



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，

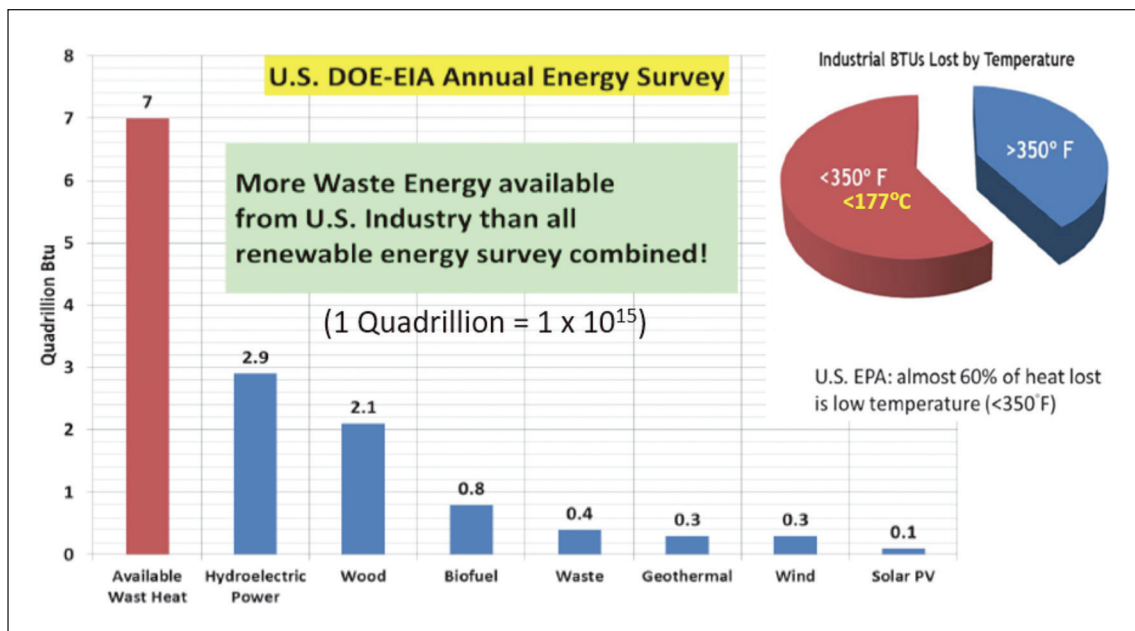


圖 1 美國在 2012 年的廢熱與各種再生能源的總量分佈 [1]



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

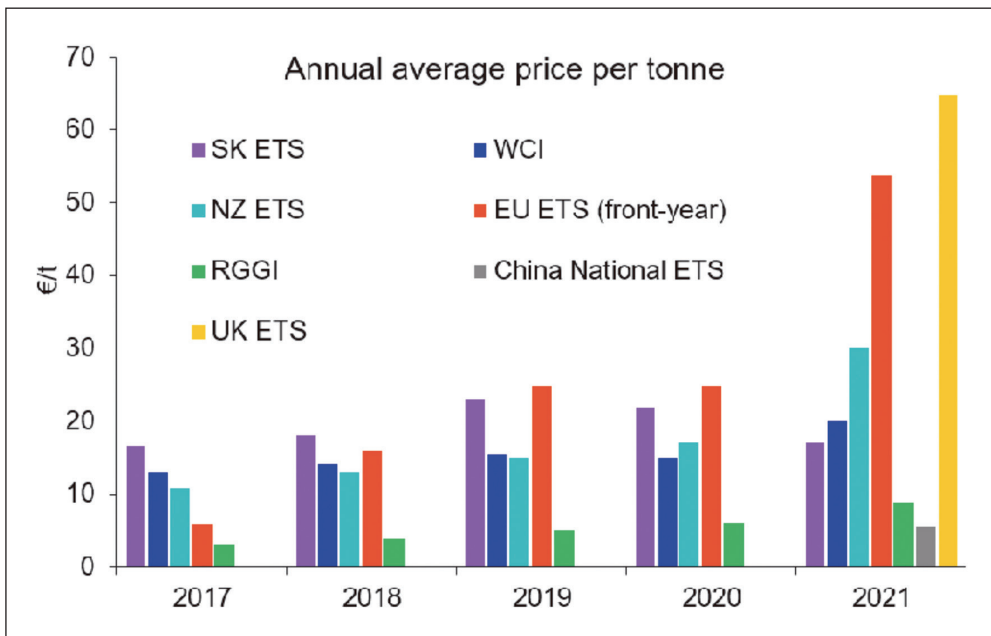


圖 4 近年來碳交易市場價格 [10]
(RGGI: Regional Greenhouse Gas Initiative)

