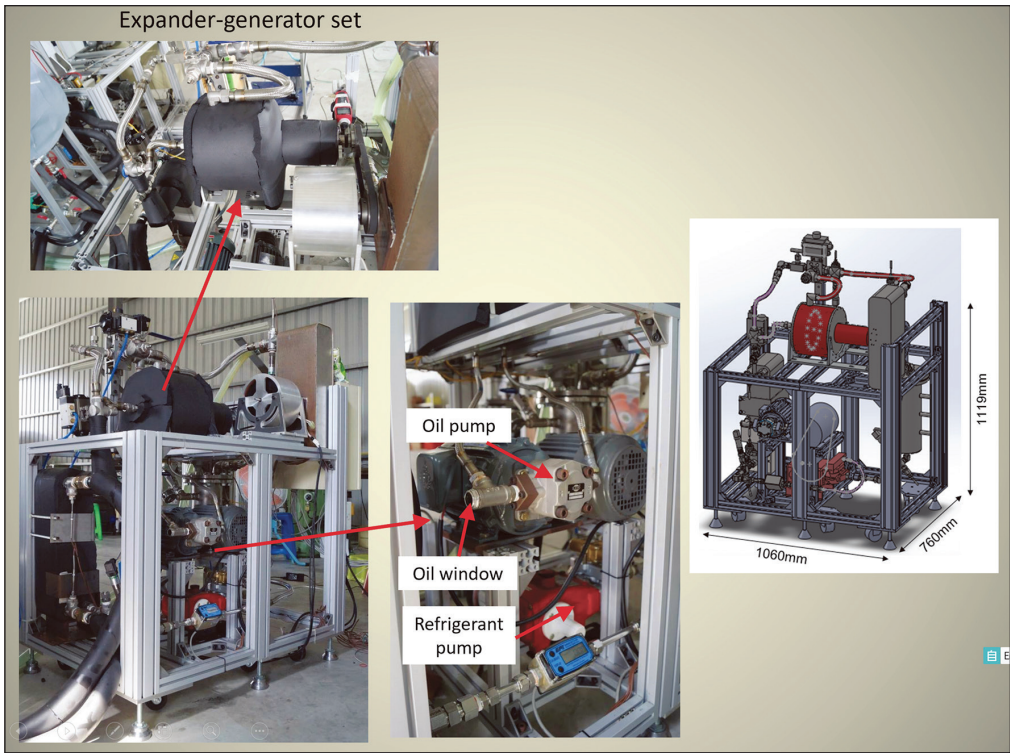


圖 22 3 kW ORC 環路

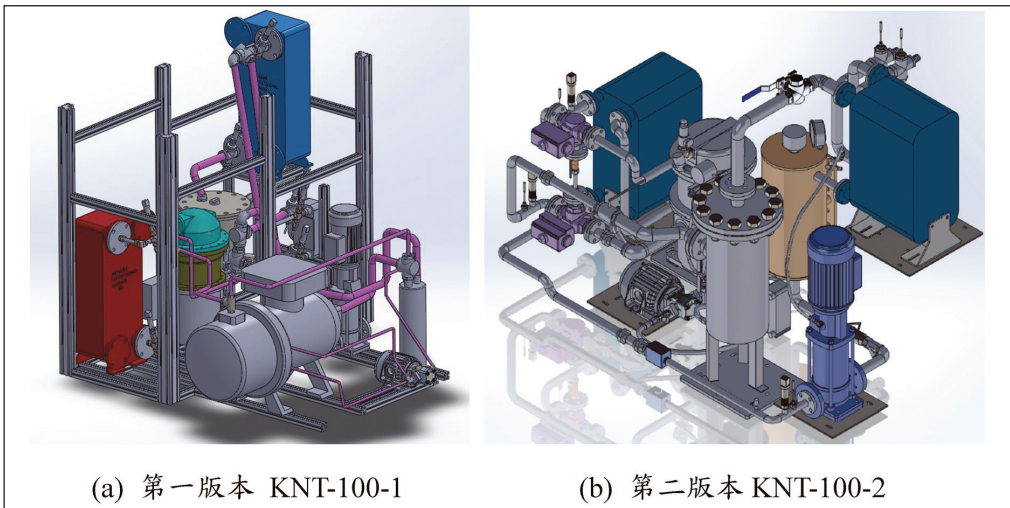


圖 23 兩種 10 kW ORC 環路版本

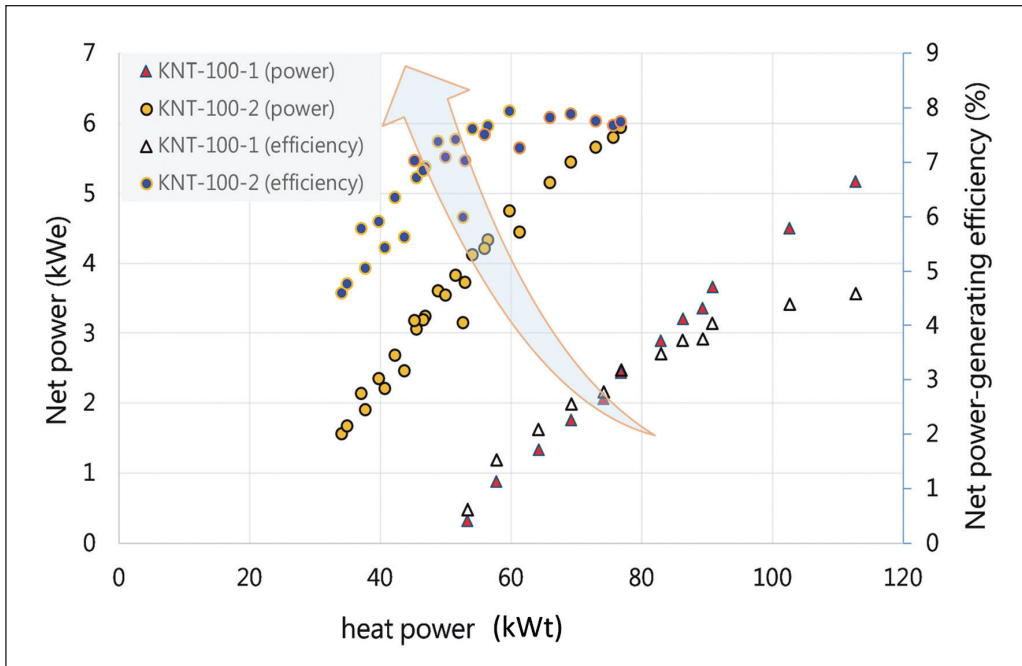


圖 24 兩種 10 kW ORC 環路版本之運轉結果比較

界，就如同一隻驢子竟然將一輛馬車給順利拉動了的驚喜！

### 十、創新應用及未來發展

隨著大眾對能量利用效率及碳排放的重視程度逐漸提升，ORC也頻繁出現在伴隨能量轉化的各類工藝流程中，例如基於ORC的熱電聯產及能量存儲系統中，作為一種比較簡易快捷的熱-電轉換形式，只要存在熱量向電能轉化的需求，就有ORC的用武之地。

