



國際 ORC 地熱發電機 供應市場的新趨勢

財團法人中興工程顧問社副主任 / 俞旗文

財團法人中興工程顧問社組長 / 譚志豪

財團法人中興工程顧問社正研究員 / 雷世璋

財團法人中興工程顧問社助理研究員 / 楊智豪

關鍵字：有機朗肯循環、ORC、地熱發電、廢熱回收、生質能

摘要

本文分享介紹國外產業的統計分析資訊，探討國際ORC地熱發電機供應市場的新趨勢，希望能給國內發展地熱的投資團隊，提供足夠充份的資訊，據以正確於地熱發電機的選擇上，有所依循。本文的統計分析係引用國外文獻的資料，透過其中蒐集統計了約700個ORC系統發電計畫，從而建立了全球第一個可靠的ORC系統歷年來應用於地熱發電市場演化的相關資料庫。此資料庫統計分析對應的地熱系統總發電量達到27億瓦（2.7 GW）。本文中，在介紹ORC技術的工作原理、歷史演變，與主要的應用領域後，也一併討論了目前主要ORC系統技術的市況發展現況與未來趨勢，其中也包括其對應裝置容量、歷史資訊，與大規模經濟展望的探討。

最終，對於近年來地熱發電所依賴的ORC系統技術的市場走向的成長潛能與未來展望，進行了整體性的評估。附帶地，本文特別也針對工業廢熱的回收應用方面的潛能，進行了基本性的產業評估。

一、前言

有機朗肯循環（Organic Rankin Cycle, 簡稱ORC）係將熱轉換為電能的可靠技術。時下已廣泛應用於可再生能源（生質能、地熱、太陽能），與工業能源的效率提昇。ORC系統最初由極小尺度（幾個kW、瓦，或千瓦）的共生發電，逐漸發展大到幾個百萬瓦（MW或兆瓦）等級的地熱電廠。自1970年代開始，它緩慢地從一個小型的發電試驗雛型概念，發展到目前強大的商業市占



規模，主要因素在於能源成本大幅增加的經濟誘因下所使然。雖然如此，基於它的應用市場、製造方法、所在地域等不同因素，形成其技術演化差異極為廣泛的分佈範圍，因此，一般很難將此技術的發展脈絡，精準地掌握清楚。

所幸透過Tartière and Astolfi (2017) 兩位加拿大與義大利的學者，經過有系統的資料蒐集更新與分析，協助統計了國際上約700個ORC系統發電計畫，分屬總共27家供應商提供的資料，從而建立了全球第一個可靠的ORC系統資料庫，包括了1980年代以來應用於地熱發電市場演化的相關資料庫。目前資料內容大致更新至2016年底，統計資料則於2017年在義大利米蘭舉行的第四屆ORC電力

系統國際研討會中公開發表[1]。各種相關資料也可以在Analysis of the Organic Rankine Cycle market的網站查詢[2]。此資料庫涵蓋的系統所對應的總發電量達到27億瓦(2.7 GW)，對於現階段國內再生能源發電應用領域，尤其是地熱發電方面最適發電機組的選擇，提供了極為實用的參考資訊。

(一) 有機朗肯循環技術與應用

有機朗肯循環 (Organic Rankin Cycle，簡稱ORC) 與大多數火力發電廠用於發電的傳統蒸汽原理運作的朗肯循環 (Rankin Cycle) 具有相同的原理，最大的差異在於前者使用有機流體 (organic fluid) 代替水，作為主要工作流體。圖1所示為為ORC技術

