

200 瓩有機朗肯循環(ORC)發電系統於化工製程節能應用

李毓仁¹、劉力維¹、張家銘¹、謝瑞青¹

¹ 工業技術研究院 綠能與環境研究所

* 通訊作者，Email:lee0089@itri.org.tw

經濟部能源局計畫編號：103-E0206

摘 要

工研院接受台灣化學纖維股份有限公司SM3廠委託，應用能源局專案計畫「低溫熱電系統及廢熱回收技術計畫」衍生之螺桿膨脹機ORC技術，於台灣化學纖維股份有限公司苯乙烯製程進行廢熱回收發電系統開發。本系統選用R134a作為ORC循環工作流體，工研院進行設計、開發一低溫型200瓩ORC發電機組，其動力系統關鍵元件有昇壓泵浦、蒸發器、過熱器、注油式雙螺桿膨脹機、油汽分離器、殼管式冷凝器等，發電機則採用內嵌式感應發電機，電力可直接併連廠內電力網。本ORC發電機組為國內首次成功研發之低溫型(82℃)200kWe機組，且自製率百分之百，於化工廠內24小時不停機長時間運轉，展示國產ORC技術開發成果。在製程排放熱源溫度為82℃流量200TPH，冷源溫度為30℃流量為800TPH的條件下，本發電系統可達發電量227.5kWe，淨發電量為193.75kWe，機組淨發電效率4.701%，符合系統設計。

關鍵字：有機朗肯循環、溫差發電、螺桿膨脹機

一、前言

有機朗肯熱機循環(organic Rankine cycle，ORC)發電機組乃利用有機工作流體(organic working fluid)的物理特性、化學性質和熱力行為於蒸發器內汲取低焓熱源(低階或中階熱能，例如工業餘熱、地熱/溫泉、廢棄物熱能、太陽熱能等)的熱能，並利用作功元件(例如：螺桿膨脹機、渦輪機、渦卷膨脹機等)將此熱能轉換為機械旋轉能，再利用發電機將此旋轉動能轉換為電力輸出。臺灣化學纖維股份有限公司(以下簡稱台化公司)六輕麥寮的化工二部苯乙烯廠三廠製程後端尚有200TPH的82.0℃熱水，需以冷卻水塔降溫回收，其熱能未回收而增加冷卻水塔負荷。爰此，依據台化公司排放之廢熱水作為熱源條件，設計、開發、建造一螺桿機200瓩熱水有

機朗肯循環ORC溫差發電系統，做為化工製程餘熱回收發電平台。

1.1 工作原理

有機朗肯循環(organic Rankine cycle，ORC)發電機組是利用有機工作流體的熱力特性將冷、熱源間的溫差熱能轉換為壓力差，再利用螺桿膨脹機轉換為機械旋轉動能帶動發電機產生電力輸出，因此應用範圍廣泛，可做為工業餘熱(溫差約 60~300℃)、地熱/溫泉(溫差約 70~150℃)、廢棄物熱能(溫差約 150~300℃)、太陽熱能(溫差約 70~300℃)、海洋溫差(溫差約 15~25℃)等低階或中階熱能轉換為電力的共同技術平台。而且，ORC 發電機組的熱力循環迴路為密閉系統，迴路內的工作流體透過熱交換板片或管殼和冷熱源傳遞熱能。由於機組迴路內的有機工作流體不受外界環境污

染，關鍵元件運轉、操作條件佳，因此機組具備壽期長、穩定性佳、可靠度高、維修週期長等產品特性。本 ORC 技術應用於地熱發電、餘熱發電、工業廢熱時，由於無需燃料成本，因此發電成本低廉，投資回收期短。本文將以工研院成功開發完成的 200 瓩 ORC 化工製程廢熱發電機組為載台，討論與介紹 ORC 機組的設計、開發與性能測試性能分析結果。

ORC 發電機組的熱力循環運轉方式藉由下列元件所構成：(A)昇壓單元：利用泵浦將低壓液態之有機工作流體升壓並輸送至取熱元件(蒸發器)；(B)取熱元件：利用蒸發器(殼管式熱交換器)擷取外界熱源熱能，藉以加熱及蒸發 ORC 迴路系統的可機工作流體，成為高壓高溫之汽態狀；(C)熱功轉換元件：利用體積式/速度式作功元件將有機工作流體的熱能與壓力能轉換為機械軸功，機械軸功再藉由發電機產生電力，工作流體則因對熱功轉換元件作功，成為低壓高溫之汽態狀；(D)排熱元件：有機工作流體流由低壓高溫之汽態狀，利用冷凝器(殼管式熱交換器)帶走汽態有機工作流體熱能並冷凝成為液態有機工作流體；完成 ORC 發電機組的熱力循環。(圖 1)