ORC採用有機流體作為工作流體，雖適用於中低溫熱源以及餘熱回收，但ORC

在冷凝過程依舊釋放了大量的熱量，導致其能源利用率不高。因此，有許多研究通過改進系統結構來提高系統效率。Zhao等人[52]將一個基本ORC（BORC）模型和三個不同回熱器（Recuperator）的RORC模型（如圖25）與柴油發動機相結合，並進行了比較。具有較高回熱率的RORC在穩定運轉工况下較具優勢。本團隊[53]對比了三種不同的ORC系統性能：包括基本ORC（BORC）、單級再生ORC（SRORC）和雙級再生ORC（DRORC），如圖26所示。發現DRORC在最佳運行條件下的熱效率和焓效率總是最好的，其次是SRORC系統，而BORC系統的效率最差。

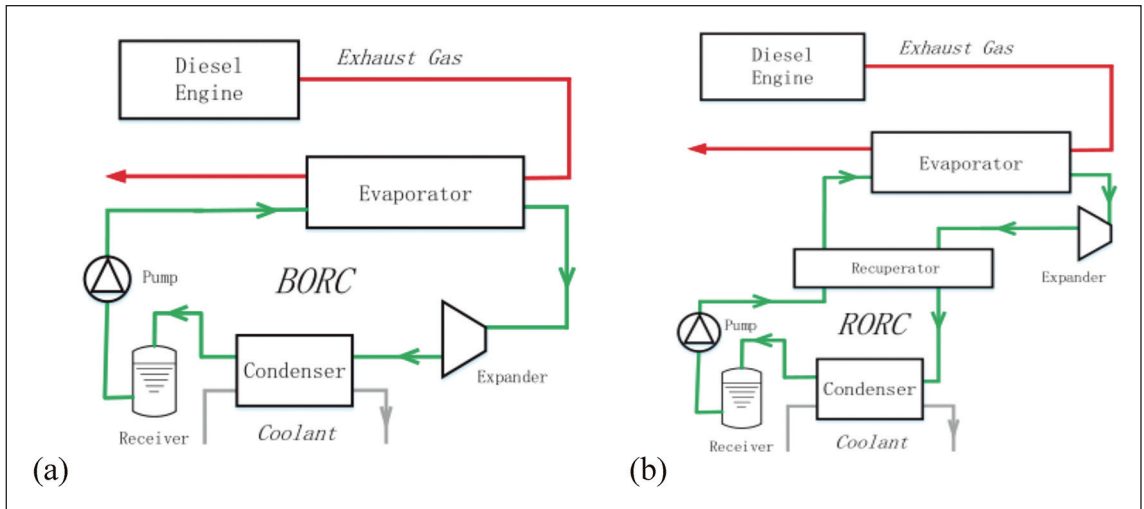


圖 25 (a) BORC 模型 ; (b) RORC 模型 [52]

