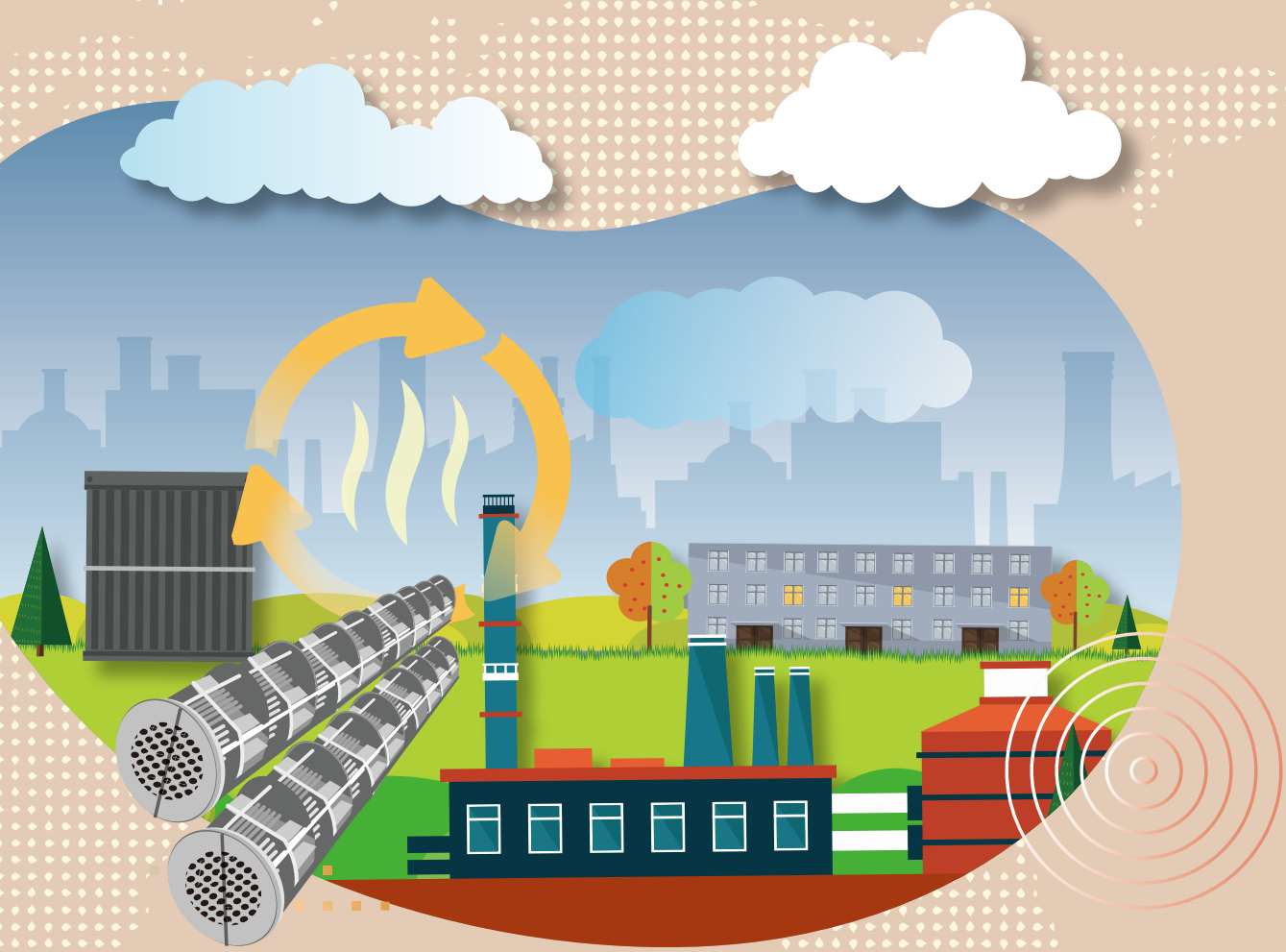
經濟部

低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇



INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU,
MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS
經 濟 部 工 業 局