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

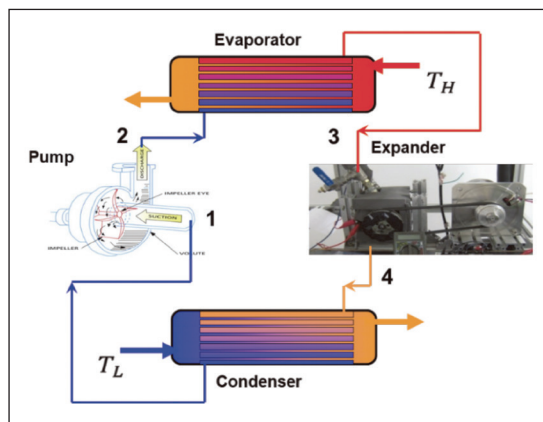


圖 5 簡易 ORC 示意圖



圖 6 ORC 與可利用的熱源及冷源間的示意關係

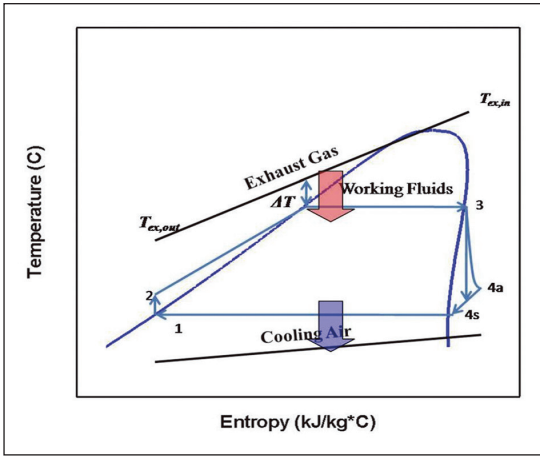


圖 7 ORC 與熱源及熱沉在溫度 - 熵圖上的相互關係

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

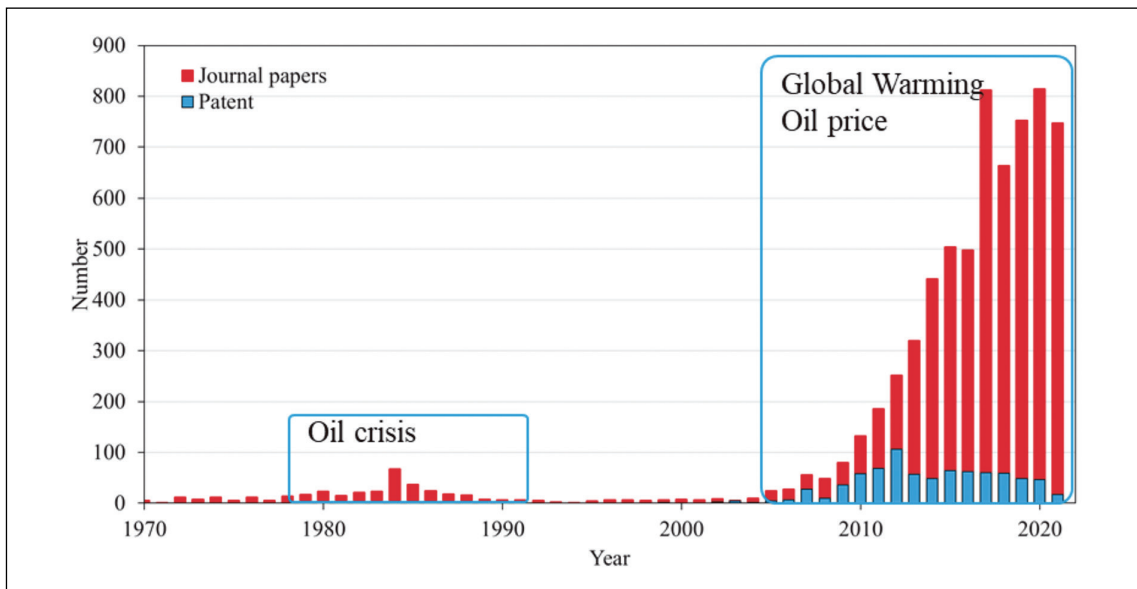


圖 8 過去半個世紀與 ORC 有關的期刊著作與專利 [11、12]

大氣或海洋冷卻掉，因此如果能夠將這些原本經由會產生CO₂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CO₂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