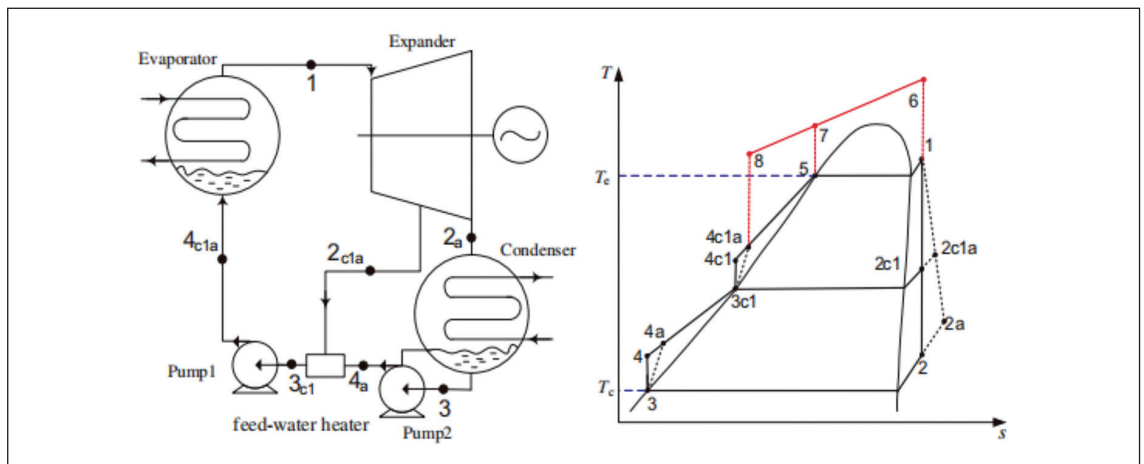


圖 26 DRORC 系統佈局與其 T-s 圖 [53]

Song等人[54]提出了一種由高溫（HT）和低溫（LT）迴路組成的雙迴路ORC系統。如圖27所示。結果表明，在HT迴路不同的凝結條件下，HT迴路的窄點出現在不同的位置，導致了不同的蒸發溫度和其他熱參數。

HT迴路採用環己烷，LT迴路採用R245fa，雙迴路ORC系統的最大淨功率輸出達到111.2 kW，在原本的基礎上增加11.6%。

Manente等人[55]利用100-200°C的地熱

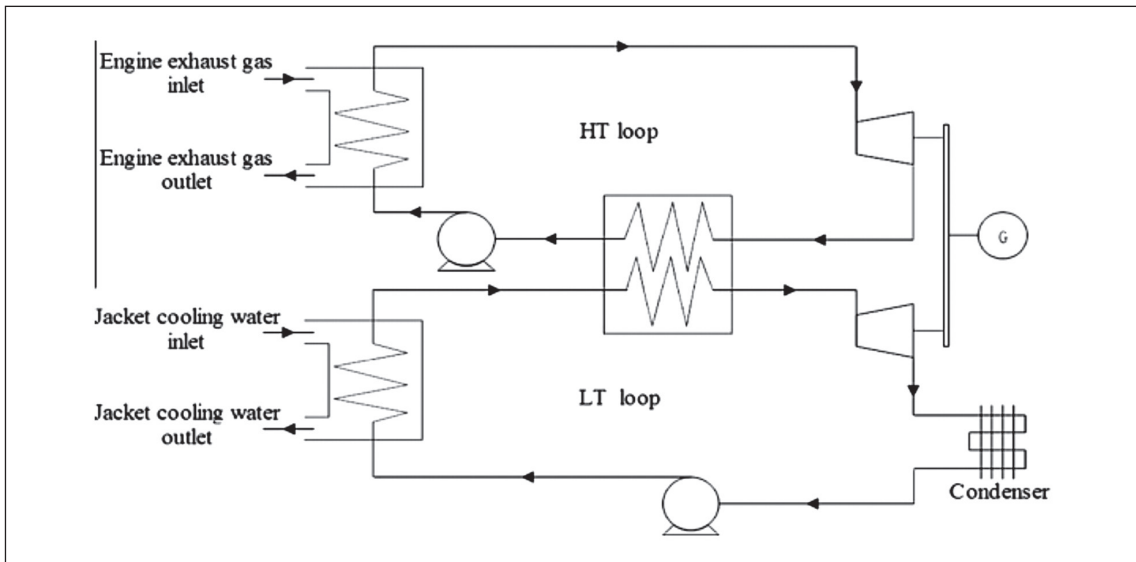


圖 27 應用於引擎廢熱回收的雙 ORC 循環的示意圖 [54]