低碳生產技術彙編

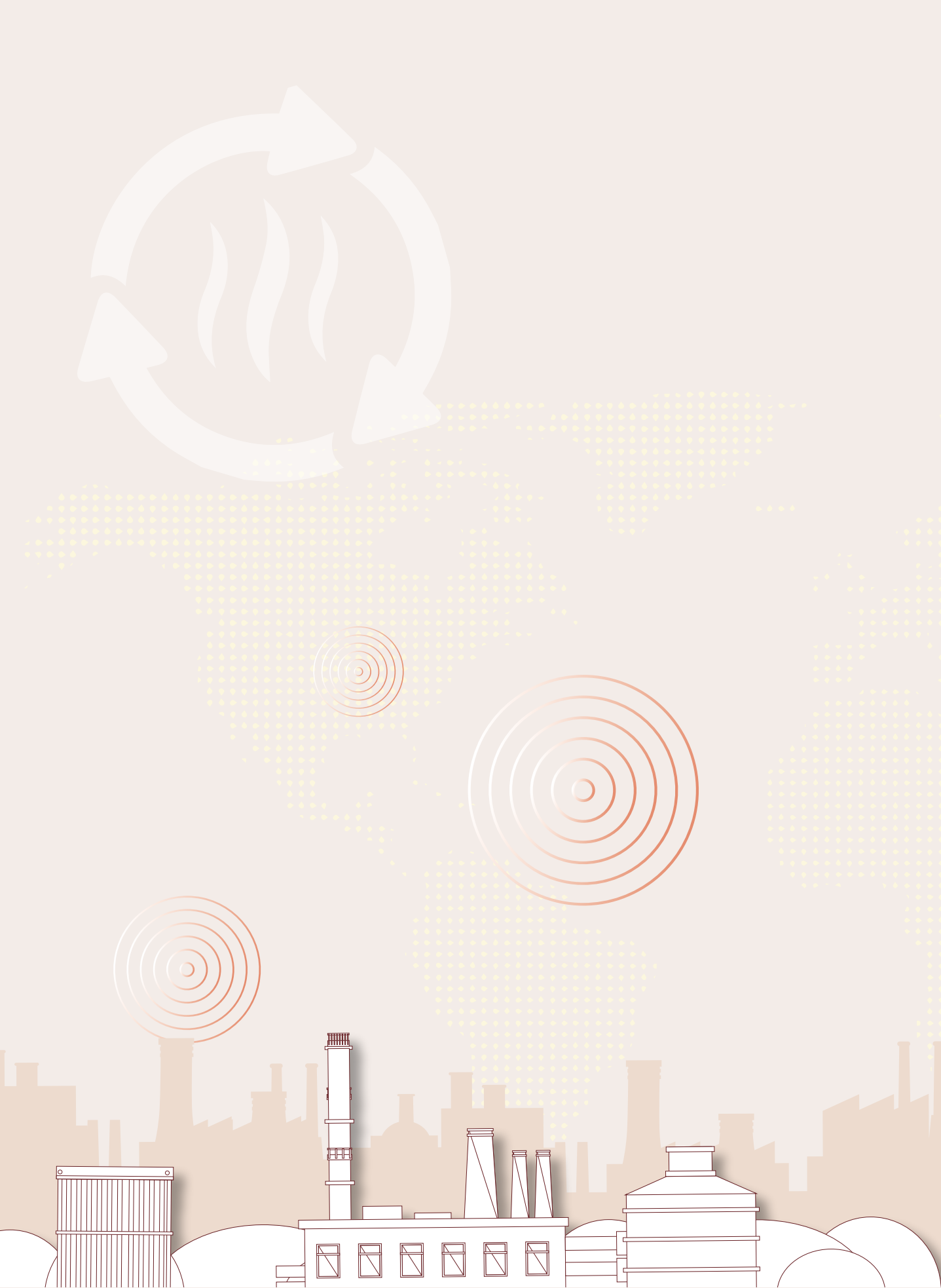
製程餘熱回收

技術應用篇

經濟部工業局 編印
中華民國一一〇年十一月

圖 目 錄

表 目 錄



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇

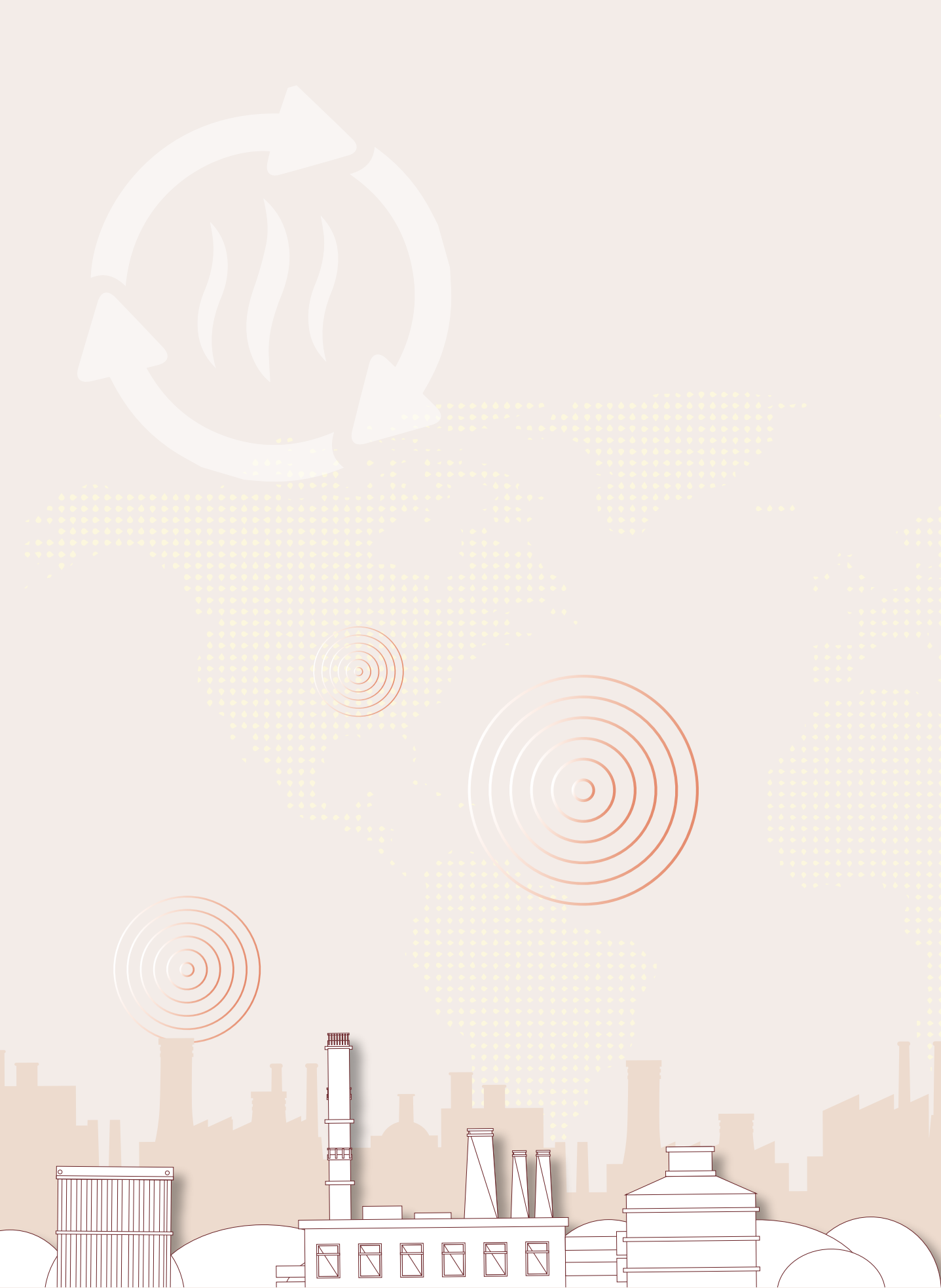
一、前言

一、前言

《溫室氣體減量及管理法》已於民國 104 年 7 月 1 日總統令公布施行，明定「國家溫室氣體長期減量目標為民國 139 年溫室氣體排放量降為民國 94 年溫室氣體排放量百分之五十以下。」及以 5 年為一期的階段管制目標。同年，行政院核定我國「國家自定預期貢獻」(Intended Nationally Determined Contribution, INDC) 書[1]，揭示我國 INDC 設定民國 119 年溫室氣體排放量為依現況發展趨勢推估情境 (Business as Usual, BAU) 減量 50%，該目標相當於民國 94 年排放量再減 20%，亦為前述溫管法要求的階段性目標「在民國 139 年降至民國 94 年排放量 50% 以下」之重要參考。行政院環保署並於 110 年 10 月 21 日預告修正《溫室氣體減量及管理法》為《氣候變遷因應法》草案，將 139 年溫室氣體淨零排放目標入法，以宣示我國減量決心。依據行政院環境保護署「2020 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告」[2]顯示，在民國 79 至 107 年間，工業製程及產品使用部門溫室氣體排放量已增加 50.37%，年平均成長率 1.47%，顯示製造部門之溫室氣體排放量有逐年成長趨勢，預期未來所面臨減碳要求及壓力亦將與日俱增。

經濟部工業局為協助產業落實減碳工作，輔導企業低碳升級轉型與永續發展，期能協助產業因應日趨劇烈變化的氣候與經營環境，以確保產業競爭力。由於製程技術或設備導入須考量之因素眾多，為協助工廠順利進行低碳生產新技術或設備導入之前期規劃，遂著手辦理「低碳生產技術彙編」，藉由各產業專家所建議低碳生產技術設備之技術介紹及實務案例，以協助企業排除技術篩選之困擾與障礙，順利導入低碳生產製程技術。

本彙編針對製程餘熱回收彙集收錄相關低碳技術及實務案例，皆為產業先進經實際應用所得出之寶貴經驗，惟參採時仍須考量個案適用性，包括經濟層面、技術層面、工程層面及現場操作條件，選用時宜多加評估各方面之可行性。



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇

二、產業概況

二、產業概況

2.1製造部門餘熱概況

我國能源仰賴進口，依據能源局「中華民國 109 年能源統計手冊」[3]指出，進口能源依存度高達 97.8%，因此除了持續進行能源開源 (如再生能源) 以外，亦需要積極執行節流。透過檢視全國能源消費結構發現，工業部門耗能占 31.47%，約為全國耗能的三分之一，能源消耗量大排碳量高，為因應國家減碳目標，產業低碳轉型勢在必行。