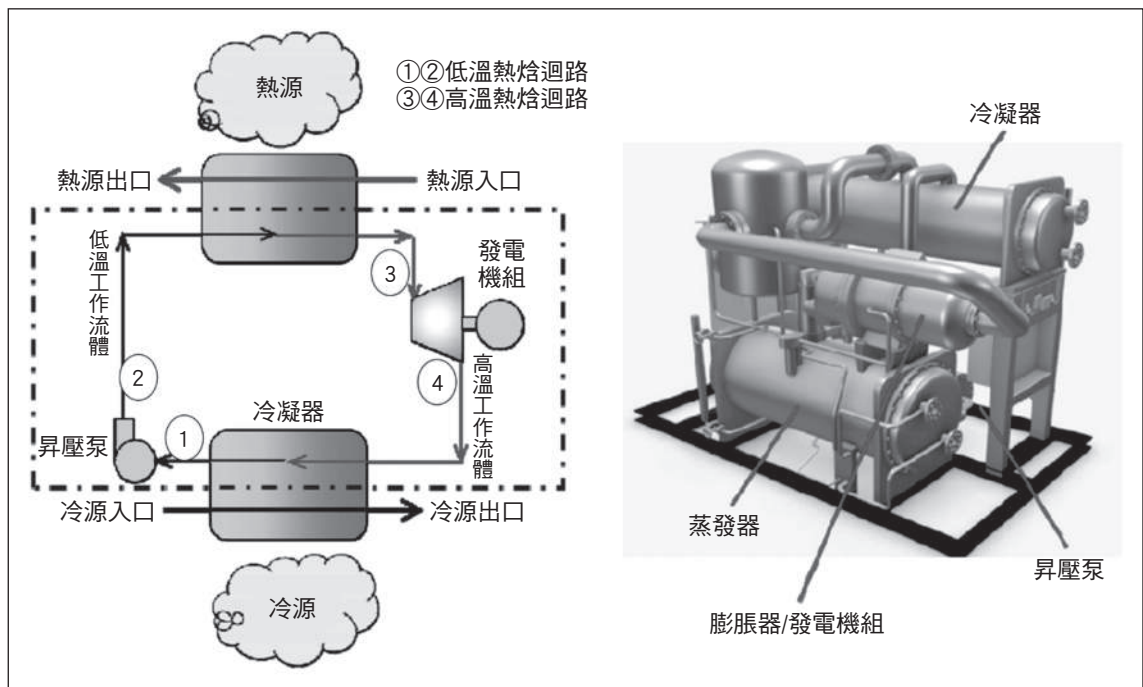


圖 1 典型有機朗肯循環的概念 [3]：(左) 技術原理；(右) 發電機應用

原理與簡易發電機應用的示意圖(郭啟榮, 2013)[3], 系統可利用低溫沸點工作流體(俗稱冷媒)將熱源、冷源的熱能溫差轉換為電力輸出。採用ORC系統的發電方式並可根據可用的熱源和工廠規模, 選擇最佳化的工作流體, 提昇整體效益。此系統可能達到的多重優勢可包括:(1)更高的渦輪機械效率;(2)冷凝器真空度的限縮;(3)與蒸汽朗肯循環或氣體循環相比, 具備更高性能, 特別是對於80至350°C相對較低溫度下的熱源和低於20 MW的功率輸出[4, 5]。這項優勢開闢了利用原本會浪費的低等級熱量的可能性。它在新能源或現有能源密集型應用領域的能源效率提升方面, 可以發揮重要作用[6]。目前比較常用的工作流體包括了: 碳氫化合物(hydrocarbons)、氫氟碳化合物(hydrofluorocarbons)、矽氧烷(siloxanes), 以及這些成分的混合物(mixtures)等[7]。ORC系統熱效率受工作流體的蒸發溫度及冷凝溫度間的溫差影響, 溫差愈大、熱效率愈高。這些獨特的優勢使得ORC系統成為發展利用各種再生能源的熱源, 將其轉換為電能時最可靠的選擇, 這些熱源例如地熱, 生質燃燒, 工業餘熱, 和太陽能等。

有關ORC技術的原理, 最早係由T. Howard於1826年所建立[8], 他首先在功率循環中嘗試使用乙醚(Ether)作為工作流體。基於這個想法, Ofeldt和Esher Wyss AG等公司首先研製了幾種石腦油引擎(Naphtha engines)來作為啟動循環的動力來源。當時這些引擎仍無法建立真正具有利基的市場, 主要是因為它們的測試過程發生了各種事故, 因此大大地阻礙了當時ORC技術的發

展。現代商業化的ORC工廠的第一個成功案例係由D'Amelio於1936年建造, 該工廠基於簡單的一氯乙烷(Monochloroethane)朗肯循環, 該循環由太陽能加熱並由單次脈衝渦輪機(single stage impulse turbine)提供動力。在接下來的幾年中, 相同的想法被應用於分別具有2.6 kW和11 kW輸出功率的幾個低溫地熱發電廠。到了1960年代, 沿襲D'Amelio的思考, 以色列國家物理實驗室的研究員, 包括Tabor和Bronicki兩人開始對具有潛能的各式流體進行廣泛的篩選, 研究過程突顯了使用高複雜度氟利昂(freons)的優點, 並定義了當今仍廣泛使用的再生飽和循環配置(Regenerative saturated cycle configuration)。在當時尚有米蘭理工大學的Angelino, Macchi, 和Gaia教授也在進行類似的科學研究。

透過上述這些經驗的累積, 引導出了多個原型機設計的成果, 並分別促成了ORMAT(1964由Bronicki創立)和Turboden(1970由Gaia創立)這兩家公司的成立。這兩家公司至今已儼然成為了ORC市場上最大的參與者與技術供應者。這當中也有許多研究機構也曾為ORC技術的發展有所貢獻, 例如芬蘭的Laapeernanta技術大學開發了小型密封式渦輪膨脹機, 而倫敦城市大學則進行了容積膨脹機的研究, 且定義了創新性的循環配置。近年來, 許多研究機構所衍生的許多新創公司也陸續開發並實施了各自的具商業化能力的自主研發技術元件, 例如Exergy公司的徑向流出渦輪機; Enertime和Enogia公司的中型至小型軸流渦輪機; TriOgen公司的直接蒸發單元; Zuccato公司的徑向流入渦輪機; 還有Electratherm, Opcon, E-Rational等公司用於小



型應用的螺桿膨脹機等等。通過工業界和學術間強有力的合作下，各種研發成果項目，包括工作流體，膨脹器或循環配置，可以產生多種組合以提昇整合發電效率，目前已在市場上創建了一個充滿活力的產業。

(二) 資料蒐集方法

事實上，直到今日ORC發電技術並不是很廣泛為人所知，以至於基於該技術的發電廠數量，經常被嚴重低估。這相對也造成了許多政府在政策上尋找無碳發電的解決方案時，由於資訊的不充分，而未能將ORC發電技術列入考慮，這難免也間接阻礙了其市場發展的有利機會。本研究的目的旨在以工業或產業的層次，進行廣泛市場現況的資料蒐集來研析盤點ORC國際市場現況，希望能有助於改善這個現象。

市場現況的資料蒐集過程，有些僅止於實驗室規模或未連接到電網的小型ORC工

廠，並未納入蒐集資料庫內。對於非商業性但具有數百千瓦/幾MW的顯著功率輸出的示範性質工廠，則選擇納入於資料庫中。資料庫整體而言，所有的製造商數據，涵蓋包括了來自27個公司的提供的資料，已發表的文章，和商業財務報告。這些資料的整併，建立了1975年以來投入運行的所有ORC項目的準確數據庫。讀者可在文獻[9]檢索所有參考資料的所在位置的地圖。