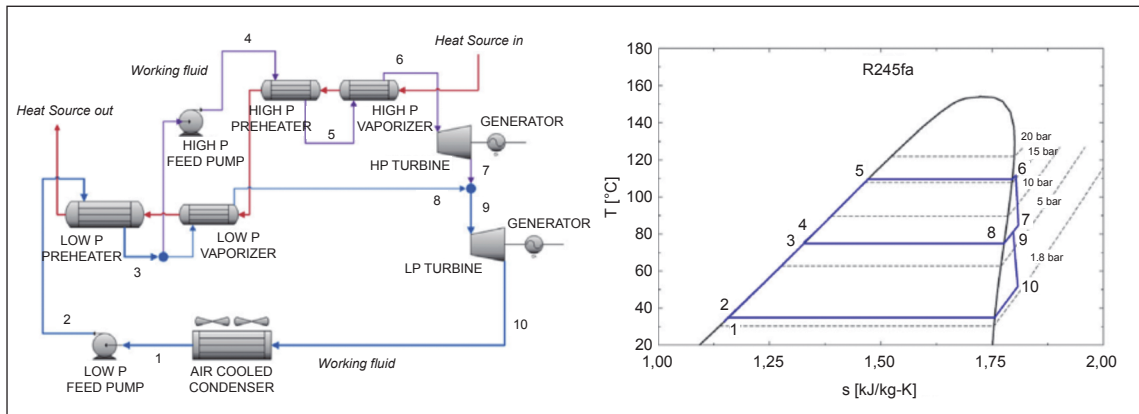


圖 28 雙壓力迴圈系統之佈置與 T-s 圖上的循環示意圖 [55]

水作為熱源，比較ORC單雙壓佈置時系統的性能，如圖28。結果表明，在較低的地熱溫度（100-125°C）下，由雙壓迴圈產生的熱效率高達29%，而在較高的溫度（150-200°C）下逐漸減少，其中一些選定的流體在單壓迴

圈中獲得了與熱源的最佳熱匹配。

此外，本團隊還建立了不同形式的ORC熱電聯產系統，包括串聯系統、冷凝系統和串聯/冷凝系統，見圖29。結果表明

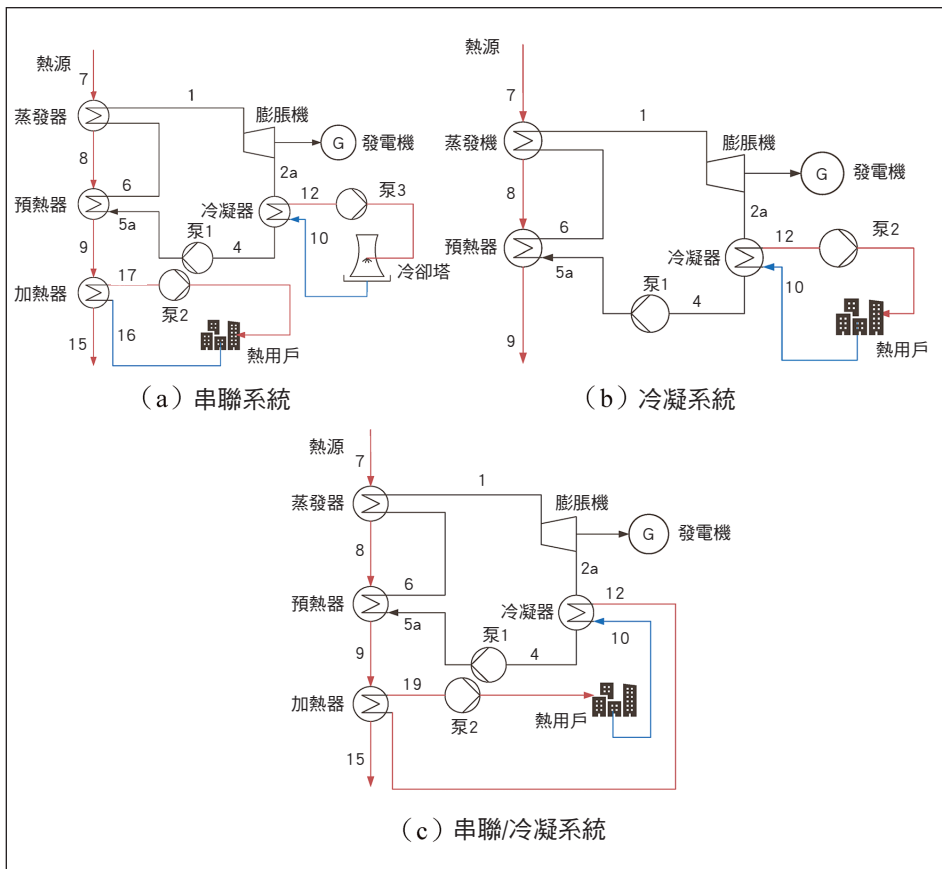


圖 29 三種 ORC-CHP 系統原理圖

串聯/冷凝系統具有最高的投資利潤率，並且三個熱電聯產系統都呈現出低電效率（小於 0.7%）和高熱效率（大於 92%）的特點[56]。

ORC 在多種儲能系統中同樣也具有重要的作用。本團隊曾提出一種結合 ORC 和渦流管的壓縮空氣儲能系統（見圖 30），其中 ORC 通過吸收壓縮空氣以及熱水的熱量來產生電力。該系統不僅實現了發電的功能，還

對其他低品位能源進行了再利用，比如利用充電階段所收集的壓縮熱對 ORC 子系統中的有機工作流體進行預熱，遵循能源「階梯式利用」的原則，使不同性質的能源得到充分利用[57]。

卡諾電池（Carnot battery）是一種新興的儲能系統，它的系統原理圖如圖 31 所示。它通過將電能（棄風棄光）轉化為熱能，將能量以熱能的形式存儲，在需要電能的時