由於本熱力循環為密閉循環迴路，工作介質與作功元件未與外界接觸，潔淨性良好，機組具備可靠度佳，壽期長等特點。

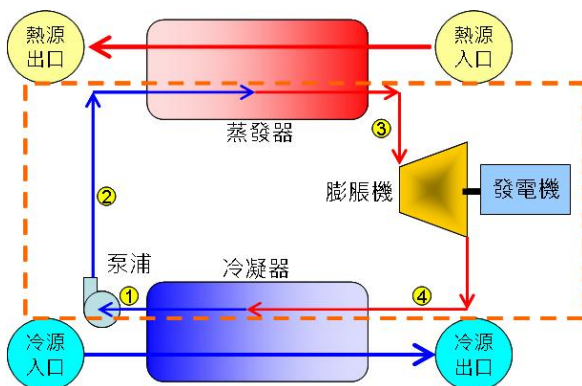


圖 1. ORC 動力循環系統圖

1.2 化工製程廢熱回收 ORC 系統設計

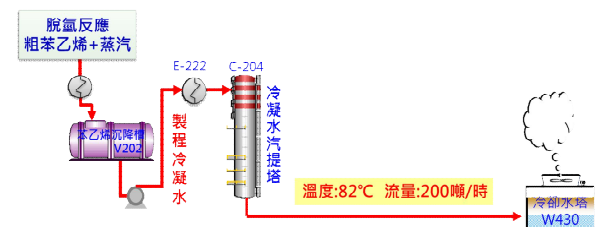
進行 200kW 低溫廢熱發電 ORC 發電機組設計、開發和性能測試，其工作項目有：

(1).化工製程廢熱發電 ORC 發電機組設計、開發，可分為：

- 機組熱力性能分析、優化和各關鍵元件熱力規格制定。
- 工作流體迴路系統設計、管線佈置和建造。機組配置(arrangement)和構型(layout)設計。
- 工作流體迴路系統傳感器篩選和控制元件裝設。
- ORC 發電機組設計、開發和建置。ORC 發電機組控制系統、人機介面和數據擷取系統設計、開發。

(2).ORC 發電系統性能測試和設計參數調適：

- 冷/熱源供應系統功能測試和調整。
- 控制系統功能測試和控制參數調整。
- 人機介面和數據擷取系統功能測試。
- 機組傳感器(溫度、壓力、流量、轉速、電壓、電流等)功能測試和校正。
- 機組試運轉和系統介面(發電機組、冷水供應系統、熱水供應系統、控制器、數據擷取系統等介面)調適。
- 機組各關鍵元件(工作流體泵浦、蒸發器、螺桿膨脹機、冷凝器等)性能特性和參數調適。



1. SM3脫氫反應後的粗苯乙烯及蒸汽冷凝至V202粗苯乙烯沉降槽進行油/水分離。
- 2.其中含有碳氫化合物的製程冷凝水泵至C204汽提塔利用蒸汽汽提後，再將乾淨的冷凝水(碳氫化合物<1ppm)直接排入冷卻水塔回收。
- 3.回收冷凝水溫度82°C、流量200噸/時，其熱能未回收會增加冷卻水塔負荷。