依據工業技術研究院於 2015 年經濟部節能減碳推動小組會議「全國廢熱、冷之調查成果報告」[4]資料指出，調查之能源大用戶樣本餘熱主要集中在化工業、金屬基本工業及非金屬礦業等能源密集產業，占其總餘熱 80%；其餘熱量占能源使用量之比例為 11.6%，而 250℃以下餘熱量占能源使用量之比例則為 8.7%，資料如表 2.1-1 所彙整。因能源局近年訂定鋼鐵業、紡織業、石化業、造紙業等設備能效規定及指定能源用戶使用蒸汽鍋爐應遵行之節約能源規定，其加熱設備之排氣溫度需控制在規定溫度以下；且依近年來產業查訪資料結果顯示，工廠產出之中、高溫以上餘熱大多已進行回收。若以上述 250℃以下餘熱量占比 8.7% 推估工業部門尚未被回收之餘熱量，依據能源局 109 年能源平衡表[5]工業部門能源使用量 2,687.7 萬公秉油當量估算，尚有 233.8 萬公秉油當量可進行回收，若能妥善回收利用可降低產業能耗需求。

表2.1-1 工業部門各產業能源大用戶樣本餘熱量與溫度分佈

單位：kLOE

項目	化工業	金屬基本工業	非金屬礦業	食品業	紡織業	造紙業	電機業	其他	合計 (kLOE)
溫度 150℃以下	401,939	21,006	111,153	7,038	31,707	34,603	50,015	2,966	660,427 (39.8%)
溫度 151-200℃	159,198	35,723	28,773	42,441	21,807	85,413	20,714	3,574	397,643 (24.0%)
溫度 201-250℃	55,721	4,150	113,933	7,483	-	-	1,697	806	183,790 (11.1%)
溫度 251-300℃	10,909	150,159	-	-	-	-	-	32,626	193,694 (11.7%)
溫度 301-400℃	0	94,847	-	-	-	-	-	-	94,847 (5.7%)
溫度 400℃以上	9,106	119,209	-	-	-	-	-	1,275	129,590 (7.8%)
產業餘熱量	636,873	425,094	253,859	56,962	53,514	120,016	72,426	41,247	1,659,991
產業餘熱占比	38.4%	25.6%	15.3%	3.4%	3.2%	7.2%	4.4%	2.5%	100%
樣本能源使用量	4,454,450	2,322,615	1,000,676	298,621	1,587,772	504,924	3,295,510	855,515	14,320,083
樣本餘熱量占能源使用量比例	14.3%	18.3%	25.4%	19.1%	3.4%	23.8%	2.2%	4.8%	11.6%
樣本溫度250℃以下餘熱量占能源使用量比例	13.8%	2.6%	25.4%	19.1%	3.4%	23.8%	2.2%	0.9%	8.7%

註：資料為 101 能源局工業部門能源查核管理與節能技術服務計畫委託台灣經濟研究院調查整理。

資料來源：工業技術研究院，經濟部節能減碳推動小組會議「全國廢熱、冷之調查成果報告」簡報資料，2015 年[4]。

餘熱是在一定經濟技術條件下，在能源利用設備中沒有被利用的能源，也就是多餘、廢棄的能源。它包括高溫廢氣餘熱、冷卻介質餘熱、廢汽廢水餘熱、高溫產品和爐渣餘熱、化學反應餘熱、可燃廢氣廢液和廢料餘熱以及高壓流體餘壓等；來源例如加熱過程中的燃燒器產生的高溫氣體、熱處理產生的低溫氣體熔爐、乾燥器和加熱器、以及來自熱交換器、冷卻液和氣體的熱量。餘熱最

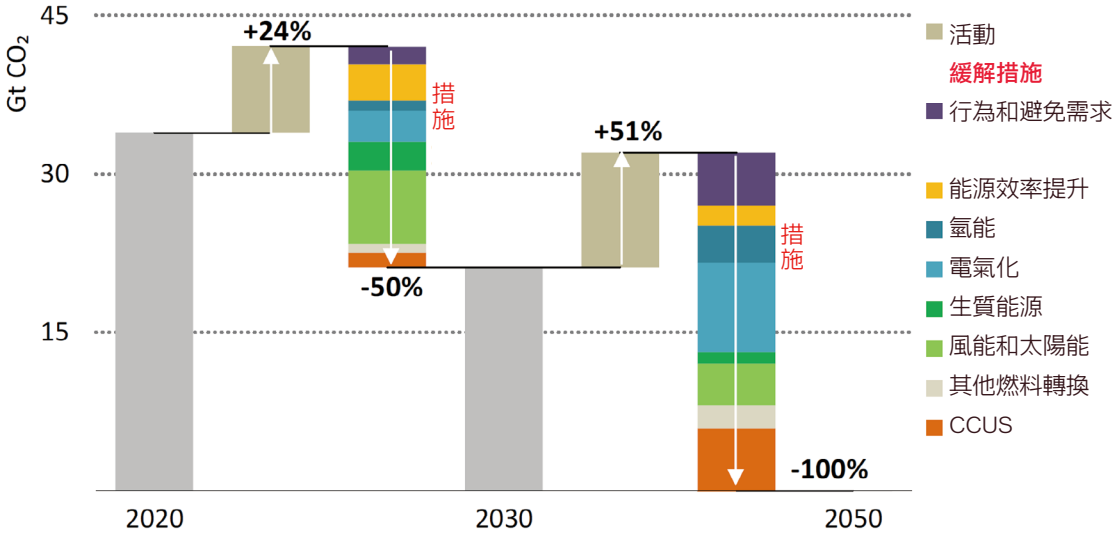
大量的方式是以廢氣的形式來排放，餘熱也可以由液體和固體的形式排放；液體餘熱形式包括冷卻水、加熱的洗滌水和廢水排放，固體的餘熱可以是產品在加工後或反應完成後排放，或者它們可以是加工過程中的副產品或固體物質的燃燒。其他量較少的餘熱源包括熱表面、蒸汽洩漏和鍋爐排放水。

一般來說，餘熱依溫度排放可分為高溫、中溫與低溫，高溫為大於 650℃，中溫溫度範圍為 250℃ ~650℃，低溫範圍低於 250℃。通常大部分高溫餘熱都由直接燃燒過程產生，中溫餘熱來自燃燒裝置的廢氣，而低溫餘熱多來自零件、產品和冷卻後餘熱。餘熱回收利用是具經濟性且節約能源的一項重要途徑。餘熱回收方法包括回收餘熱用來預熱或轉移餘熱成其他的電能和機械能等方式；其回收和再利用必需考量熱源形態、分布和產業製程，若能有效回收餘熱再利用可大幅提高能源使用效益。

2.2 產業低碳轉型

因全球暖化問題嚴重，全球各國紛紛宣示以淨零與碳中和為目標，預定在 2050 年達到淨零排放，各國企業也陸續推動淨零排放，加入減碳行列。此外，歐盟為防止產業碳洩漏並促使全球產業往低碳製造轉型，歐盟執委會於 110 年 7 月 14 日提出碳邊境調整機制 (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 計畫，規範碳密集型產品若進口到歐盟，必須購買憑證 (CBAM Certificates) 才能將其產品銷往歐洲市場，降低碳洩漏風險。