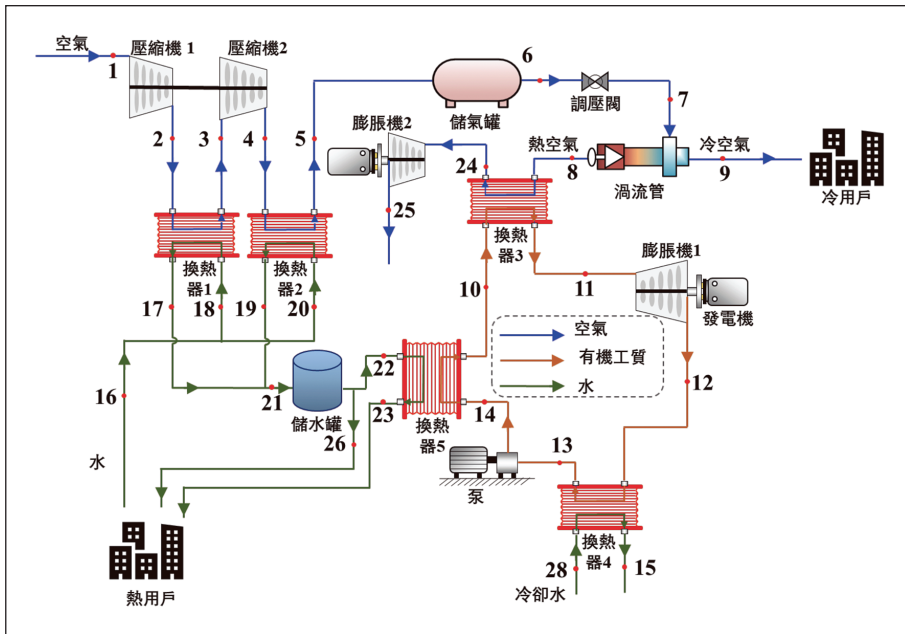


圖 30 結合 ORC 和渦流管的壓縮空氣儲能系統 [57]

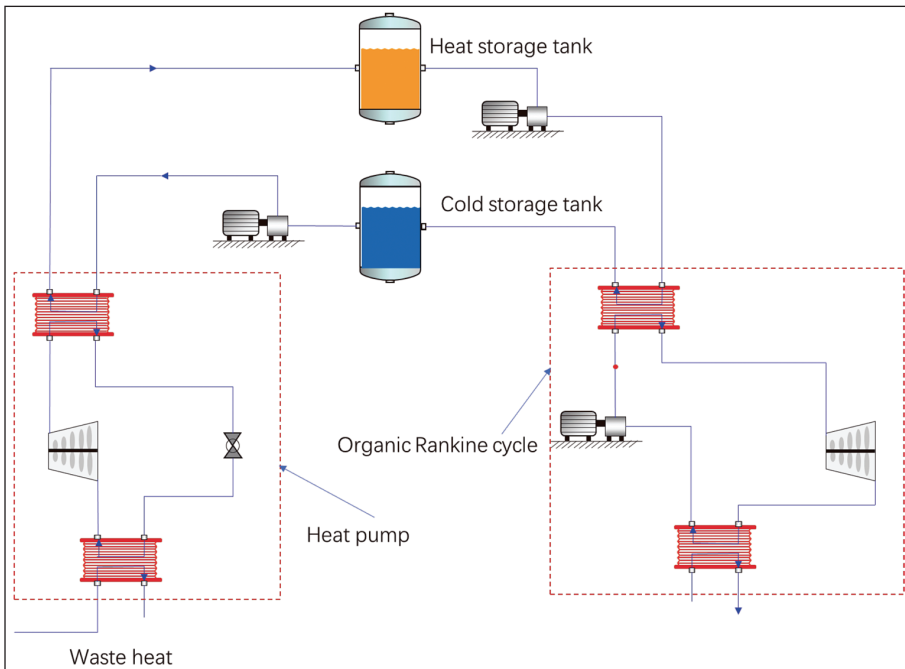


圖 31 卡諾電池系統原理圖

刻，再採用ORC進行發電。雖然在能量利用的角度，這種系統並不經濟合理，但是如果考慮到尖峰電力、離峰電力的價格差異，該系統未嘗不是一種創新的嘗試。ORC作為卡諾電池系統的重要組成部分，承擔了熱能向電能轉化的作用。因此本團隊建立了不同形式的卡諾電池系統，並針對熱泵系統結合ORC，進行了工作流體篩選及運行規律的研究，得到系統在低溫情況下運行時（除了溫度 $< 130^{\circ}\text{C}$ ）最大的儲能效率（Power to power efficiency）及焓效率分別為31.15%和23.40% [58-60]。