有一些製造商則基於商業機密考量，並未能公開其參考文獻，並拒絕參加相關的研究調查。因此，此數據庫並非是100%詳盡的。截至2017年2月，研究認為拒絕參加相關的研究調查所佔的總裝機容量不超過50 MW，只佔了全部2,701 MW中的1.9%。若以現有佔大部分市場的蒸汽閃發式（Flash type）和雙循環式（Binary type）兩類的大型地熱機組項目中，研究中則僅考慮了雙循環式發電的部分。表1按字母順序列出了數據庫中包含的27個ORC製造商列表，其中包括已

表 1 2016 年底之前 ORC 業界的蒐集資料 [1] <ORC 製造商 / 已安裝的數量 / 總安裝容量 >

製造商	ORC 機組數量	裝置容量 (MW)	製造商	ORC 機組數量	裝置容量 (MW)	製造商	ORC 機組數量	裝置容量 (MW)
ABB	2	3.8	Enogia	11	0.26	Orcan	16	0.3
Adoratec	23	16.4	Enreco	1	0.15	ORMAT	1102	1701
BEP-E-rational	20	3.6	Exergy	34	300	Rank	5	0.07
Calnetrix	50	6.3	General Elec.	6	101	TAS	17	143
DurrCypfan	6	1.2	GMK	18	5.3	TMEIC	1	1
Electratherm	55	3.14	Energy Tech	2	0.7	Triogen	37	5.2
Enerbasque	3	0.13	Johnson Control	1	1.8	Turboden	267	363
Enertime	2	1.6	Kaishan	40	27.2	UTC Power	10	2.8
Enex	1	9.3	Opcon	3	2.0	Zuccato	21	1.7



裝機的機組單元數，和截至2016年12月31日的總裝置容量。

二、ORC 系統的應用現狀和主要製造商

由表1統計可知：截至2016年12月31日，使用ORC發電技術的總裝機容量約為2,701MW，其下則實際共包括1,754個ORC發電機裝機數量（分屬約705個計畫項目）。圖2所示為總裝置容量（Installed capacity）和裝機數量（Installed plant）的統計結果。圖2（左）按應用的能源領域（生質能、地熱能、廢熱回收、太陽能）分類；圖2（右）則為按主要發電機單元供應商分類。明顯地，地熱能發電是主要的能源應用領域，佔了全球ORC裝機容量的74.8%（全部為2,701 MW）；但相對地，裝機容量對應的計畫項目，則數量相對較少。太陽能的ORC應用數量甚低，可以忽略不計，主要是因為太陽能領域的高投資成本，這使得ORC搭配集中式收集器的成本，遠比光伏板搭配蓄電池系統的成本昂貴。

總結來說，根據ORC裝機容量和裝機數量而言，不同製造商的市場實際佔比整個分析的結果顯示：總部設於以色列的美國上市公司ORMAT實居世界領先地位，佔總裝機容量的62.9%（參見圖2右側），其次是義大利的Turboden公司（13.4%）和Exergy公司（11.1%）。美國的渦輪空氣系統公司（TAS）和通用電氣（General Electric or GE）雖已有少數的大型工廠安裝實績，但目前尚不清楚它們的ORC業務是否仍在活躍。另外可以確定的是，其他的23家公司，它們的合併市場佔比僅為3.2%，且重點都注重是中小型的能源應用領域。下面就再生能源領域中地熱能、廢熱回收、生質能三個市場中ORC系統的應用現狀，分別加以探討。

（一）地熱能（Geothermal energy）

地熱發電模式依熱源條件的不同大致可分為乾蒸氣系統（Dry steam）、閃發系統（Single/Duble Flash），以及雙循環系統（Binary cycle）三大類。一般使用ORC

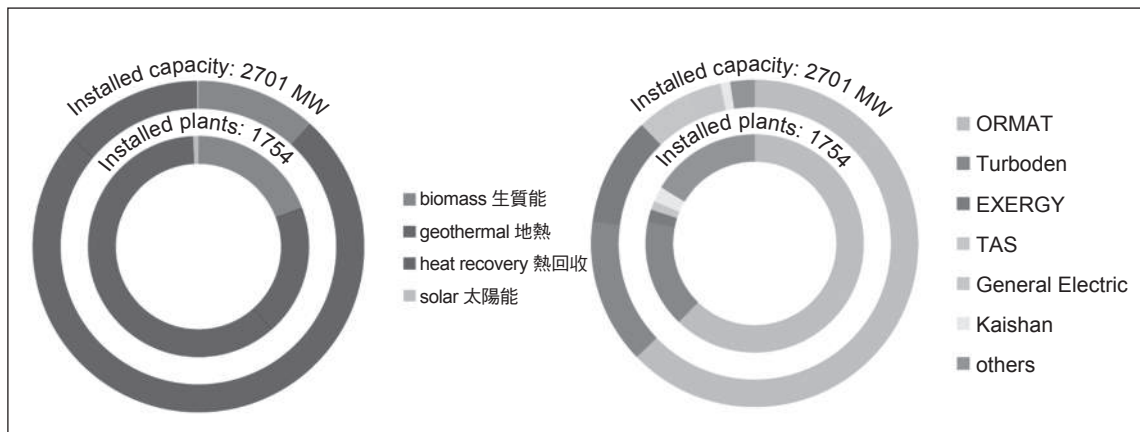


圖 2 國際 ORC 發電技術的市場統計 [1]：（左）總裝機容量；（右）製造商

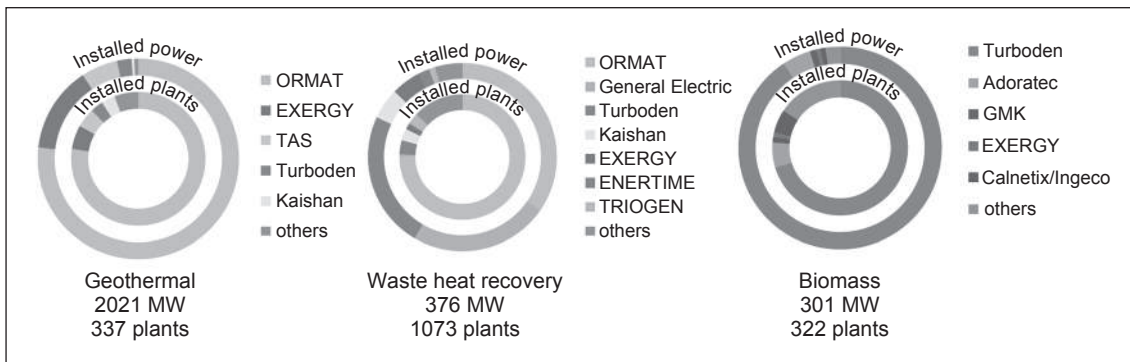


圖 3 不同能源應用領域各製造商的市場佔比統計分析 [1]