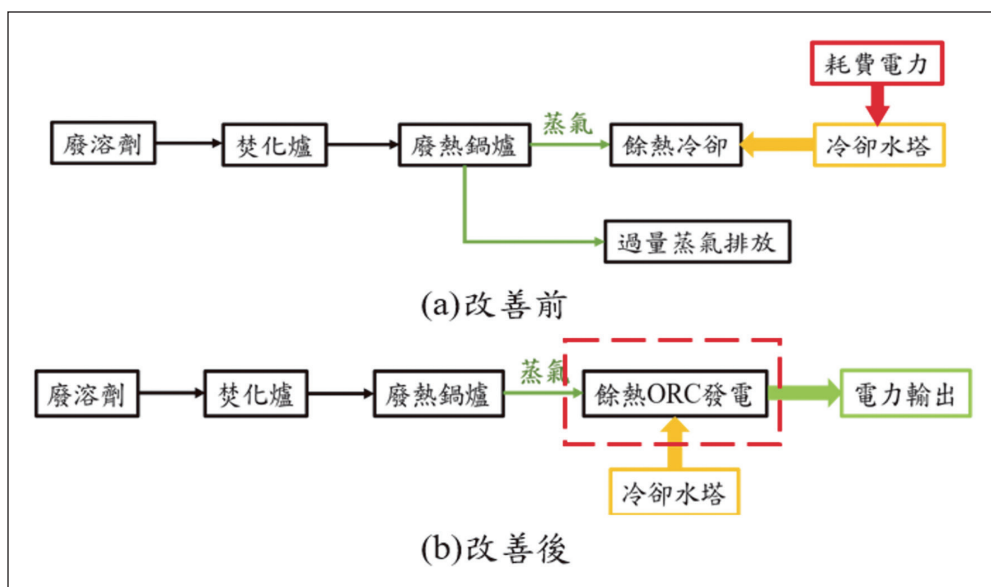


圖 9 工業製程丟棄的某溫度區間能量利用 ORC 回收發電的圖例

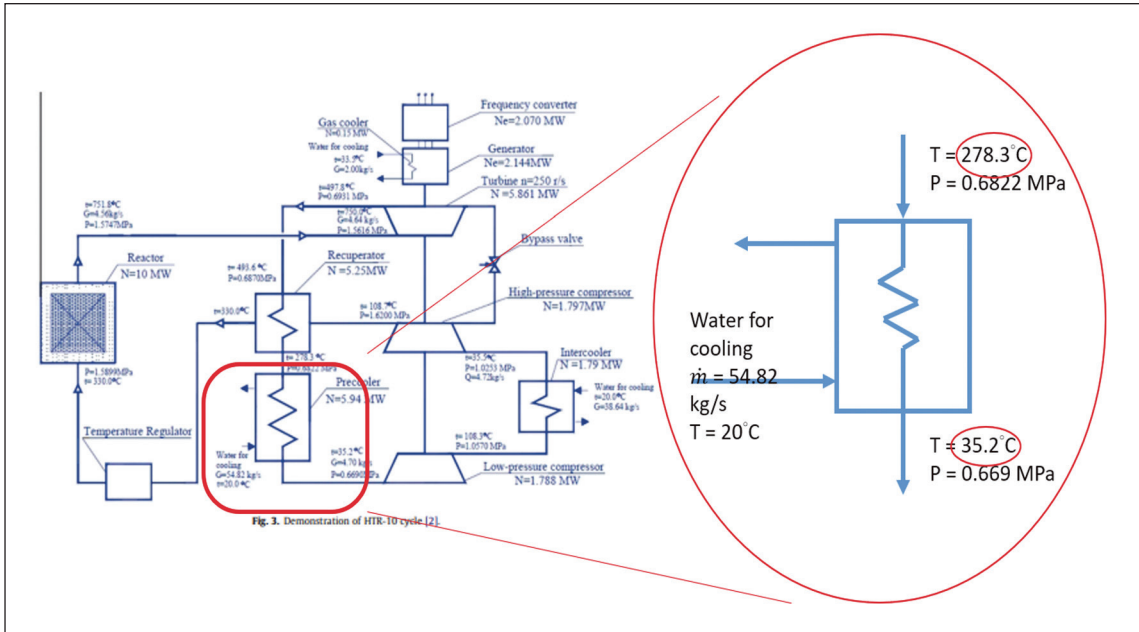


圖 10 工業製程某溫度區間能量丟棄範例

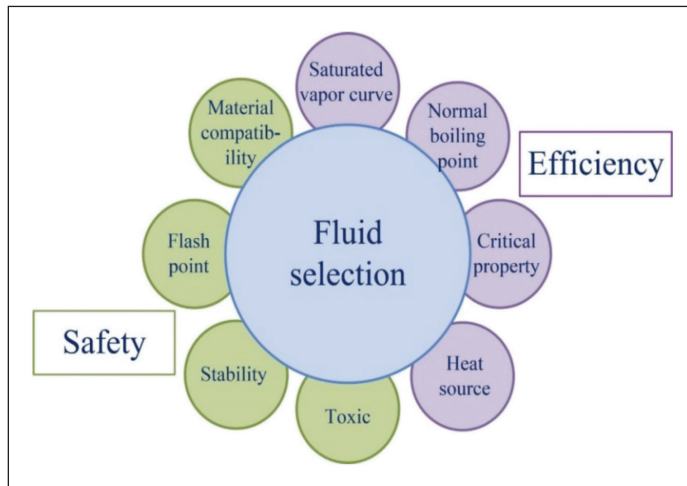


圖 11 工作流體篩選的基本考量

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%和焓效率為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。

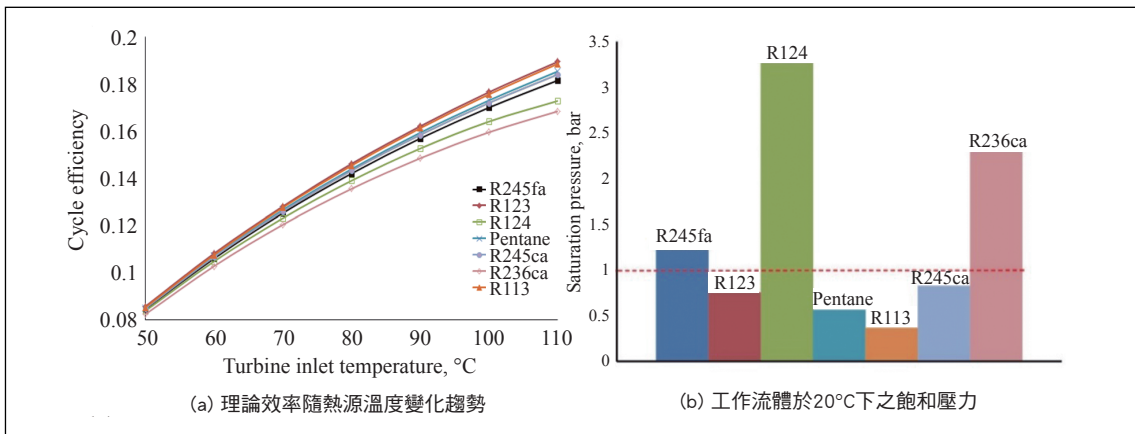


圖 12 工作流體理論效率分析。模擬條件：泵入口 20°C 之飽和液態；膨脹機入口乾度 :1.0；膨脹器與泵效率：100%；忽略熱交換器壓降。

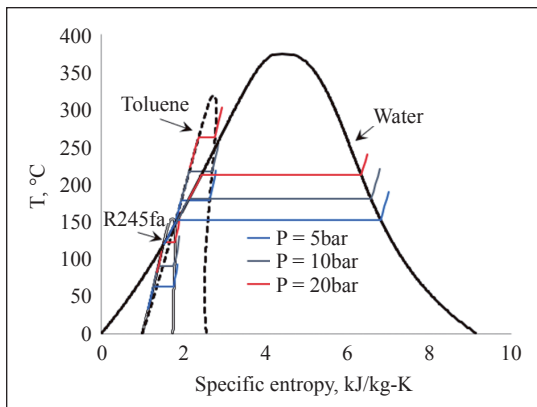


圖 13 有機流體與水的飽和曲線之差異

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

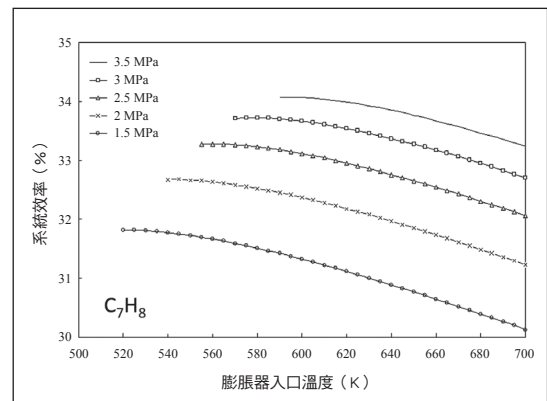


圖 14 乾流體 C_7H_8 過熱度變化對 ORC 效率的影響 [25] (泵入口溫度： $20^{\circ}C$)