依國際能源總署 (International Energy Agency, IEA)2050 淨零排放路徑規劃 (Net-Zero Emissions by 2050 Scenario, NZE)，工業部門的 CO_2 排放量在 2030 年必須下降 20%，2050 年下降 93%；未來 30 年達成全球能源系統脫碳的主要支柱為：能源效率提升、行為改變、電氣化、再生能源、氫及氫基燃料、生質能源、碳捕獲再利用與封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 等 7 大項，如圖 2.2-1 所示。



註：活動為能源服務需求因經濟和人口增長而變化；行為為用戶決策導致的能源服務需求變化，例如改變加熱溫度；避免的需求為能源服務需求因技術發展而發生的變化，例如數位化；其他燃料轉變為從煤炭和石油轉向天然氣、核能、水電、地熱、聚光太陽能或海洋。

資料來源：IEA, Net Zero by 2050- A Roadmap for the Global Energy Sector, July 2021.[6]

圖2.2-1 2020~2050 NZE情境中排放減量措施

在 NZE 情境中，能源效率提升是最先被導入的措施，主要是因為從現在到 2030 年期間，能效提升在減少能源需求與排碳量上，扮演最重要的角色。雖然目前工業生產使用效率不錯，但仍有進一步提升能源效率的空間，譬如製程整合 (餘熱回收)、建置能源管理系統及高效率工業設備等，在 NZE 情境中必須發揮其最大的應用潛力。

2050 年正好是工業設備投資的另一個循環開始，現在到 2030 年間是達成 2050 年淨零排放的關鍵與機會，企業進行設備汰舊換新的投資決策時，順勢導入低碳生產設備或創新技術，才可大幅降低工業 CO_2 排放。表 2.2-1 彙整已商業化之製程餘熱回收低碳技術設備，本彙編針對較完整之餘熱回收節能應用案例進行收錄，提供產業規劃及執行低碳轉型之參考。

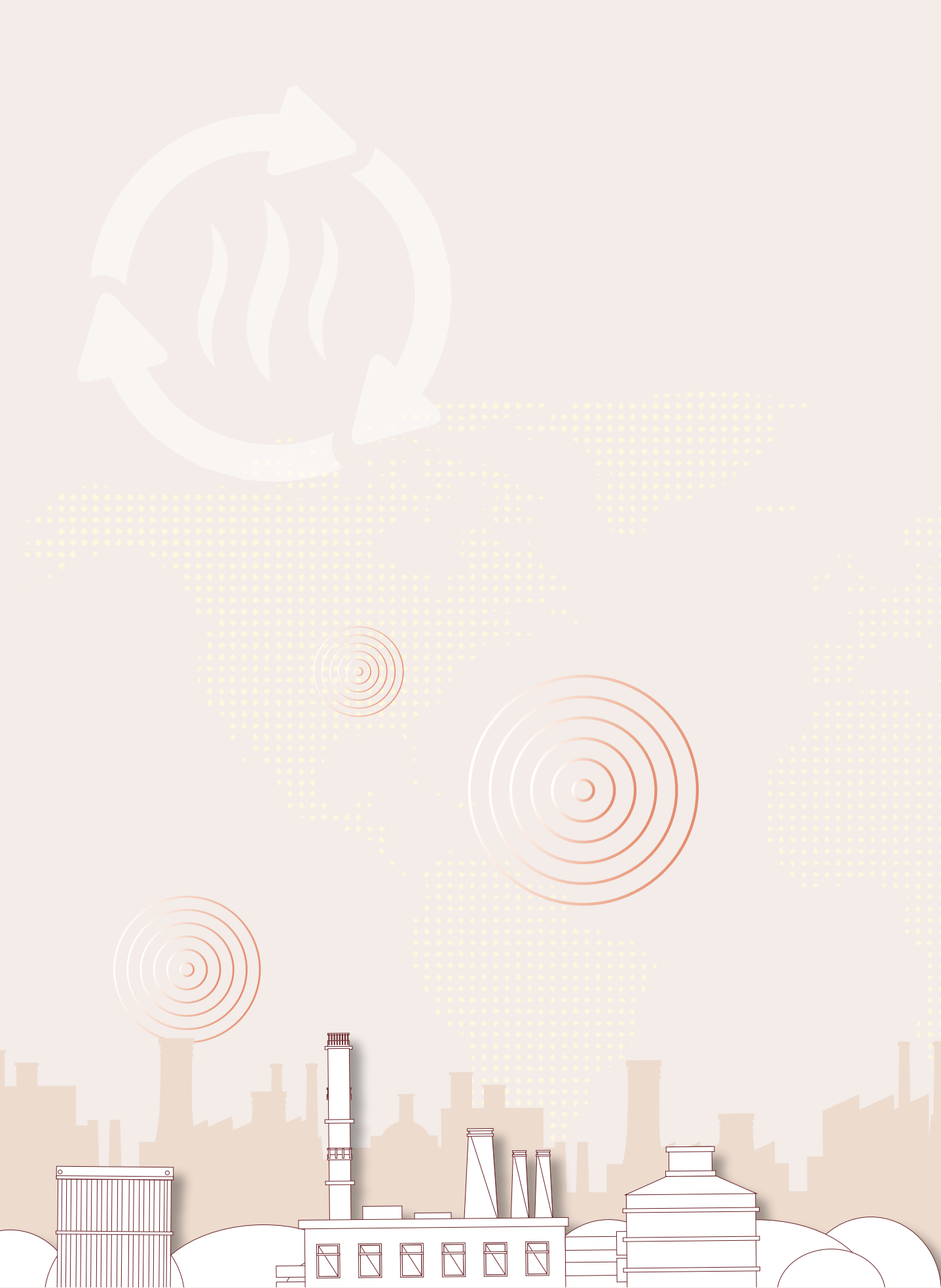
表2.2-1 製程餘熱回收低碳技術設備彙整

低碳技術名稱	節省能源類型	節能比例
提升製程換熱器換熱效果 (汰舊換新、更換不同型之換熱器、加大換熱面積)	蒸汽	10~25%
增加原料預熱器或排氣熱交換器	蒸汽	10~25%
製程熱能整合	蒸汽	10~30%
低壓蒸汽回收/蒸汽壓力提升技術	蒸汽	-
ORC餘熱發電技術	電力	-
蒸汽差壓發電技術	電力	-
固態熱電材料餘熱回收發電技術	電力	-
吸收式冷凍機技術	電力	-
熱泵熱回收技術	電力/天然氣	40~75%
空壓機餘熱回收技術	電力	-
鍋爐餘熱回收技術	煤/重油/天然氣	7~10%
定型機餘熱回收技術	重油/天然氣	約10%