發電機的地熱系統，通稱為雙循環系統，其典型熱源溫度介於70~150°C，儲層熱焓（Reservoir enthalpy, kJ/kg）約在300~1100間，熱效率（Thermal efficiency）可達12%左右。由資料庫分析可知，全部約2,021 MW的ORC地熱能裝置容量，僅分散裝置於337個發電計畫，全部裝機機組數量達1,754個，如圖3所示。這些應用於能源領域的ORC發電裝置，在在都需要大量投資和至少MW級規模的電廠。現有製造商（供應商）市況調查的結果顯示，只有少數資本密集型、技術領先型的公司，包括ORMAT, Exergy, TAS, 和Turboden等（如圖3左側所示），才有機會寡佔瓜分主要的供應市場。統計資料顯示：以色列的ORMAT公司（紐約證券交易所上市），無疑是目前ORC發電技術領域的領導者，擁有超過75%的裝機容量和計畫項目，Exergy公司和TAS公司則緊隨其後，分別佔據了約13%和6%的市場，而Turboden公司最近也積極進入地熱市場，約佔裝機容量的2%。

（二）廢熱回收（Waste heat recovery）

廢熱回收（Waste heat recovery）是ORC技術應用的一個新興領域，對於未來無論各種規模的發電裝置，都具有一定的發展潛力。目前幾乎所有ORC發電技術領域的主要製造商都活躍在該市場上，服務對象遍及各中大型工廠，從燃氣輪機，內燃機或工業過程中回收熱量（參見圖3中央部分）。這當中也有其他製造商，只專注於發展小型廢熱回收應用，產品機組的定位規模以10 kW到150 kW為主。應用於廢（餘）熱回收的運營工廠，佔據了376 MW的裝置容量，數量大約佔整個市場的13.9%。但值得注意的是，其中約有800台是ORMAT安裝的非常小的工廠（<4 kW），用於閘門操作和偏遠地區管道沿線的陰極保護。

本階段的統計顯示，廢熱回收在全球熱裝置容量雖僅為376 MW，但是在建中（約16個項目）也有近39 MW的新增容量。雖然熱回收（Heat recovery）市場仍處於早期發展階段，但就技術發展程度，則早已跨過去曾經長期處於原型機發展或示範階段。圖4所示為每個熱回收應用的裝機容量的市場

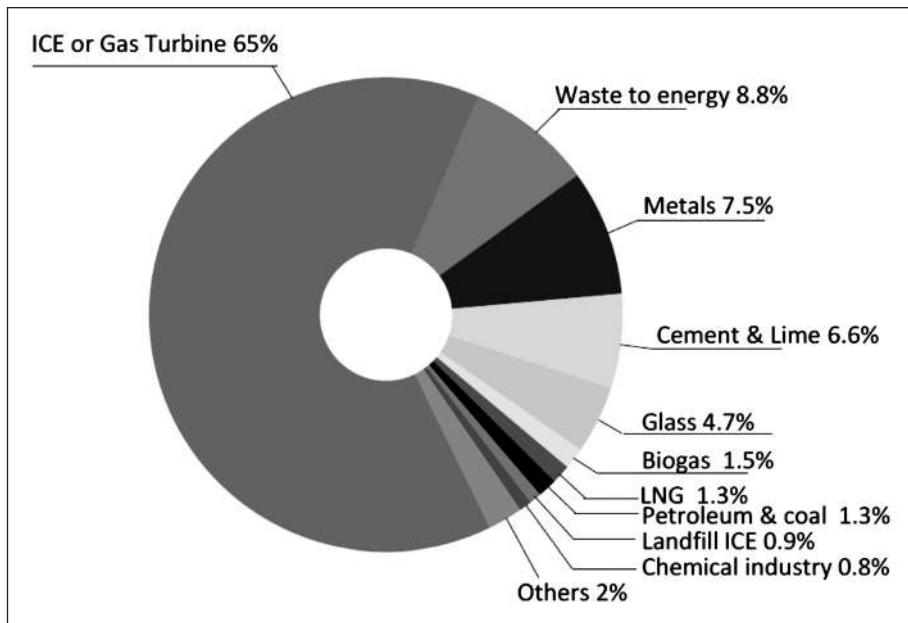


圖 4 每個熱回收應用的裝機容量的市場佔比 [1]

佔比。廢熱回收主要應用是從柴油或燃氣發動機和渦輪機回收熱量，約佔了總裝機容量的65%。ORMAT在這一領域非常地活躍，在美國和加拿大的天然氣管道上至少安裝了24座3-8 MW的電廠。Turboden緊隨其後，也建置了至少9座平均規模約為1 MW的發電廠。使用內燃機或渦輪機的廢熱回收，比一般工業餘熱回收更容易，而且長期以來一直是技術門檻較低的項目，正因為如此，隨著發動機技術成長使得其效率越來越高，在許多製定能源轉型路線圖的國家中，這類的應用已漸不被認為是可歸類於可再生的能源領域[10]。