圖 2. 苯乙烯製程冷凝水改善前

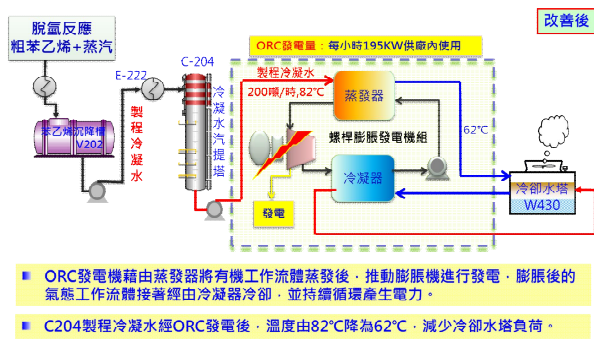


圖 3. 苯乙烯製程冷凝水改善後

1.3 ORC 機組開發

台化公司 SM3 廠區內可提供溫度 82°C、流量為 200TPH 之製程蒸汽冷凝水作為熱源。本 200 瓩 ORC 發電機組的蒸發器與過熱器係以 82.0°C 的熱水提供 ORC 工作流體蒸發、汽化的熱能；因此選用殼管式熱交換器，將廠區內的蒸汽冷凝水熱能傳遞給 ORC 工作流體汽化熱能。冷源則利用廠區的 W430 廠區冷卻水塔，供給 ORC 發電機組的冷卻水，透過 ORC 冷凝器帶走工作流體的排放熱能。升溫後的冷卻水再通過冷卻水塔冷卻後，循環使用，冷卻水的溫度範圍設定於 25~35°C。

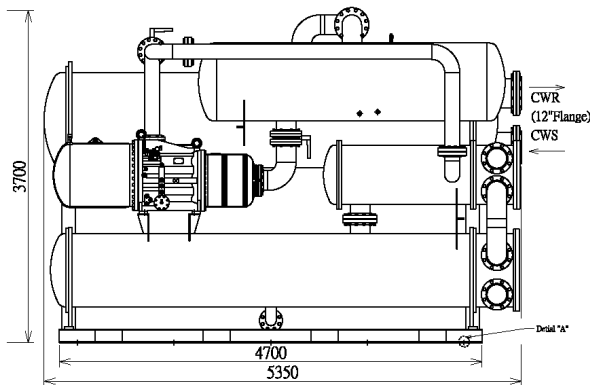


圖 4. 200kWe ORC 外觀尺寸圖

本 200 瓩 ORC 發電機組的空間配置和外觀尺寸圖，機組佔地面積為 5.35m x 2.5m，主要關鍵元件有工作流體升壓泵、殼管式蒸發器、殼管式過熱器、注油式雙螺桿膨脹機(包

括：螺桿膨脹機和感應式發電機)、油汽分離器、殼管式冷凝器等。因應本 200 瓩 ORC 機組性能特性和機組運轉條件，設計、開發 PLC 控制器(programmable logic controller)，做為機組動態特性控制、系統介面整合和測試數據擷取/記錄的樞紐。設計點時，本 ORC 發電機組的熱力性能分析，說明如下：

熱水供應系統：

- 進入蒸發器溫度：82.0°C
- 熱水在 pinch point 溫度：67.23°C
- 離開過熱器溫度：63.2°C

冷水供應系統：

- 進入冷凝器溫度：32.0°C
- 冷水在 pinch point 溫度：35.9°C
- 離開冷凝器溫度：36.49°C

工作流體昇壓泵：

- 立式多級離心泵浦
- 工作流體質量流率：81.8 TPH
- 工作電壓：380Vac/3P3W
- 馬達額定功率：55kWe

蒸發器：

- 種類：殼管式熱交換器
- 最高使用壓力：
- 殼側[工作流體側]：24kg/cm²
- 管側[水側]：10kg/cm²
- 最高使用溫度：
- 殼側[工作流體側]：100°C
- 管側[水側]：100°C

內容積：

- 殼側[工作流體側]：1.773 m³
- 管側[水側]：共 1.206 m³

冷凝器：

- 種類：殼管式熱交換器
- 最高使用壓力：
- 殼側[工作流體側]：24kg/cm²
- 管側[水側]：10kg/cm²
- 最高使用溫度：

- 殼側[工作流體側]：100°C
- 管側[水側]：100°C

內容積：

- 殼側[工作流體側]：2.34 m³
- 管側[水側]：共 1.47 m³

1.4 ORC 設計點熱力性能分析

參照上述各關鍵元件熱力性能，在設計點時，本 ORC 發電機組迴路系統內各站位、各關鍵元件的熱力性能規格(包括：溫度、壓力、流量)。及 ORC 發電機組間的性能分析和規格制定如下表列。圖 5 以 T-s 圖方式說明熱力循環關係，並顯示 R245fa、熱水、冷水流量，R245fa 於蒸發器取熱、冷凝器排熱功率。