#### 參考文獻

1. Gulf Coast Green Energy <https://gulfcoastgreenenergy.com/why-waste-heat-to-power/>
2. J.A. Patz, C.L. Diarmid, T. Holloway, J.A. Foley, "Impact of regional climate change on human health," *Nature*, Nov. 17, 2005.
3. The Guardian, "Arctic stronghold of world's seeds flooded after permafrost melts," 2017. <https://www.theguardian.com/environment/2017/may/19/arctic-stronghold-of-worlds-seeds-flooded-after-permafrost-melts>.
4. M.Z. Donahue, "Fast-Growing Moss Is Turning Antarctica Green," May 20, 2017. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/antarctica-green-climate-moss-environment>.
5. IPCC Special Report, "Global Warming of  $1.5^{\circ}\text{C}$ ," 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
6. R.E. Baker, A.S. Mahmud, et al. "Infectious disease in an era of global change," *Nature Reviews Microbiology*, 20, 193-205, 2022.
7. B. Smith "What happens if the permafrost disappears?" 19 January 2022. <https://cosmosmagazine.com/earth/climate/what-if-arctic-permafrost-melts/>
8. 碳權、碳費、碳稅是什麼？碳交易市場如何運作？是否真的能幫助減碳？ - Greenpeace 綠色和平 | 臺灣
9. Theresa Smith, ESI Africa, Feb. 25 2022, <https://www.esi-africa.com/industry-sectors/energy-efficiency/south-africa-extends-a-carbon-tax-lifeline-for-now/>
10. Refinitiv Carbon Research | Refinitiv
11. <https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&sid=5602e0a735d34b4ee381d4a37a77f880&sort=a&sd=a&sl=37&s=TITLE-ABS->
12. 全球專利檢索系統
13. T.C. Hung, Y.Q. Feng, "Organic Rankine Cycle – A negative-carbon approach in power generation from low-temperature waste heat," Keynote speech at the 2nd International Conference on Power and Energy Engineering, Munich, Germany, July 17-18, 2017.
14. 洪祖全, 「有機朗肯迴路：一種負碳方式應用於低溫熱能之發電系統」, 111 年度廢熱與廢冷回收技術應用研討會, 經濟部能源局, 臺北市, 臺灣, 111 年 4 月 29 日。
15. M.H. Yang, R.H. Yeh, "Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle system utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine," *Applied Energy* 2015, 149:1-12.
16. P.J. Li, T.C. Hung, B.S. Pei, J.R. Lin, C.C. Chieng, G.P. Yu, "A thermodynamic analysis of high temperature gas-cooled reactors for optimal waste heat recovery and hydrogen production," *Applied Energy*, Vol. 99, November 2012, pp. 183-191.
17. UNEP/ASHRAE Refrigerant Factsheet (April 4, 2020)
18. T.C. Hung, S.K. Wang, C.H. Kuo, B.S. Pei, K.F. Tsai, "A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources," *Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 1403-1411.
19. B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer, "Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1210-1221, Jul. 2007
20. H. Chen, D. Yogi, E.K. Stefanakos, "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3059-3067, Dec. 2010.
21. M. Aslam and B. Atakan, "Alkanes as fluids in Rankine cycles in comparison to water, benzene and toluene," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 256-263, Sep. 2012.
22. J.P. Roy, M.K. Mishra, A. Misra, "Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5049-5062, Dec. 2010.
23. T.Q. Nguyen, J.D. Slawwhite, K.G. Boulama, "Power generation from residual industrial heat," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 11, pp. 2220-2229, Nov. 2010.
24. M. Qyyum, A. Khan, S. Ali, M. Shahzad, N. Mao, A. Naquash, A. Aslam, T. He, M. Lee, "Assessment of working fluids, thermal resources and cooling utilities for Organic Rankine Cycle: State-of-the-art comparison, challenges, commercial status, and future prospects," *Energy Conversion and Management*, Vol.