廢棄物資源轉化為能源 (Waste to Energy) 的應用領域上，在過去幾年中也經歷了快速的增長，屬於第二個較大型的廢熱回收應

用，市場分布主要在法國和土耳其。自2013年以來已有19個新的計畫項目。初級金屬或人造金屬類分別所佔比例相似，約有28個計畫項目，市場主要由中國和義大利所主導。水泥和石灰工業(9個項目)和玻璃類(8個項目)行業，儘管具有明顯的熱回收潛力，但僅佔熱回收市場的一小部分，大約擁有81台機組，和總計8.9 MW的裝置容量；垃圾填埋場和沼氣發動機是許多ORC技術研發的重點領域，製造商主要提供小型ORC單元(最高200 kW)的機組，透過於不同國家的所提供的優惠政策下，得以獲利。

評估歐洲[11]，北美[12]或中國[13]的工業熱回收潛力，一般研究認為，其中存在了在這些地域許多阻礙熱回收市場的發展潛在障礙。例如法規監管的問題 (Regulatory



issues) 和缺乏足夠環境保護的認識等[14]。此外，由於工業資本預算有限，並且對新資本投資的競爭非常激烈，優先考慮的是與公司核心業務更接近的替代方案。若考慮進行長期投資，還得增加承擔此類項目的財務風險，並限制了獲得低成本融資的機會。最後，各發電廠普遍存在相對高比例的發電待機率 (utility standby rates)，通常也會打亂潛在成本節省空間。

(三) 生質能 (Biomass energy)

生質能 (Biomass) 應用的裝置量大約在301MW，相當於能源應用領域11%的佔比，如圖3右側部分，僅略低於廢熱回收佔比。其中義大利的Turboden公司是該市場上的主要參與者，擁有228多家工廠（其中大多數是CHP汽電共生裝置）以及許多其他在建工廠。

三、隨著時間的變化和新趨勢

(一) 市場發展趨勢

圖5所示為近30年來各能源應用領域（地熱能，生質能，熱回收，太陽能）的安裝容量隨時間的變化，並以WTI（西德州中級）原油價格代表作為全球能源價格的參考，評比了每個能源應用項目的年安裝容量與能源價格的演變關係。圖中年份軸的最後一個標籤是指在建項目 (I.C.)。即使各個國家積極推動再生能源的各種激勵措施和當地市場條件會影響能源市場發展趨勢，我們還是可以觀察到全球能源價格與新裝機容量之間存在很強的相關性。一般而言，大型能源應用項目的開發和建設，通常需要12個月以上的時間，因此年度裝機容量的變化很大程度上無可避免地會與過去幾年的經濟分析產生關聯。圖6所示為各國際主要製造商年度裝機容

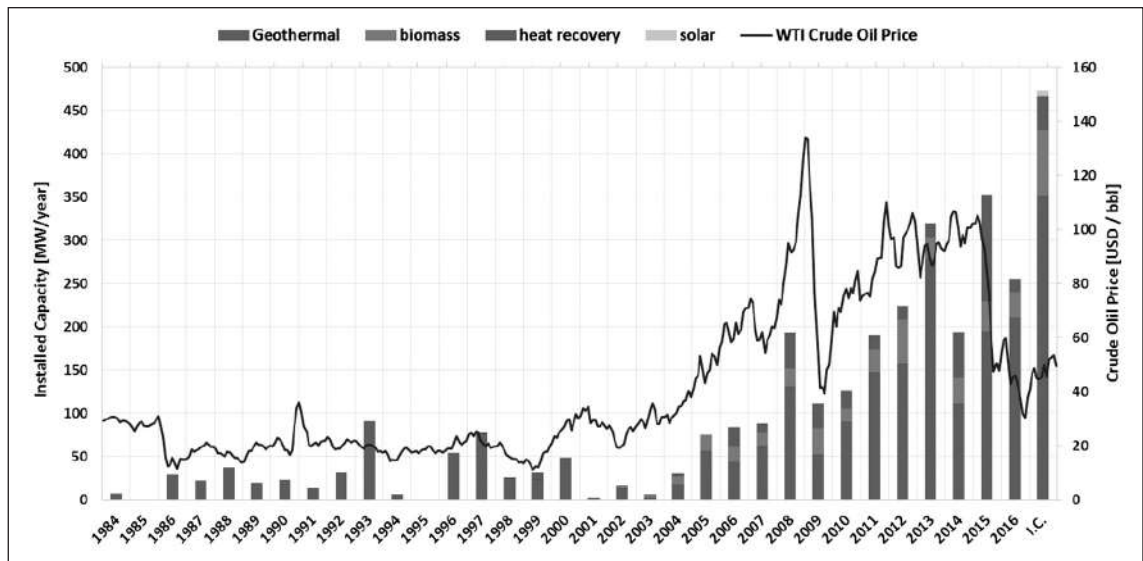


圖 5 各能源應用領域的安裝容量隨時間的變化 [1]