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。

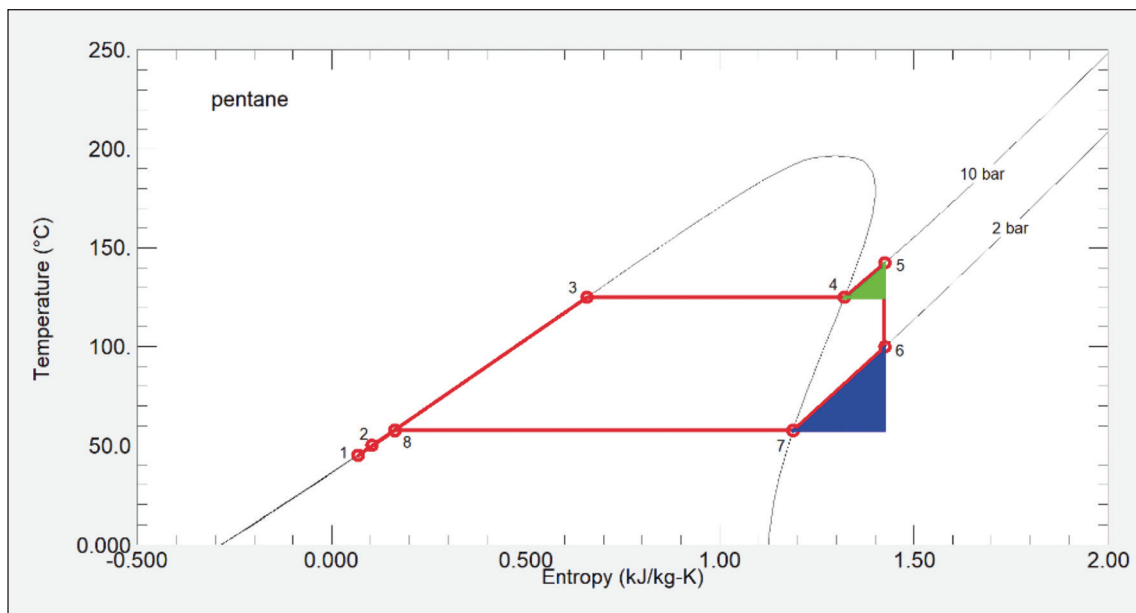


圖 15 膨脹器入口之過熱程度對系統性能的影響

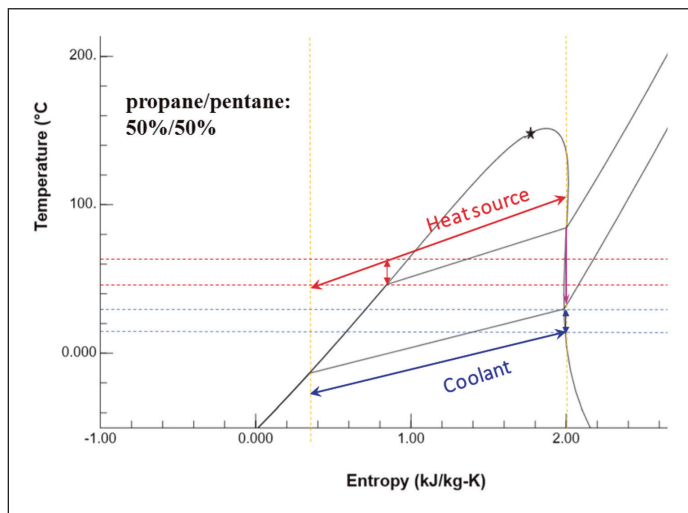


圖 16 T-s 圖顯示混合流體與 ORC 的最佳搭配案例

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

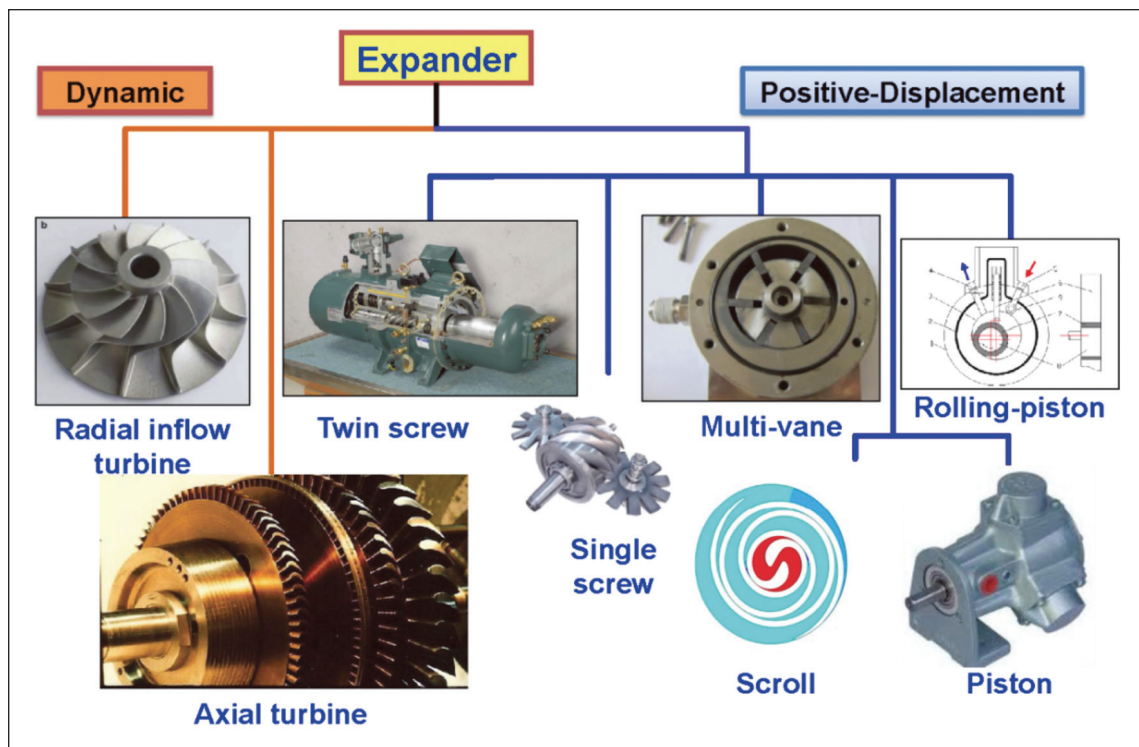


圖 17 膨脹器分類

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

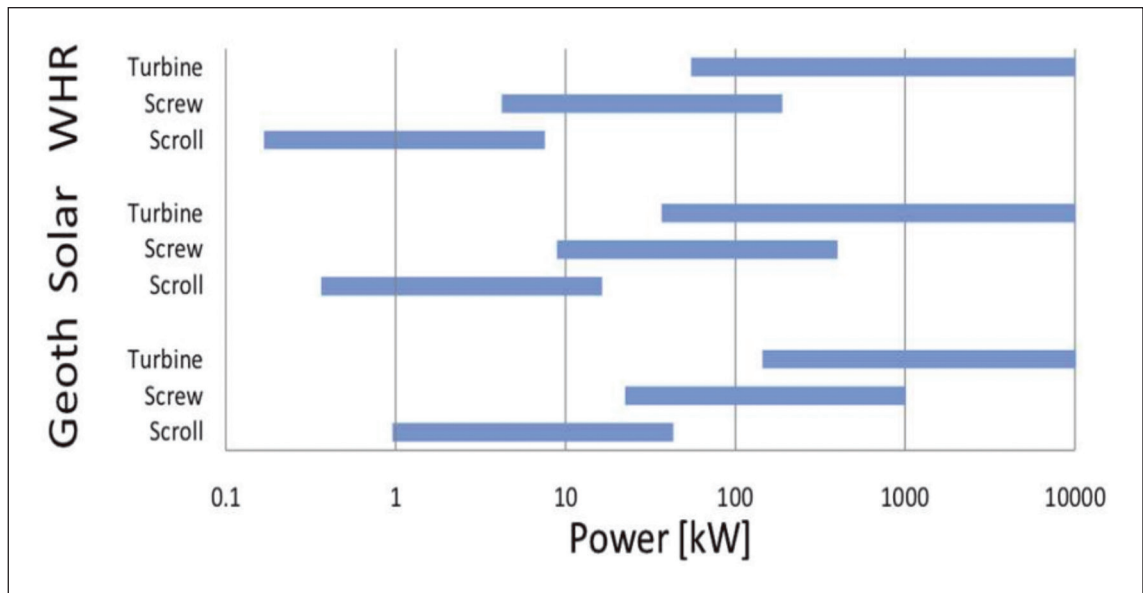


圖 18 膨脹器工作範圍 [37]