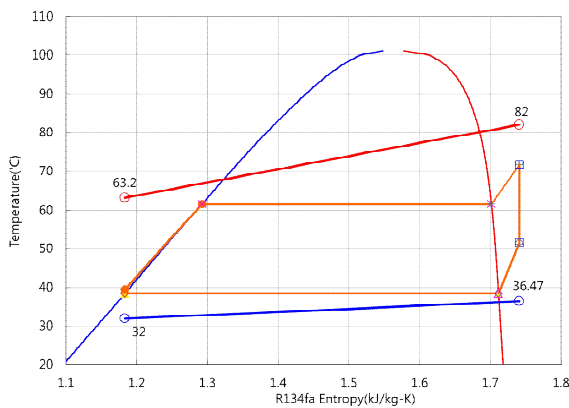


圖5. ORC發電機組熱力性能T-s圖

表1. ORC設計點熱力性能

站位點	Temp (°C)	P (kPa-Abs)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
[膨脹機入口] 過熱器出口	77.55	1826.57	446.14	1.75
膨脹機等熵過程	50.75	970.24	432.30	1.75
冷凝器入口 [膨脹機出口]	54.47	970.24	436.25	1.77
工作流體泵浦入口 [冷凝器出口]	37.27	970.24	252.35	1.18
蒸發器入口 [工作流體泵浦出口]	38.27	1826.57	253.83	1.18

2.1 機組運轉與性能測試

本 ORC 發電機組的熱力性能可從 ORC 工作流體迴路內的 R134a 溫度、壓力，冷水側溫度、熱水溫度和流量、膨脹機出口溫度、膨脹機轉子轉速、電力輸出等物理參數量間的相

互關係予以確認。為獲得這些物理參數量，本 ORC 機組規劃和安裝各種相關的傳感器、傳感元件、量測儀器、儀表，並且依據這些物理參數的特點，建構數據擷取和處理系統。本 ORC 發電機組於 103 年 9 月期間完成機組建造、管路洩漏改善、潤滑系統改裝、傳感器校正、控制器調校和 ORC 發電機組與冷熱源介面調適。自 103 年 11 月開始執行熱力性能測試。根據台化公司提供之 C-204 冷凝水器提塔流量資料為 189TPH，作為 ORCG 系統熱源流量條件，流質為一般軟水。



圖5. ORC發電機組溫度與發電量趨勢圖

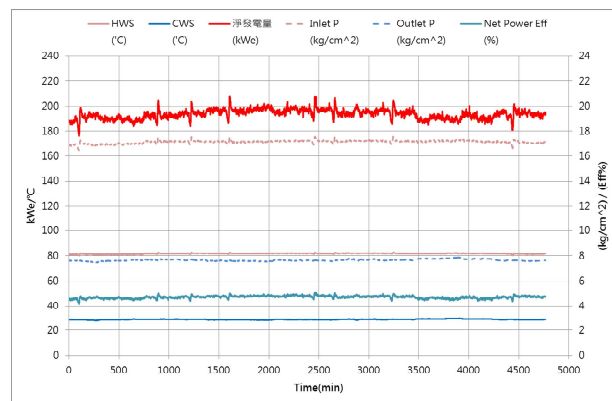


圖6. ORC發電機組溫度與壓力趨勢圖

根據本 ORC 發電機組於台灣化學纖維公司化工二部苯乙烯三廠現場長時運轉資料，進行 ORC 機組性能分析，可獲得以下結果：

- 製程廢熱水平均供熱溫度：81.53 °C
- 製程廢熱水平均供應流量：189 TPH

- 蒸發器水側出口溫度：62.77℃
- 冷源平均溫度：29.14 ℃
- 膨脹機入口平均壓力：17.10 kg/cm²
- 膨脹機出口平均壓力：7.66 kg/cm²
- ORC 系統平均淨發電量：193.75 kW
- ORC 平均電壓：392.47 Vac
- ORC 平均電流：347.58 A
- ORC 平均功率因數(PF)：0.96
- 發電容量(CF)因素：0.99

依以上ORC長時間運轉資料進行ORC淨發電效率計算，其計算過程如下(1)：

$$\text{系統淨發電效率(\%)} = \frac{\text{淨發電量}(kWe)}{\text{ORCG取熱量}(kWh)} \quad (1)$$

$$\frac{193.75kWe}{(TT4806 - TT4807) \times 189TPH} = \frac{193.75kWe}{(81.53^{\circ}\text{C} - 62.77^{\circ}\text{C}) \times 189TPH}$$

$$= \frac{193.75kWe}{3545640 \text{ kCal}/\text{Hr}} = \frac{193.75kWe}{4120.9kWh} = 4.701\% \quad (2)$$