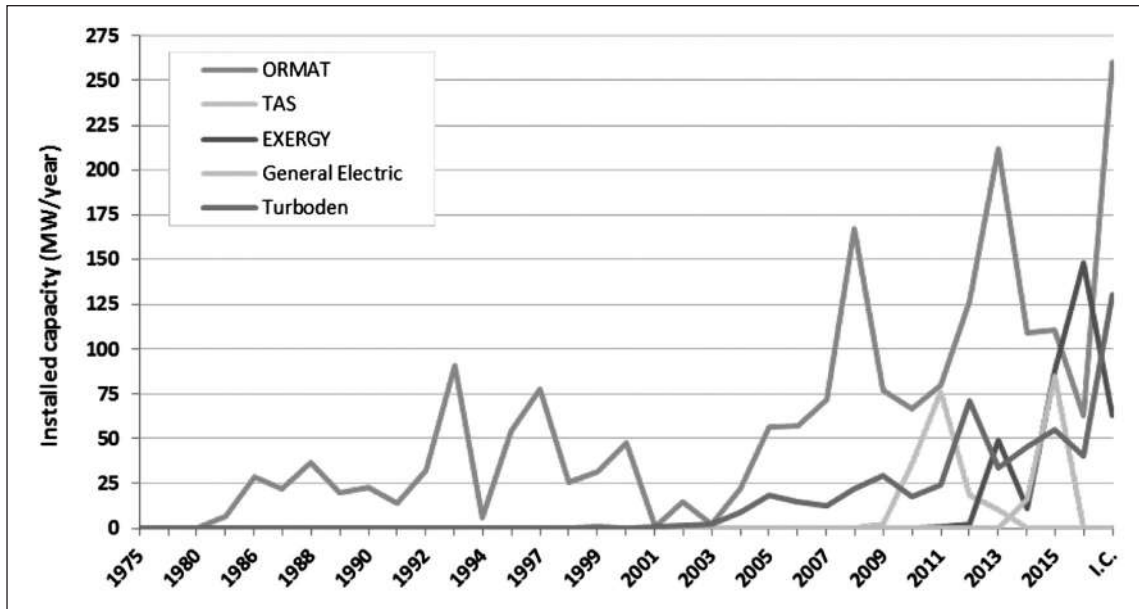


圖 6 各主要製造商裝機容量隨時間的變化 [1]

量（Installed capacity, MW）隨時間的變化。

由圖5的趨勢可看出，從1980年到2003年間，可再生能源應用領域僅侷限於地熱的應用，這之間的ORC市場發展相當地遲緩。但隨後自2000年代初以來至今（2016年），ORC市場安裝容量在能源應用領域則經歷了顯著的增長。從年平均容量在75到200 MW之間，到2015年已翻倍成長達到352 MW，這個過程地熱發電領域的強勢發展無疑扮演了最重要的角色。尤其到了2009年以後，隨著Exergy和TAS陸續進入市場競爭後，地熱發電市場更是不斷地強勁增長。其間於2003年後，生質能方面的應用也呈現快速增長，這個成長現象與Turboden公司的市場競爭有緊密的相關性，此階段Turboden每年平均安裝15至25個ORC單元，並有43個新單位也在

規劃興建中。不過，儘管ORC市場發展潛力巨大，但於廢熱回收市場方面顯示在2008年至2013年之間卻有所下降，一直到2015年以後才出現新的增長。若與圖4的分析圖相比，就每個特定應用計畫而言，其裝機容量的市佔比，並未顯著隨時間變化，其中ICE和燃氣輪機的佔比，在2013年到2015年之間為68%。在同一時期，水泥行業的應用則微不足道，而金屬（11.3%）和廢棄物轉化為能源（9.3%）的佔比則有所增加。

到了2016年，所有能源應用領域新的ORC裝機容量為255 MW，與2015年相比減少了28%。這主要是由於熱回收應用的減少，統計發現：2016年的新裝機容量僅為15 MW，2014年為53 MW，而歷史最高記錄為2015年的122 MW。原因可能是電力和天然氣



價格大幅下跌，以及與其他可再生能源（例如太陽能 and 風能）的競爭。目前已經宣布或在建中的新裝機容量超過460 MW。這裡面包括印尼的大型Sarulla地熱項目（3組各110 MW的閃發式合併雙循環發電），該項目估計應在2019年可完成，代表新的雙循環發電可增加約150 MW的裝置容量[15]。

（二）各個應用領域的裝機容量規模的市場變化

圖7顯示了1975年到2016年間，平均ORC發電廠裝機容量規模隨時間的變化，以及各裝機容量規模下相對於發電廠數量的分佈。隨著製造商在設計和生產更大的渦輪機的能力日趨增強，地熱發電廠所使用的ORC機組的尺寸亦逐漸增加。在1980年代以後，有些地熱項目通常會涉及同時採用多組併行ORC機組單元。例如，在1987年，ORMAT公司在美國東梅薩（East Mesa）鎮的Ormesa-II地熱

項目，在一個20 MW的發電廠中採用了兩個併聯組合，共20個模組化（modular）的能量轉換器[16]。另一方面，在2000年代初期，特別是在大型地熱應用中，安裝了單一模組功率超過15 MW的大型機組，位於克羅地亞的Velika Ciglena地熱項目就是一個典型的例子。該項目目前正在建設中，係由Turboden設計並裝機[17]。近年來，仍有一些公司（例如E-Rational）仍持續建造小型ORC裝置，普遍用於利用溫泉發電。

於2013年，紐西蘭的Ngatamariki地熱電廠首先突破100 MW的ORC發電容量規模，發電量可供8萬紐西蘭家戶的用電需求。在2017年以後，單一地熱電廠的ORC發電容量規模頻創新高。目前在印尼北蘇門答臘省的Sarulla地熱電廠已經來到了330 MW，發電量可供201萬印尼家戶的用電需求。電廠的全景照如圖8所示。