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°C

或以下時，焓的單位成本基本穩定，基本在 0.08USD/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，

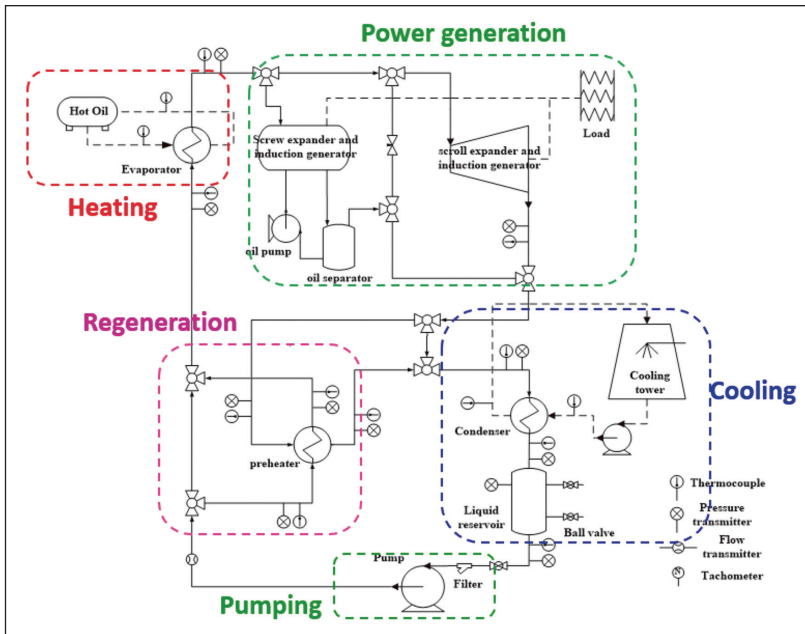


圖 19 本研究團隊的 ORC 系統流程示意圖

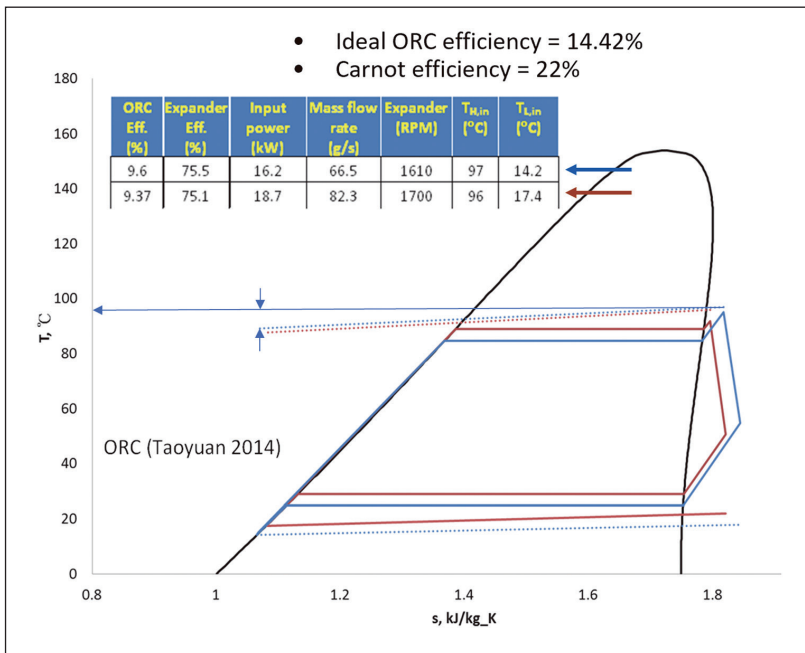


圖 20 本研究團隊的 ORC 系統流程示意圖

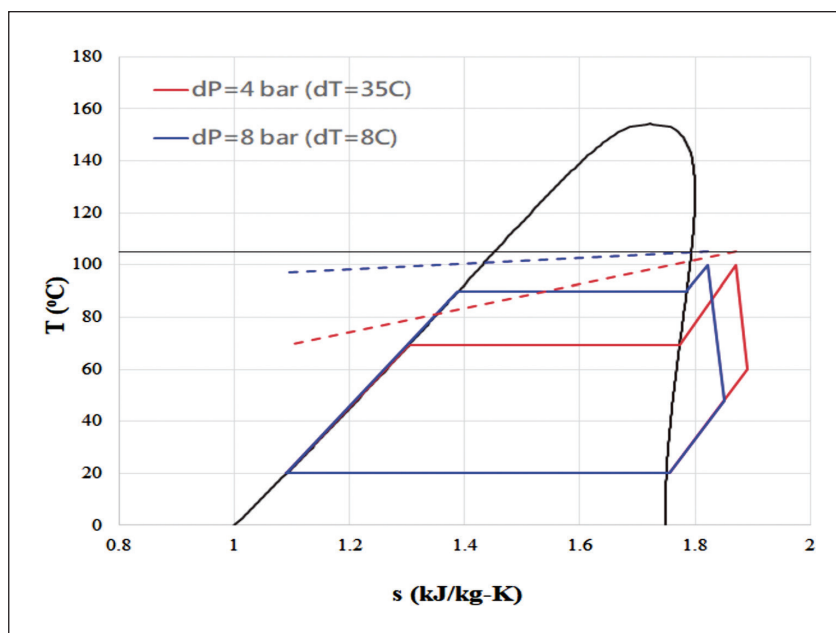


圖 21 ORC 系統壓差所對應的熱源利用示意圖