- 252, January 2022, 115055.
25. T.C. Hung, T.Y. Shai, S.K. Wang, "A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat," *Energy*, vol. 22, no. 7, pp. 661-667, July 1997.
  26. T.C. Hung, "Waste Heat Recovery of Organic Rankine Cycle Using Dry Fluids," *J. Energy Conversion and Management*, Vol. 42, 2001, pp. 539-553.
  27. T.C. Hung, S.K. Wang, C.H. Kuo, B.S. Pei, K.F. Tsai, "A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources," *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1403-1411, March 2010.
  28. A.J. Gunning and J.S. Rowlinson, "The prediction of the thermodynamic properties of fluids and fluid mixtures — III. Applications," *Chemical Engineering Science*, vol. 28, no. 2, pp. 521-527, Feb. 1973.
  29. R. Jakobs and H. Kruse, "The use of non-azeotropic refrigerant mixtures in heat pumps for energy saving," *International Journal of Refrigeration*, vol. 2, no. 1, pp. 29-32, Jan. 1979.
  30. O.A. Oyewunmi, A.I. Taleb, A.J. Haslam, C.N. Markides, "On the use of SAFT-VR Mie for assessing large-glide fluorocarbon working-fluid mixtures in organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 163, pp. 263-282, Feb. 2016.
  31. S. Lecompte, B. Ameel, D. Ziviani, M. van den Broek, M. De Paepe, "Exergy analysis of zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 727-739, Sep. 2014.
  32. J. Bao and L. Zhao, "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 325-342, Aug. 2013.
  33. H. Chen, D. Yogi, M.M. Rahman, E.K. Stefanakos, "A supercritical Rankine cycle using zeotropic mixture working fluids for the conversion of low-grade heat into power," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 549-555, Jan. 2011.
  34. V. Pethurajan, S. Sivan, G.C. Joy, "Issues, comparisons, turbine selections and applications – An overview in organic Rankine cycle," *Energy Conversion and Management*, Vol. 166, 2018, pp. 474-488.
  35. G. Qiu, H. Liu, S. Riffat, "Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle," *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(16): 3301-3307.
  36. T. Saitoh, N. Yamada, S.I. Wakashima, "Solar Rankine cycle system using scroll expander," *Journal of Environment and Engineering*, 2007, 2(4): 708-719.
  37. S. Quoilin, S. Declaye, A. Legros, L. Guillaume, V. Lemort, "Working fluid selection and operating maps for Organic Rankine Cycle expansion machines," 21st international compressor conference at Purdue, 2012.
  38. Y. Zhu, W. Li, J. Li, et al. "Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO<sub>2</sub> capture," *Energy Conversion and Management*, 2020, 204: 112310.
  39. Y. Feng, W. Zhang, H. Niaz, et al. "Parametric analysis and thermo-economical optimization of a Supercritical-Subcritical organic Rankine cycle for waste heat utilization," *Energy Conversion and Management*, 2020, 212: 112773.
  40. R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakham, et al. "Performance analysis of biomass boiler-organic Rankine cycle with assisted cascade heat pump for combined heat and power generation including exergy-costing," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52: 102125.
  41. P. Lu, X. Luo, J. Wang, et al. "Thermo-economic design, optimization, and evaluation of a novel zeotropic ORC with mixture composition adjustment during operation," *Energy Conversion and Management*, 2021, 230: 113771.
  42. M. Pan, F. Lu, Y. Zhu, et al. "Thermodynamic, exergoeconomic and multi-objective optimization analysis of new ORC and heat pump system for waste heat recovery in waste-to-energy combined heat and power plant," *Energy Conversion and Management*, 2020, 222: 113200.
  43. J. Nondy, T.K. Gogoi, "Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study," *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114593.
  44. S. Wang, C. Liu, S. Zhang, et al. "Multi-objective optimization and fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) system based on economic-environmental-sustainable analysis," *Energy Conversion and Management*, 2022, 254: 115238.
  45. <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?cchk=1b3221ee-37c3-4811-9d4d-albb215f33c8&cid=351&mid=213>
  46. 淺談工業廢熱回收 (learnenergy.tw)
  47. J.C. Chang, T.C. Hung\*, Y.L. He, W.P. Zhang, "Experimental study on low-temperature organic Rankine cycle utilizing scroll type expander," *Applied Energy*, Vol. 155, October 2015, pp.150-159.
  48. K.C. Pang, S.C. Chen, T.C. Hung\*, Y.Q. Feng\*, S.C. Yang, K.W. Wong, J.R. Lin, "Experimental study on organic Rankine cycle utilizing R245fa, R123 and their mixtures to investigate the maximum power generation from low-grade heat," *Energy*, Vol. 133 (22 May 2017), 636-651.
  49. Y.Q. Feng, T.C. Hung\*, T.Y. Su, S. Wang, Q. Wang\*\*,



- S.C. Yang, J.R. Lin, C.H. Lin, "Experimental investigation of a R245fa-based organic Rankine cycle adapting two operation strategies: Stand alone and grid connect," *Energy*, December 2017, 141: 1239-1253.
50. Y.Q. Feng, T.C. Hung\*, Y.L. He, Z.X. He, Q. Wang, C.H. Lin, S. Wang, "Experimental investigation of lubricant oil on a 3kW organic Rankine cycle (ORC) using R123," *Energy Conversion and Management*, Vol. 182, February 2019, pp. 340-350.
  51. H.C. Sun, J. Qin\*, T.C. Hung\*, C.H. Lin, P.G. Yan, "Effect of flow losses in heat exchangers on the performance of organic Rankine cycle," *Energy*, Vol. 172, April 2019, pp. 391-400.
  52. M. Zhao, G. Shu, H. Tian, et al. "The investigation of the Recuperative Organic Rankine Cycle models for the waste heat recovery on vehicles," *Energy procedia*, 2017, 129: 732-739.
  53. H. Xi, M.J. Li, C. Xu, et al. "Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm," *Energy*, 2013, 58: 473-482.
  54. J. Song and C. Gu, "Parametric analysis of a dual loop Organic Rankine Cycle (ORC) system for engine waste heat recovery," *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 995-1005.
  55. G. Manente, A. Lazzaretto, E. Bonamico, "Design guidelines for the choice between single and dual pressure layouts in organic Rankine cycle (ORC) systems," *Energy*, 2017, 123: 413-431.
  56. Teng S, Wang M, Xi H, Wen S. Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different ORC based CHP systems for waste heat recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 2021;28:101444.
  57. Teng S, Xi H. Experimental evaluation of vortex tube and its application in a novel trigenerative compressed air energy storage system. *Energ Convers Manage* 2022;268:115972.
  58. Fan R, Xi H. Exergoeconomic optimization and working fluid comparison of low-temperature Carnot battery systems for energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104453.
  59. Tian W, Xi H. Comparative analysis and optimization of pumped thermal energy storage systems based on different power cycles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 259: 115581.
  60. Fan R, Xi H. Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different Carnot battery systems for energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252: 115037.