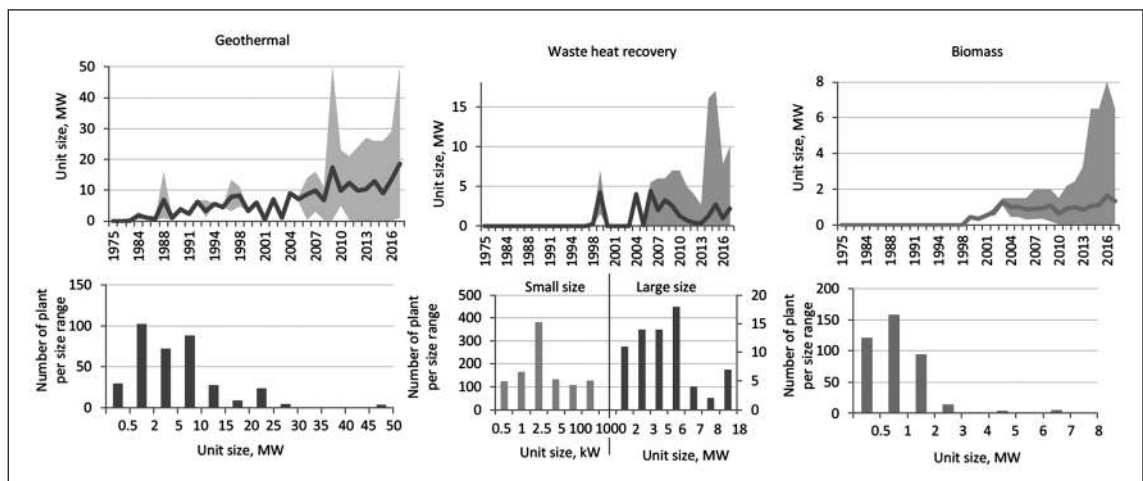


圖 7（上）平均 ORC 發電廠裝機容量規模隨時間的變化 [1]。（下）各裝機容量規模下相對於發電廠數量的分佈。填色區域表資料分布的上下界。



圖 8 印尼北蘇門答臘省 Sarulla 的 ORC 地熱電廠
(摘自 <http://www.thinkgeoenergy.com>)

至於ORC機組應用於熱回收市場，可概分為小型機組(<1 MW)和大型機組(最高18 MW)。在2000年至2010年之間，這個市場原先僅主要集中在大型壓縮機站的項目上，但是隨著ORC製造商(如TriOgen, Electratherm, Calnetix和Zuccato)陸續展開了許多小型工廠的建設，因此單位機組的平均規模隨後即顯著下降。

相對之下，生質能在可再生能源領域市場經歷了最穩定的發展。由於可以在不同的工廠中完全複製相同的設計，從而有利於Turboden可以將其現成的ORC技術與機組很快地進入商業化市場。此外，因為在中歐地區，推動有利於1 MW發電廠的經濟刺激措施，更使得該市場很大程度上受到正面影響。自2012年以來，大型機組(高達8 MW)也變得越來越普遍。

(三) 跨臨界技術 (Transcritical cycle)

跨臨界循環是工作流體在亞臨界及超臨

界狀態之間工作的熱力學循環。常見的製冷劑是二氧化碳CO₂。現代的跨臨界循環是在1988至1991年之間，由挪威科學家Gustav Lorentzen(1915年至1995年)及其團隊所提出。除了由Turboden於2012年為義大利的Enel建造的500 kW機組之外[18]，跨臨界循環(Transcritical cycles)僅由TAS在美國的三個地熱項目中進行了商業化運行，包括：Neal Hot Springs(23.4 MW, 2010)，San Emidio(8 MW, 2010)和Patua(76 MW, 2011)。因此，儘管業界對與熱源溫度梯度相匹配的超臨界加熱(Supercritical heating)，有很強的研究興趣，但跨臨界應用的商業化開發最近這幾年以來尚無明顯成長跡象，但是在當前二氧化碳過度排放造成嚴重氣候變遷全球暖化的國際趨勢下，若能有效進行二氧化碳再利用，其技術潛力與發展，值得期待。

(四) ORC 市場財務評估

將Turboden(2002年至2010年)[19]和ORMAT(2012年至2015年)[20]兩大地熱發電巨頭的財務收入與同期的實際裝機容量進行比較，得出的平均每單位千瓦的投資比率分別為美金1410/kW(ORMAT)和美金1580/kW(渦輪增壓)。據此推估2016年ORC市場的總價值在每年3.59億美元至4.02億美元之間。這僅包括設備和直接工程服務的銷售額，尚未包括地熱工程中的補充收入，例如電力或熱力發電，地熱資源探勘和大地工程等。相對地，小型ORC每千瓦(kW)的裝置成本則要高得多，但少於500 kW的裝置所佔裝機容量不超過總裝機容量的2%，本階段可以忽略不計。可以預期的是2016年以後的國際市場，基於再生能源的需求不斷，絕對會