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

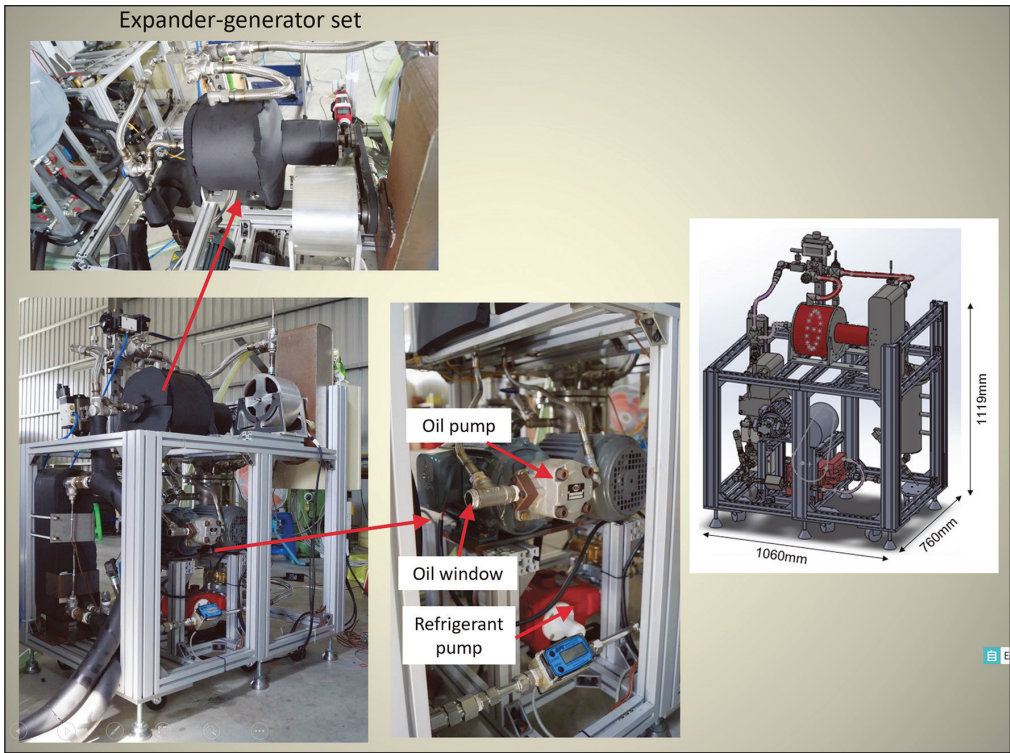


圖 22 3 kW ORC 環路

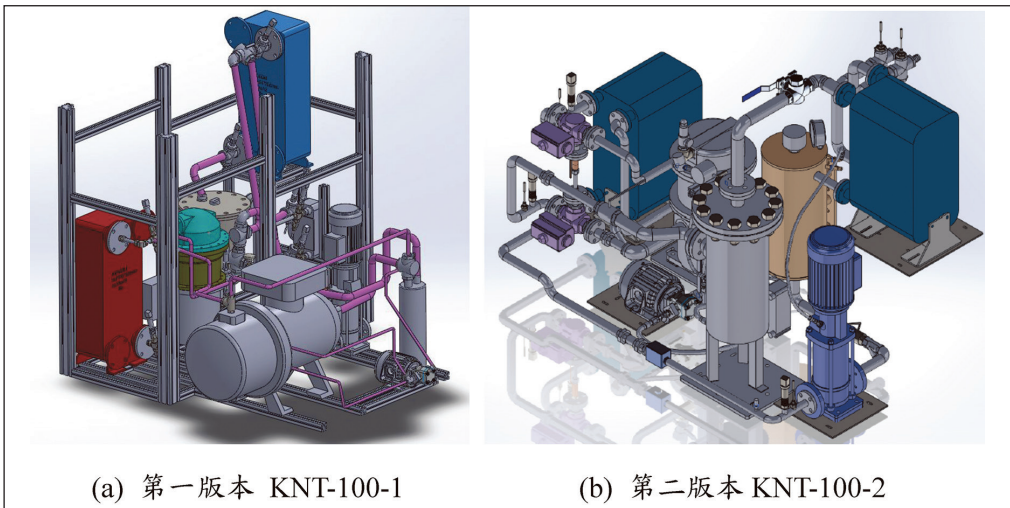


圖 23 兩種 10 kW ORC 環路版本

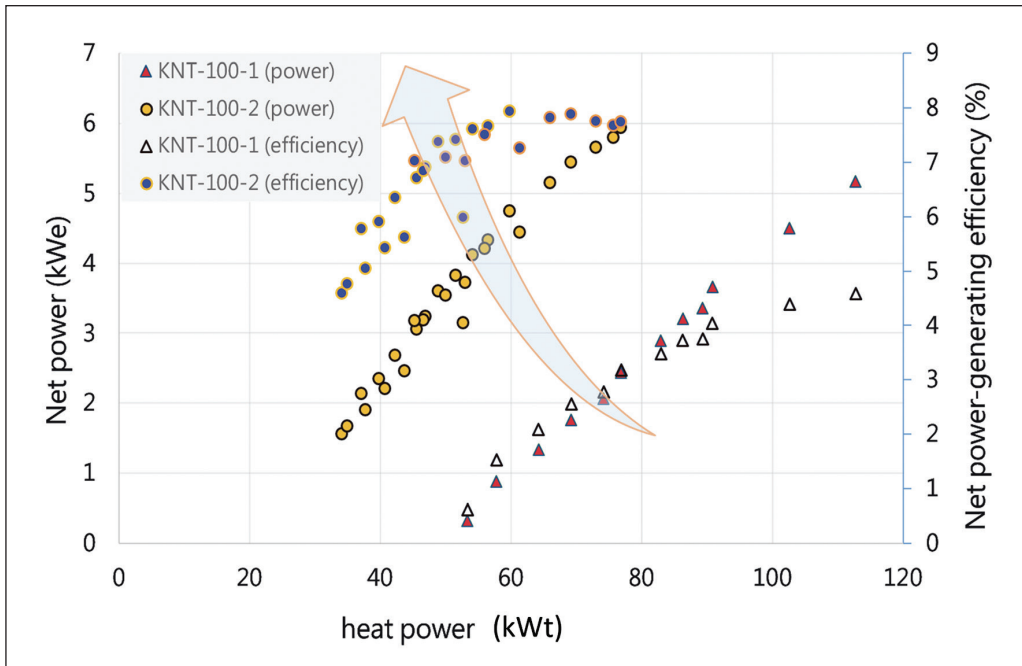


圖 24 兩種 10 kW ORC 環路版本之運轉結果比較

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。

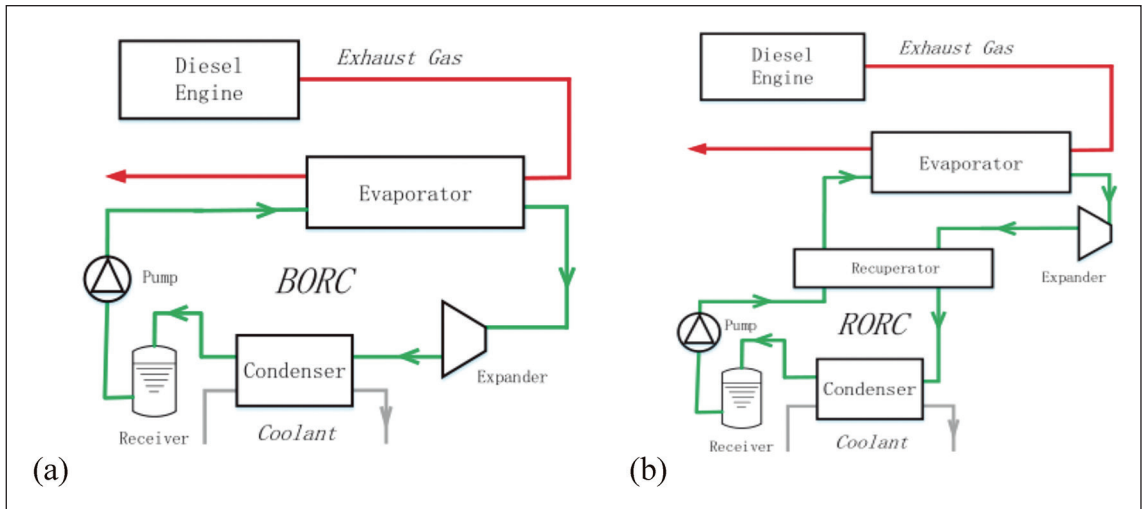


圖 25 (a) BORC 模型 ; (b) RORC 模型 [52]