註：餘熱回收技術之節能效益，會受其所回收之熱源條件、應用製程 (或設備)、操作參數、規模大小及運轉時數等因素而影響。

資料來源：本彙編依製造部門低碳生產推廣計畫調查結果彙整。

我國擬將「溫室氣體減量及管理法」修法，納入「2050 淨零排放」目標，有鑑於能源密集產業製程高度耗能，企業應儘早評估其風險找出製程中需要減碳的階段，並研擬及落實低碳轉型策略，例如可透過應用投資低碳技術設備、推動建置能源管理系統 (ISO 50001)、利用先進科技讓能源使用效率最佳化、透過原料供應鏈之管理或要求進行減碳措施、採用再生能源設備或提高生質燃料應用等方式來進行，並進一步掌握產業創新技術資訊趨勢，儘早規劃及執行低碳轉型。在產業蓬勃發展的同時，如何朝向低碳綠色製造與環境永續發展的目標前進，成為未來關注之重點。



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇

三、製程餘熱回收技術設備彙整

三、製程餘熱回收技術設備彙整

本彙編針對工業部門餘熱回收應用，彙集目前國內產業尚有應用空間之技術設備，期能提供業界參考進而順利導入低碳生產。應用範圍包含餘熱量大之主要能源密集產業及電子業均可參採應用，惟參採技術時須考量個案適用性，包括經濟層面、技術層面、工程層面及現場操作條件等，選用時宜多加評估各方面之可行性。低碳生產技術特點及適用範圍簡述如表 3-1 所示，詳細技術說明請參閱第 4 章內容。

表3-1 低碳生產技術特點及適用範圍

項次	低碳生產技術及設備	技術特點	適用範圍	考量因素	應用產業
1	預熱器餘熱回收技術	以回收餘熱用來預熱介質，依據餘熱回收的環境(包含工作流體、溫度、壓力、雜質等)，選用適當形式、特性材質之熱交換器，以達到能源使用效益最大化。	① 在較乾淨的環境中，及可忍受的溫度壓力下，可考慮選擇較密集式的熱交換器(如板式、板鰭式、螺旋式、印刷電路板式等)，以擁有較高的熱回收效率； ② 如果環境較差，可選用效率較低但操作性較佳的殼管式熱交換器或套管式熱交換器以利清理； ③ 如果回收熱源為空氣，可考慮使用面積較大的鰭片； ④ 在高溫餘熱的回收上，可考慮使用非金屬類(如陶瓷材質)之再生式熱交換器。	① 熱流需求：包括熱交換量、工作流體的溫度、壓力與可允許的壓損； ② 熱交換器與流體的匹配性：熱交換器的材料必須與工作流體能長期搭配，注意腐蝕、結垢問題； ③ 流體型式：氣體的熱傳係數遠低於液體，應考量面積的密集度及流動壓損； ④ 維護性：考量停機清理與置換的問題，及留意製程應用條件改變時所帶來的影響； ⑤ 造價：同時考量裝置、操作、維護等成本的影響，評估長期操作下流動的壓損及熱傳情形； ⑥ 空間與重量：考慮裝置時空間與重量的問題。	半導體業 光電顯示器業 石化業 鋼鐵業 水泥業 紡織業 造紙業 玻璃相關產業

項次	低碳生產技術及設備	技術特點	適用範圍	考量因素	應用產業
2	有機朗肯循環ORC發電技術	ORC發電技術廣泛應用於中、低溫餘熱發電，利用低溫沸點冷媒之熱機循環(昇壓、蒸發、做功發電、冷凝)，將冷、熱源間的溫差熱能轉換為電能。	①熱源可利用現場製程後端的低壓蒸汽、冷凝熱水(溫度>80℃)、熱油(溫度>80℃)、煙氣(溫度>150℃)等餘熱； ②單一機組發電容量10~1,200 kW。	①冷熱源參數：流量及溫度條件等變動性，型態及流體成分，其進、出口溫度及壓力等條件； ②環境設置：機組及冷熱源相對位置及空間，環境特性如腐蝕性、鹽害、防爆區等； ③電力條件：為感應發電機或同步發電機，電力是否直接饋接於廠區電網供廠區用電，及現場電壓情形等考量。	石化業 鋼鐵業 水泥業 紡織業 造紙業 玻璃相關產業
3	蒸汽壓差發電技術	若製程蒸汽鍋爐可裝設發電機，汽壓差換能汽電力使用蒸汽壓力降利用產生高效率。	①入口蒸汽最高壓力約14~20 kg/cm²(設備最高可達60 kg/cm²)，蒸汽需量約3~50 T/hr； ②單一機組發電容量約50~6,000 kW。	①蒸汽參數：蒸汽流量，入口條件如飽和/過熱蒸汽、壓力、溫度，出口條件如壓力需求等； ②電力條件：為感應發電機或同步發電機，電力是否直接饋接於廠區電網供廠區用電，及現場電壓情形等； ③環境設置：機組位置及空間，環境特性如腐蝕性、鹽害、防爆區等考量。	石化業 紡織業 造紙業