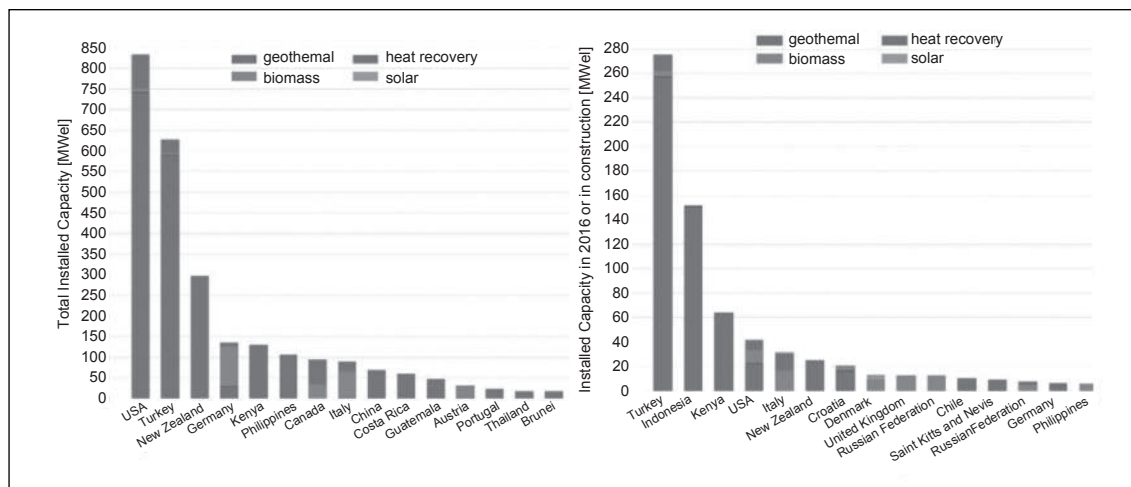


圖 9 國別分類的 ORC 總裝機容量 (2016 年底) [1] : (左) 2016 年底 (右) 在建中

有大幅成長的機會。

四、國別細分下的 ORC 市場佔比

若以國家/地區的條件細分來檢視現今 ORC 市場的佔比，美國裝機容量居所有再生能源發展國之最大國，其次是土耳其和紐西蘭。這三個國家主要是得益於在地豐富的地熱資源。德國，奧地利，義大利和加拿大是生質能應用中最重要的，這則是肇因於現有資源和優惠激勵措施的結合。圖9所示為以國家為單位的 ORC 總裝機容量，主要數據包含了 2016 年前累積已建成，或 2016 年在建中新的 ORC 項目。我們可以看到，大多數新的地熱開發都集中在土耳其，足足有 257 MW (12 個項目) 之多。排名第二與第三的分別為印尼和肯亞，這兩個國家目前都還只有少數大型地熱項目，未來持續的發展可以預期。值得注意的是：義大利 (20 個項目)，英國 (9 個項目) 和俄羅斯 (3 個項目) 等國家，於生質能方面的應用持續增長中。

五、結論

臺灣的地熱資源堪稱豐富。現階段我國政府設定 2025 年再生能源占總發電量 20% 為相關政策目標，其中地熱發電被列為短期發展目標之一，希望於 2025 年達成全臺開發出 200 MW 的地熱發電量。目前政府同時也突破法規開創了諸多投資誘因，包括：開發規模在 10 MWe 以內之投資案，可免除環境影響評估，若能成功發電併網，並可適用於躉購電價之優惠售電方案，吸引民間投資開發地熱發電。按最新版再生能源電能躉購費率及其計算公式，地熱發電每度電的收購價以新臺幣 5.1956 元計算。本文介紹目前最夯的地熱發電機 ORC 系統的國際市況發展與未來趨勢，希望藉此系統的技術發展軌跡與相關經驗，能夠給現階段臺灣仍處於投資極度匱乏的地熱市場的起步發展，提供有用的參考資訊。

參考文獻

1. Tartièrre Y and Astolfi M. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market, Energy Procedia,



- Volume 129, September 2017, Pages 2-9.
2. Analysis of the Organic Rankine Cycle market. (網站資料) 網頁：https://orc-world-map.org/analysis.html#current_situation.
 3. 郭啟榮，中低溫工業廢熱有機朗肯循環發電與其經濟效益臺灣能源期刊，第一卷，第一期，中華民國102年11月 (Journal of Taiwan Energy. Volume 1, No. 1, November 2013, pp. 71-84)。
 4. Colonna P, Casati E, Trapp C, et al. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. 2015; 137(10): 100801-100801-19. doi:10.1115/1.4029884.
 5. Macchi E., Chapter 1 - Theoretical basis of the Organic Rankine Cycle in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1.
 6. Rettig A., Lagler M., Lamare T., Li S., Mahadeva V., McCallion S., Chernushevich L. Application of Organic Rankine Cycles (ORC), World Engineers' Convention, Geneva, 2011.
 7. Astolfi, M., Martelli E., Pierobon L. Chapter 7 - Thermodynamic and technoeconomic optimization of Organic Rankine Cycle systems in Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications, 2016 ISBN: 978-0-08-100510-1.
 8. History of ORC. Knowledge Center for Organic Rankine Cycle. (網站資料) 網頁：<http://www.kcorc.org/en/science-technology/history/>.
 9. Tartiere T. ORC World Map. 2015. (網站資料) 網頁：<http://orc-world-map.org/>.
 10. Bronicki L. Short Review of the Long History of ORC Power Systems. ASME ORC 2013 Conference.
 11. Campana F., Bianchi M., Branchini L., De Pascale A., Peretto A., Baresi M., Fermi A., Rossetti N. Vercovo R. ORC Waste Heat Recovery in European Energy Intensive Industries: Energy and GHG savings. Energy Conversion and Management, Vol 76, pp 244-254. 2013.
 12. Elson A., Tidball R., Hampson A. Waste Heat to Power Market Assessment. Oak Ridge National Laboratory. March 2015.
 13. Hongyou L. Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry and Policy Options for Waste Heat to Power Generation. Berkeley National Laboratory, May 2015.
 14. Rackley J., Hampson A., Fucci M. Colorado Recycled Energy Market Overview, Final Report. Colorado Energy Office. August 2015.
 15. Wolf N., Gabbay A. Sarulla 330 MW Geothermal Project Key Success Factors in Development. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25, April 2015.
 16. Sonnelitter P., Krieger Z., Schochet D. The Ormesa Power plants at the East Mesa California Resource After 12 years of operation. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
 17. ThinkGeoEnergy. Turboden to install large 16 MW single turbine at Croatian project. (網站資料) 網頁：<http://www.thinkgeoenergy.com/turboden-to-install-large-16-mw-single-turbine-at-croatian-project/>.
 18. Rossi N. Testing of a new supercritical ORC technology for efficient power generation from geothermal low temperature resources. ASME ORC 2013 Conference, October 2013.
 19. Turboden. ORC plants for Industrial Heat Recovery. August 2011. (網站資料) 網頁：http://www.turboden.eu/en/public/downloads/11-COM.P-18-rev.4_HR_ENG.pdf.
 20. ORMAT. Financial reports, 2012-2015. (網站資料) 網頁：<http://investor.ormat.com/GenPage.aspx?IID=4087066&GKP=302737>.