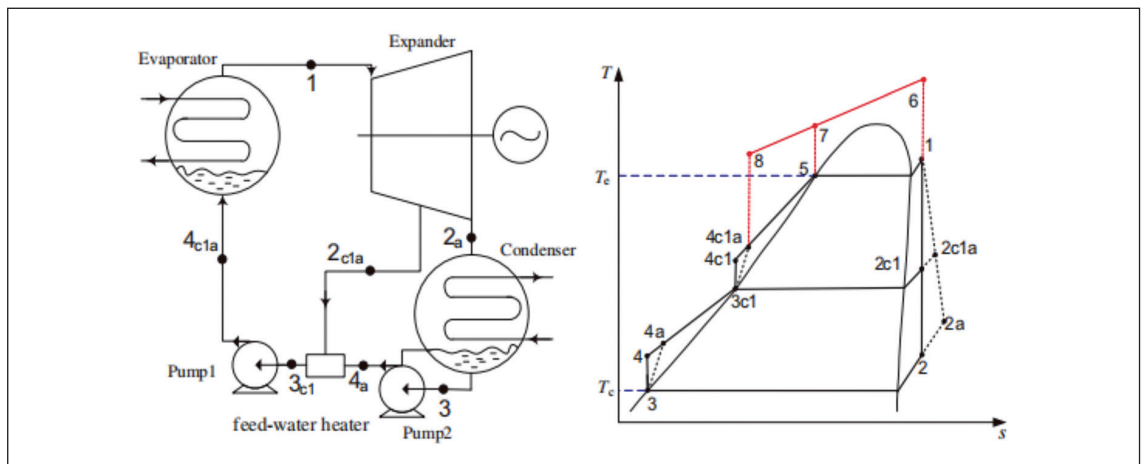


圖 26 DRORC 系統佈局與其 T-s 圖 [53]

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

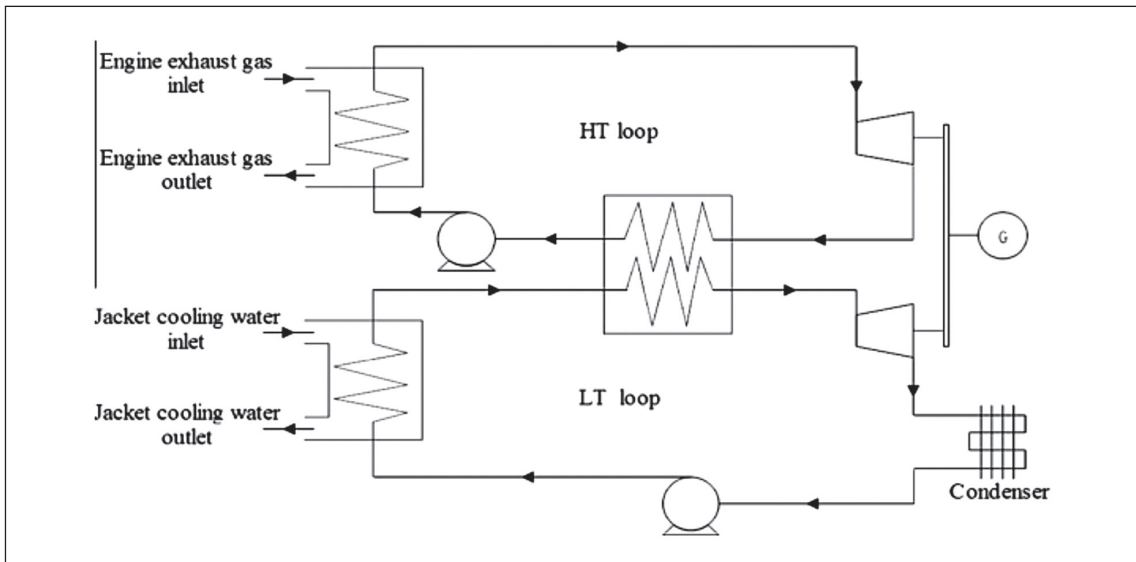


圖 27 應用於引擎廢熱回收的雙 ORC 循環的示意圖 [54]

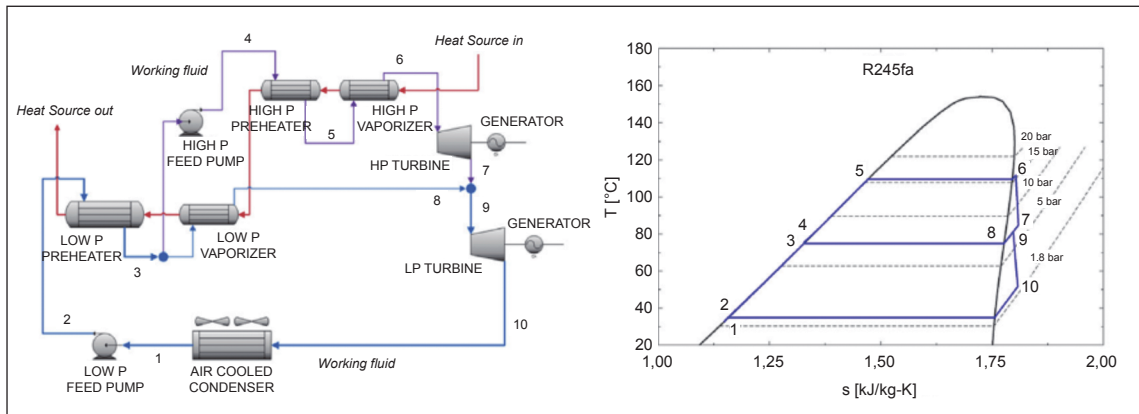


圖 28 雙壓力迴圈系統之佈置與 T-s 圖上的循環示意圖 [55]