# 太陽能系統建置

## EPC服務方案



創！儲！節！  
**三能齊合**

／照亮每顆愛地球的心／



### 1. 現場勘查 Site Survey

- 高低壓盤體設備設置
- 建置案場現況環境評估



### 2. 設計模擬 Simulation

- 依客戶需求提供模擬
- PV配置規劃(Solar Pro)



### 3. 解決方案 Proposal

- 計算投資效益
- 提供報價、付款條件和保固服務
- 模擬發電效率
- 評估售電收入
- 提供創新的商業模式



### 6. 電廠承裝/配管工程 Construction

- 太陽光系統方案設置



### 5. 台電及 能源局跑件



### 4. 契約簽訂 Contract

- 確認訂單、保固、維修與交貨時間等交易條件
- 驗收



### 7. 維運服務 Maintenance Service

- 保固服務
- 保修服務
- 發電量監控服務

聯絡資訊

綠能服務處

TEL : +886-2-2712-2211 #5915、5917  
FAX : +886-2-2718-5596  
E-mail : 80652806@nypi.com.tw

產品網頁



**NYPI 南亞光電**

# 中宇

卓越  
誠信  
技術  
品質

股票上市公司

ISO9001 / ISO45001

驗證通過

- 水處理及回收工程  
Water Treatment & Recycling
- 汽電共生廠及發電廠工程  
Co-generation Plant & Power Plant Turnkey
- 生物製劑及藥廠建廠統包工程  
Turnkey Project for Biotech & Biopharmaceutical Facility
- 整廠機電及公共設施工程  
Mechanical & Electrical & Utility Engineering Systems
- 廢棄物處理及空氣污染防治  
Waste Treatment & Air Pollution Control
- 耐火材料工程  
Refractory Engineering
- 工業級LED燈具之製作 & 銷售  
Industrial-grade LED Lighting(Production & Sales)
- 工業/家用型空氣清淨機及濾材開發製作 & 銷售  
Industrial/Residential Air Purifier, Filters Manufacturing & Sales



澄清湖高級淨水處理設備工程  
Chenchin Lake Advanced Water Treatment Plant



生技廠工程  
Biopharmaceutical Plant



工業廢水純化場  
Industrial Waste Water Purification Plant



化工廠工程  
Chemical Plant



空氣污染防治系統  
Air Pollution Control System



中宇環保工程股份有限公司  
CHINA ECOTEK CORPORATION

高雄市前鎮區成功二路88號8樓  
8F., NO.88, CHENGONG 2ND ROAD, CIANJHEN DIST.,  
KAOHSIUNG CITY 80661, TAIWAN, R.O.C.  
TEL : 07-3336138 FAX : 07-3363030  
E-mail address : guest@ecotek.com.tw  
Web : http://www.ecotek.com.tw

CSC Group  
中鋁集團



## 臺灣仲裁協會

工程界仲裁最佳選擇機構

公平、公正、快速解決爭議

受理營造、土木、建築、結構、水利、環工、大地、水土  
保持、電機、機械、建設、房地產等有關民間營建工程及  
公共營建工程之仲裁及調解事件

本會已成立台中、高雄辦事處

台中辦事處：404台中市北區崇德一路629號B棟4樓之2。

高雄辦事處：804高雄市鼓山區文信路335號13樓。

地址：台北市信義區基隆路二段141、143號4樓

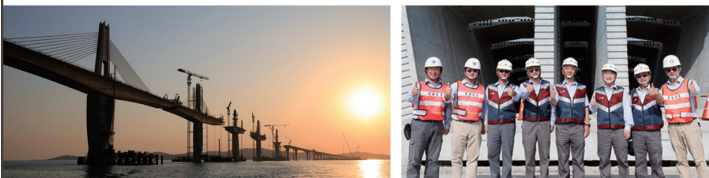
電話：02-27381667 聯絡人：王小姐、廖小姐

傳真：02-27399428 網址：www.tcaa.org.tw

E-MAIL：aacd.twn@msa.hinet.net



金門大橋建設計畫第CJ02-2C標金門大橋接續工程  
21屆公共工程金質獎／公共工程品質優良獎—土木工程類／特優



Creativity · Excellence · Conservation · Integrity

台北市11491內湖區陽光街323號  
No. 323 Yangguang Street, Neihu District, Taipei City 11491, TAIWAN  
Tel:(02) 8797-3567 Fax:(02) 8797-3568  
http://www.ceci.com.tw E-mail:pr@ceci.com.tw

用心  
做好每一件事情

匠心，才得以淬煉「專業」品質  
誠心，才足以貫徹「人本」信念  
悉心，才可以恢宏「關懷」情操  
台灣世曦永遠以「心」為出發  
持續履行對土地、對人民不變的承諾  
一個環境永續的生態樂園  
一個幸福溫馨的生活家園