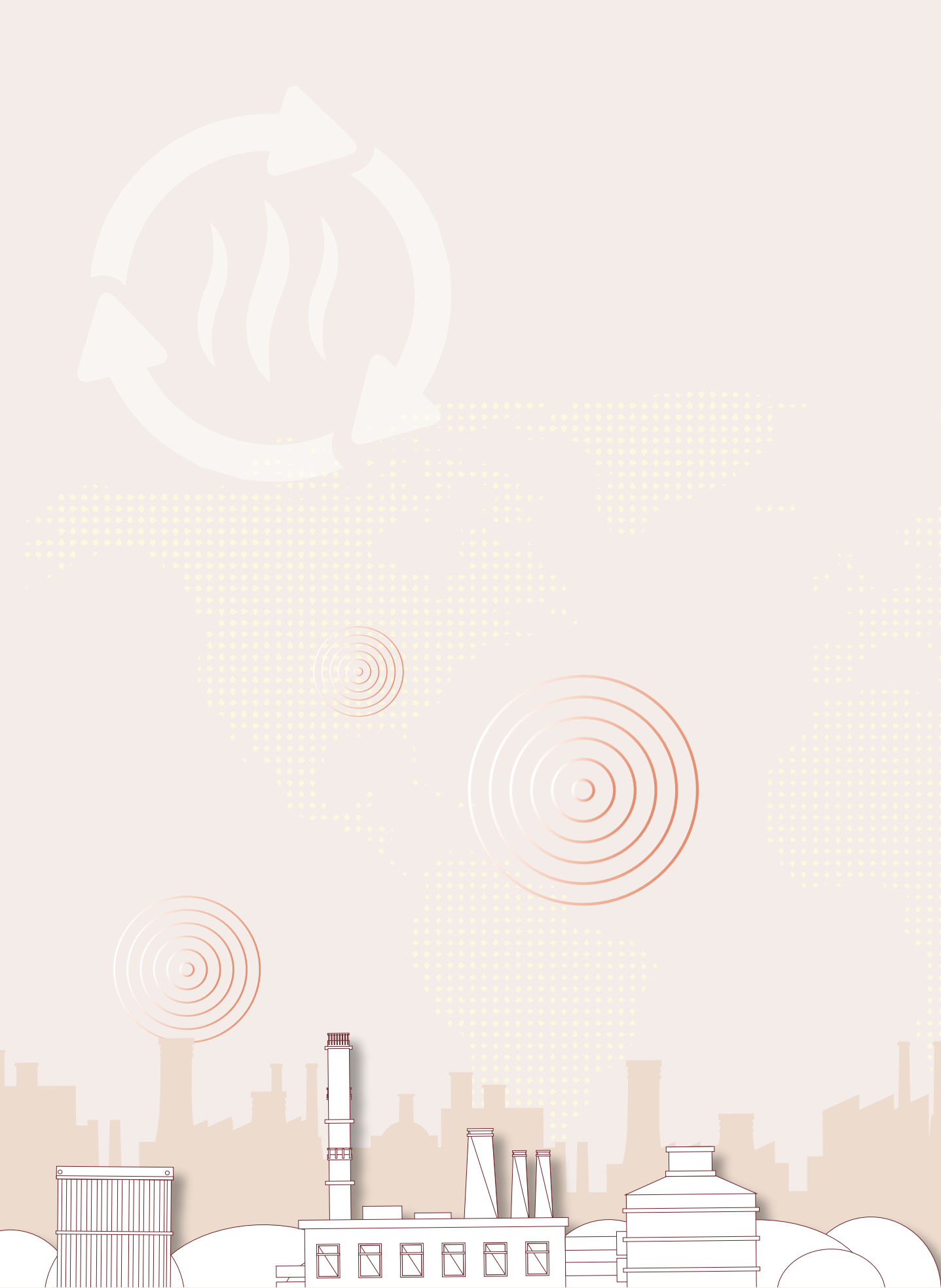
項次	低碳生產技術及設備	技術特點	適用範圍	考量因素	應用產業
4	低壓蒸汽回收/壓力提升技術	利用高壓的蒸汽通過內部噴嘴把壓力能轉成速度能，順勢把低壓側的氣體或蒸汽帶入熱壓縮機內混合排出，可將低壓蒸汽提高壓力後再生回製程使用。	①熱壓縮機可直接安裝在管線中間，無安裝角度限制； ②設備沒有電力需求，無轉動部件，不用考量防爆問題。	①需要相對高壓蒸汽進行熱壓機驅動，應評估整體蒸汽需求； ②出口壓力/進口壓力的比值最好在2.0之內，較有經濟優勢； ③應進行管線保溫。	石化業 紡織業 造紙業
5	吸收式冷凍機技術	以外來熱源為動力製造冷凍水，可將製程餘熱回收後驅動冷凍機，減少製程冰機負載，並可調節尖峰用電期間之供需。	①適用於製程有冷能需求之熱回收； ②穩定連續性熱源如熱水(約88~95℃，最高可達130℃)、蒸汽、煙氣等。	①餘熱(熱水或蒸汽)之形式及條件，如能源能階是否穩定足夠、連續供應，冷卻水塔負載量是否足夠； ②製程所需冷凍水需求，其溫度是否低於機台最低供水溫度； ③設備相關位置、安裝空間、搬運動線，環境因素包含溫度、腐蝕性物質等。	石化業 鋼鐵業 紡織業 金屬製造業

項次	低碳生產技術及設備	技術特點	適用範圍	考量因素	應用產業
6	熱泵熱回收技術	收的程統行其的熱源可源地陽四利縮，並吸中製系進使需溫熱，氣、太等泵壓理能用。可然或調熱換所高依態空源及源熱媒原熱利用。泵自能空餘交為熱、型成水源射冷環收熱大熱、之熱成中水，之分、熱輻種用循回予以	依不同形式之熱泵，最高出水溫熱度約為：中溫熱泵55℃、高溫熱泵80℃、CO_2熱泵90℃。	① 取熱來源：為空氣源或水源，可否擷取現有之餘熱能，其熱能條件是否持續穩定； ② 排冷利用：可利用於機房、冷凍空調之吸風端或其他需要改善溫度之處； ③ 設置地點：取熱及排冷是否適合、保溫桶之噸數是否影響建築結構、壓差情形等。	半導體業 光電顯示器業 紡織業 玻璃相關產業

註 1：餘熱回收技術之回收年限及節能減碳等效益，與回收之熱源條件及運轉時數有關，可依各廠製程餘 熱條件評估最適技術應用。

註 2：餘熱回收技術應用產業範圍不局限於此表範圍。

NOTE



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇

四、製程餘熱回收技術設備與實務案例

四、製程餘熱回收技術設備與實務案例

如第 2 章產業能源耗用情形所述，工業部門的能源耗量中尚有大量餘熱未充分利用，即為本彙編編撰之重點項目。本章節所列製程餘熱回收技術設備之節能減碳效益大或多數廠可仿效之成功案例供各界參考，以下進行製程餘熱回收技術設備與實務案例介紹。

4.1預熱器餘熱回收技術

4.1.1技術設備概述

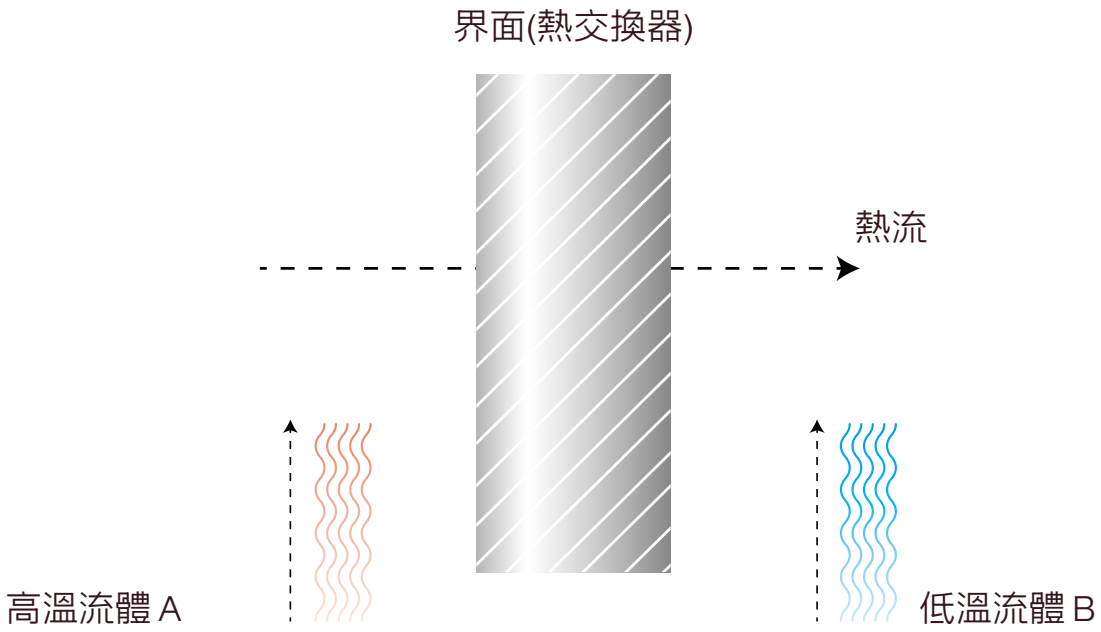
本節的餘熱回收技術介紹以回收餘熱用來預熱介質為主，這些工業餘熱通常會在來源處加裝熱回收裝置。不過因為餘熱很大的來源是煙道排放氣體，不適合直接回收進入製程，因此通常會使用熱交換器來將熱量回收加以利用。以下進行常用之熱交換器介紹。