本 ORCG 機組於台化公司 SM3 廠，長時運轉熱力性能分析結果如下：

站位點	T(°C)	P (kPa-Abs)	Density (kg/m ³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
過熱器出口	78.68	1811.38	83.0800	447.8384	1.7599
膨脹機出口	51.96	851.35	37.3171	435.8811	1.7747
WF昇壓泵入口	32.53	851.35	1177.6248	245.3942	1.1553
WF昇壓泵出口	33.53	1811.38	1180.2187	246.8533	1.1572
蒸發器出口	63.19	1811.38	95.3725	292.7445	1.7006

四、結論

工業餘(廢)熱能源中，大型工廠所產生的餘(廢)熱具有相當的經濟規模與供應流量穩定的特性，供熱條件不隨氣候與時間產生變化，容量因數(CF)高，極適合作為餘熱發電使用；以台灣化學纖維股份有限公司SM3廠為例：脫氫反應後的粗苯乙烯及蒸汽冷凝至V202粗苯乙烯沉降槽進行油/水分離，其中含有碳氫化物的製程冷凝水泵至C204汽提塔利用蒸汽汽提後，再將乾淨的冷凝水(碳氫化合物<1ppm)直接排入冷卻水塔回收，回收冷凝水溫度82℃、流量200噸/時，其熱能未回收而增加冷卻水塔負荷。採用工研院開發之82℃低溫型ORCG餘熱發電機組，ORC發電

機藉由蒸發器將有機工作流體蒸發後，推動膨脹機進行發電，膨脹後的氣態工作流體接著經由冷凝器冷卻，並持續循環產生電力，C204製程冷凝水經ORC發電後，溫度由82℃降為62℃，減少冷卻水塔負荷，ORC機組長時間於現場運轉進行廢熱回收發電，其淨發電量平均可達每小時190kW以上，年效益為3,9712仟元，回收年限約3.9年，CO₂減排約1,713噸/年。

本低溫型200kWe ORC發電機組乃國人首次成功開發完成的工業餘熱現場運轉之ORC發電機組，百分之百掌控開發能量、百分之百國內自製。從系統設計、分析，到機組建造、整合、性能測試，建立國內完整研發能量和實務經驗，豎立我國工業餘熱發電回收應用重要里程碑。

五、致謝

本文承蒙經濟部能源局計畫編號：102-E0206之經費補助得以順利完成，特此感謝。

六、參考文獻

- [1] Mago, P. J., Chamraa L. M., Srinivasana K., and SomayajiaAn C., "An Examination of Regenerative Organic Rankine Cycles Using Dry Fluids", Applied Thermal Engineering (28), pp. 998-1007, 2008.
- [2] Wei, D., Lua, X., Lua, Z., and Gua, J., "Performance Analysis and Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for Waste Heat Recovery", Energy Conversion and Management (48) 4, pp. 1113-1119, 2007.
- [3] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J., "Working Fluids for Low-Temperature Organic Rankine Cycles", Energy 32, pp. 1210-1221, 2007.

Development of a 200 kWs ORC Powered for chemicals plant.

**Yuh-Ren Lee¹, Li-Wei Liu¹, Chia-Ming
Chang¹, Jui-Ching Hsieh¹**

¹Green Energy Research Laboratories,
Industrial Technology Research Institute,
Hsinchu, Taiwan

*Corresponding Author, *Email*:

lee0089@itri.org.tw

Abstract

According to the conditions of heat source and heat sink, an organic Rankine cycle can be used to convert low temperature thermal energy (such as industrial waste heat, geothermal, biomass, solar thermal energy, etc.) into power. This research focuses on the development of an ORC with 200kilo-watts power rating which is to be used to convert the heat into electricity for Formosa Chemicals & Fiber Corporation Company. R134a is selected as the working fluid, and the main components of the ORC consists of a working fluid pump, a shell & tube type evaporator, a shell & tube type superheater, a screw expander, an oil-vapor separator, and a shell-and-tube condenser. This is the first with low temperature(82 °C) and high capacity (200kW) ORC been successfully developed in Taiwan and all the components are manufactured in Taiwan.

The test results show that the power output is 227.18 kilo-watts and net power thermal efficiency of 4.701% for the heat source temperatures of 82°C/189TPH respectively.

Keywords: ORC, heat to power, screw expander