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

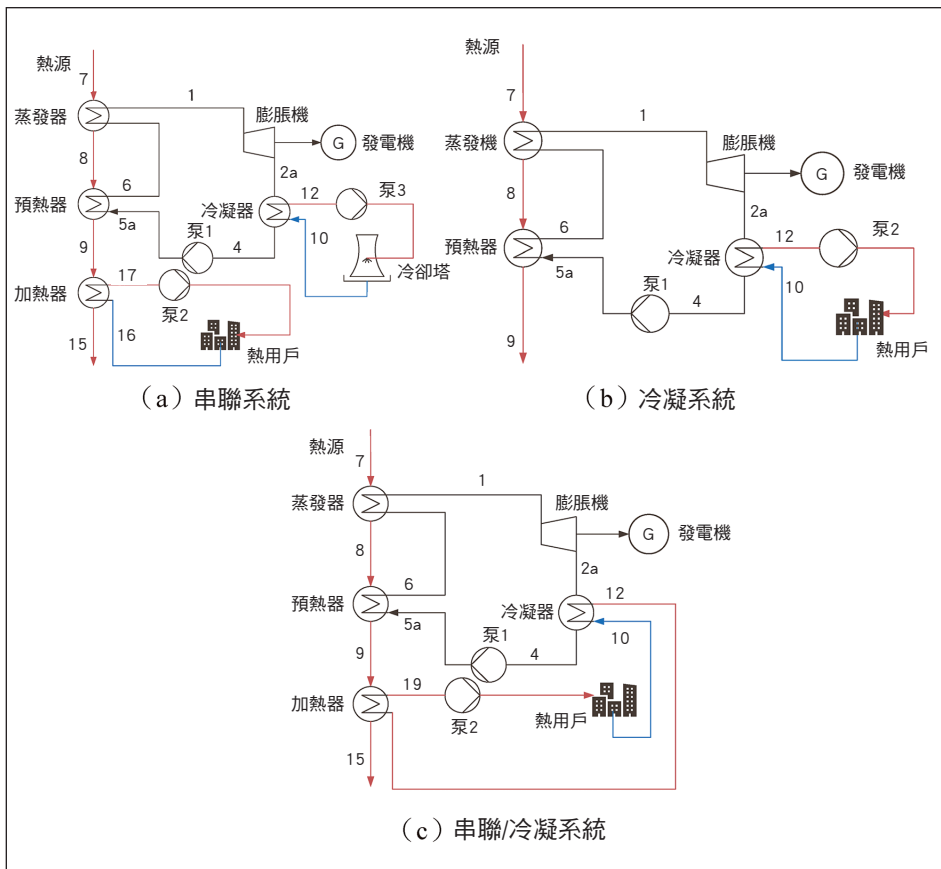


圖 29 三種 ORC-CHP 系統原理圖

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

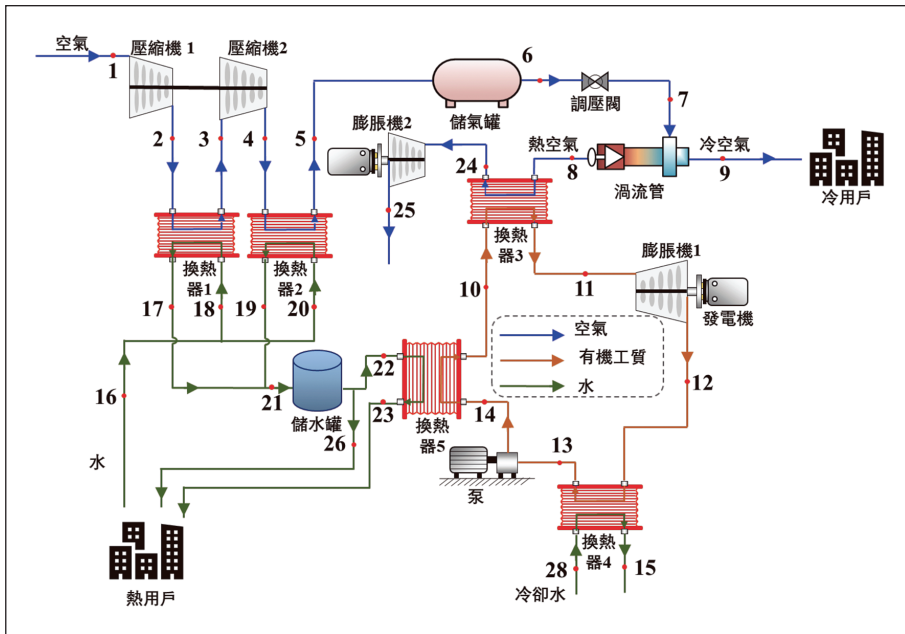


圖 30 結合 ORC 和渦流管的壓縮空氣儲能系統 [57]

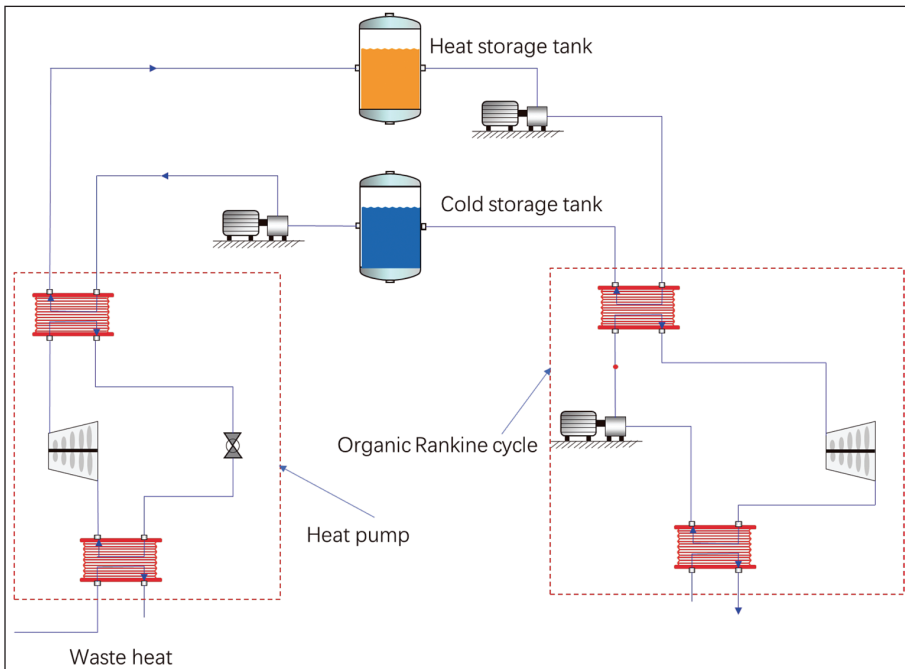


圖 31 卡諾電池系統原理圖

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°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 CO2 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.