1.技術應用原理

由熱力學第二定律，熱都是由高溫往低溫傳遞，因此熱交換器就是將高溫的熱量轉到較低溫區的裝置。常用的熱交換器的分類，可由使用特性、熱傳特徵及密集度等來分類，若以熱傳特徵來分類，依此可分為回復式 (recuperator)、再生式 (regenerator) 與直接接觸式 (direct contact heat exchanger)，說明如下。

(1) 回復式熱交換器

熱量由一工作流體 A 傳經一工作界面 (熱交換器本體) 到另一工作流體 B 上，此一工作界面即為回復式之熱交換器，圖 4.1.1-1 即說明回復式熱交換器的工作原理，圖 4.1.1-1 中，熱量由高溫流體 A 熱量以對流或輻射方式傳到界面 (熱交換器上)，隨後熱量以傳導模式經過熱交換器，再以對流或輻射方式將熱量傳至低溫的流體 B。



資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007.[7]

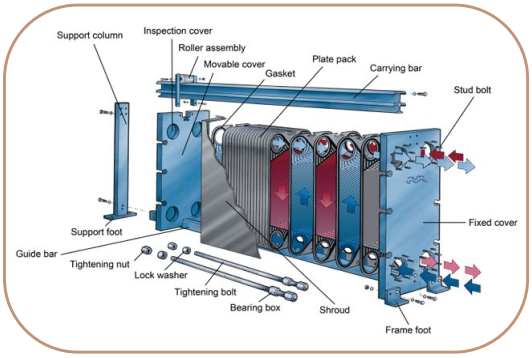
圖4.1.1-1 回復式熱交換器的工作原理

由於熱傳必須傳經界面，為了能提高傳輸的效率，回復式熱交換器所用的材質，通常選用高傳導係數 (k) 的材質為原則，例如銅 (Cu，k = 386 W/m・K)、鋁 (Al，k = 204 W/m・K)；不過，如果操作環境很惡劣 (例如海水或餘熱回收應用為化工應用之特殊流體)，在安全、穩定的考慮前提下，使用 k 值較小但安全穩定性較高的材質也很常見，例如銅鎳合金 (k = 10~90 W/m・K)、鈦 (k = 21.9 W/m・K)，甚至是石墨、琺瑯都可當作熱交換器的材料。總而言之，在安全穩定的考慮下，原則上選定材料以較便宜而同時又擁有較大 k 值的材質。

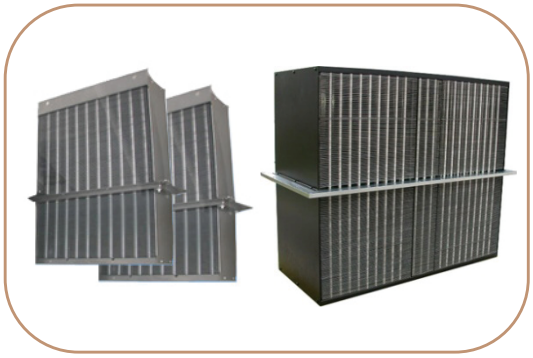
常見的回復式熱交換器如圖 4.1.1-2 之 (a)~(f) 所示，包括氣冷式熱交換器 (圖 a) 、殼管式熱交換器 (廣泛用於化工製程與冷凍空調上) (圖 b)、板式熱交換器 (同樣廣泛應用在食品工業與冷凍空調上) (圖 c)、熱管熱交換器 (圖 d)、印刷電路板式熱換器 (圖 e) 與螺旋板式熱交換器 (圖 f) 等設備型式。以下以熱管熱交換器及板鰭式熱交換器進行簡要說明。

(a) 氣冷式熱交換器

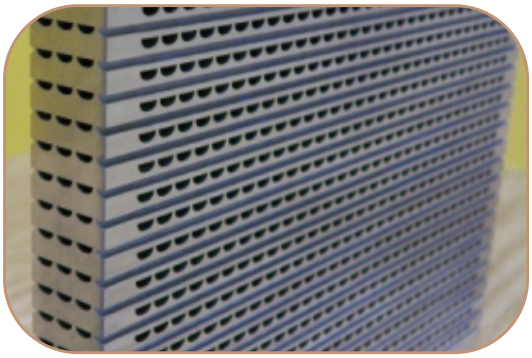
(b) 典型殼管式熱交換器



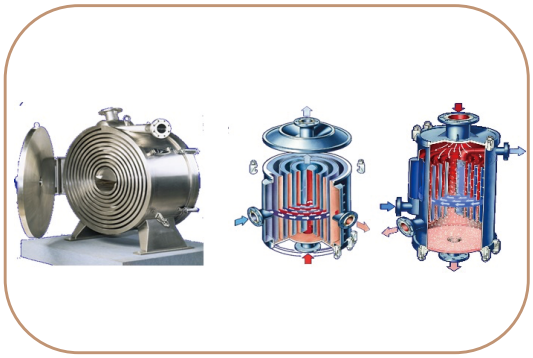
(c) 組合式板式熱交換器
(Gasketed －type)



(d) 熱管熱交換器



(e) 印刷電路板式熱交換器



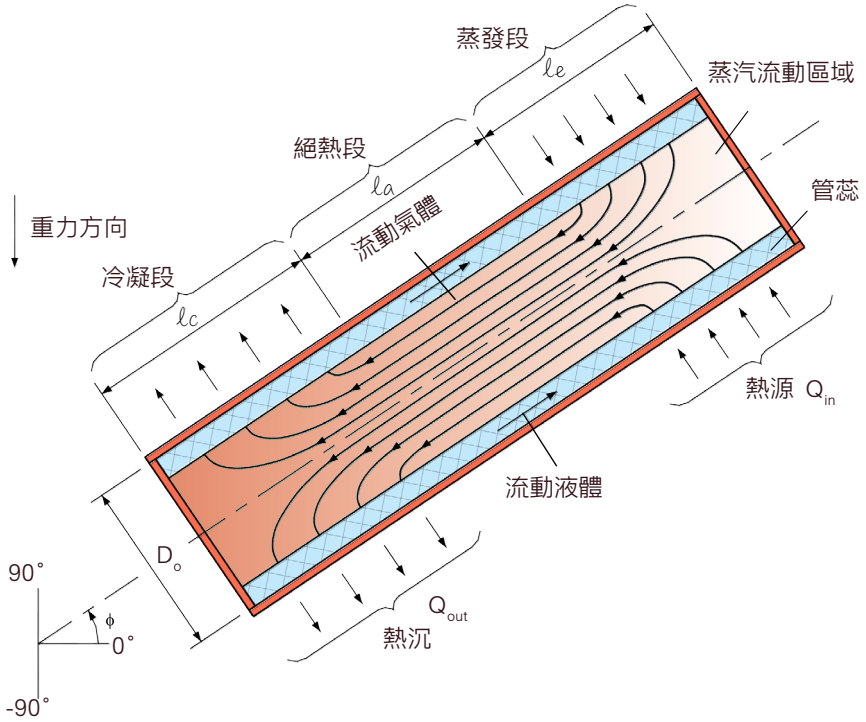
(f) 螺旋板式熱交換器

資料來源：
(a) https://www.indiamart.com/proddetail/air-cooled-heat-exchanger-19197485448.html
(b) https://www.indiamart.com/proddetail/shell-and-tube-heat-exchangers-1183520273.html
(c) https://www.alfalaval.com/microsites/gphe/tools/how-gphes-work/
(d) https://www.alfalaval.com/microsites/gphe/tools/how-gphes-work/
(e) https://m.coaxial-coils.com/pid18275323/HZSS-Printed-Circuit-Heat-Exchanger-manufacture.htm
(f) https://www.erplindia.com/spiral-heat-exchangers/

圖4.1.1-2 回復式交換器設備示意圖

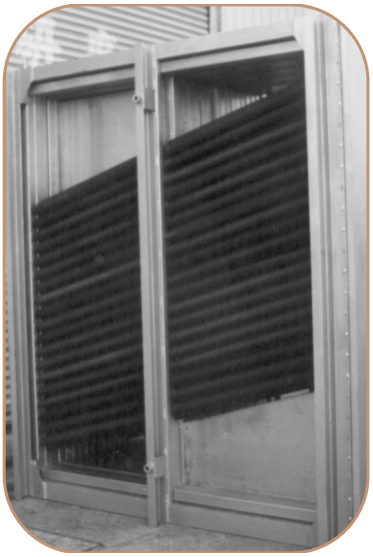
(A) 熱管熱交換器

以熱管進行熱交換應用，熱管為在一密閉空間內充填工作流體 (例如水)，藉由反覆的蒸發與冷凝循環流動以達到熱交換的目的，如圖 4.1.1-3 所示。圖中密閉容器的兩端分別為加熱與冷卻，在加熱端中，流體因加熱汽化後沿容器方向流動到另外一端，蒸氣在此一端因冷凝放熱回復到液體狀態，隨後液體再沿著管壁流回加熱端，如果冷凝端的位置低於蒸發端，液體勢必無法克服重力回到加熱端，因此通常熱管會再管壁附近加入具備毛細結構的管蕊，液體再藉由毛細粒流經管蕊回到蒸發端完成一循環。很多熱管會在蒸發段與冷凝段間增加一絕熱段，流體流動主要是藉由表面張力的機制來達到循環，不過利用重力機制也很常見；通常此一密閉空間的形狀不一，最常見的形狀如圓管與方管。以熱管熱交換器的特性，尤其適用於回收低溫排氣的餘熱，另外，在一些化工裝置和其它工業應用也日益增多。例如圖 4.1.1-4 為常見的氣對氣熱管熱交換器，應用時每根熱管都可視為一獨立的熱交換單元，由於冷熱交換均發生在同一根管上，因此熱管外側通常會使用隔絕設計將冷熱流體隔開，使其不能相互接通，可用來避免交叉污染的問題。



資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007.[7]

圖4.1.1-3 熱管工作原理示意圖

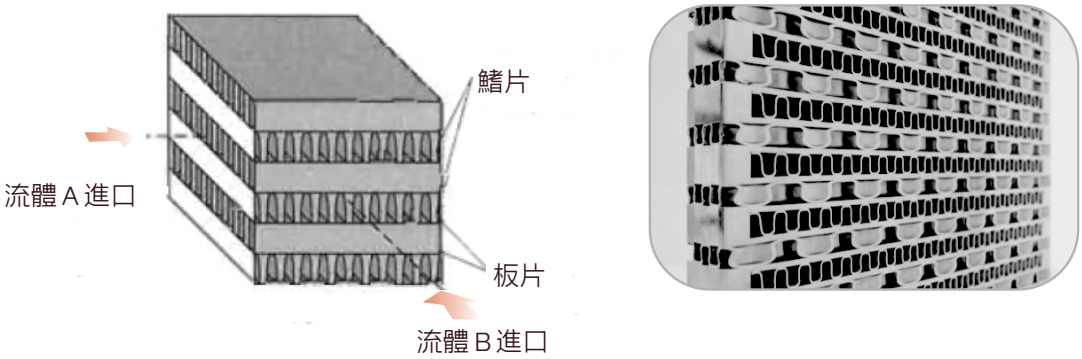


資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007.[7]

圖4.1.1-4 常見之氣對氣熱管熱交換器

(B) 板鰭式熱交換器

為一種較為密集緊湊的熱交換器，它使用板片和鰭片在流體之間傳遞熱量；其相對較高的傳熱表面積與體積比尤其適用在氣冷的應用上。典型的板鰭式熱交換器操作原理如圖 4.1.1-5(a) 中兩流體以交錯流動所示，通常為液體 (板側) 與氣體 (鰭片側) 進行熱量交換，板側流道與鰭片側流道都可以依據需求進行增強 (如圖 4.1.1-5(b) 右圖所示)。板鰭式熱交換器因具有緊湊的尺寸和輕質的特性，以及在低溫技術中利用其在小溫差下促進熱傳遞的能力，故廣泛應用於航空、汽車、化工等許多工業製程或產品上。



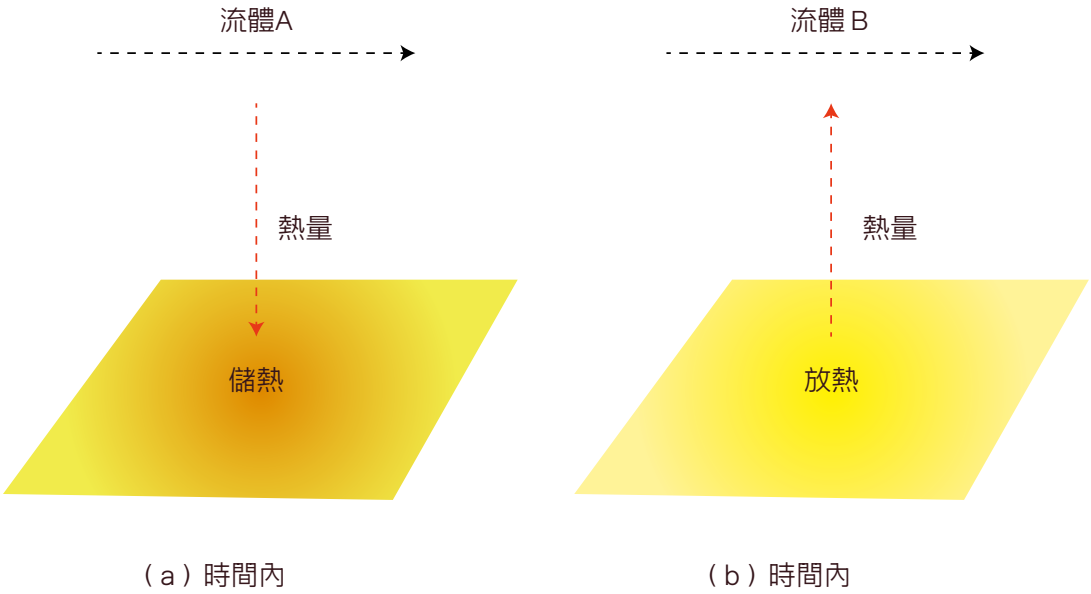
(a) (b)

資料來源：
(a) 王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007.[7]
(b) David Southall et al., Design Considerations for Compact Heat Exchangers, 2008.[8]

圖4.1.1-5 板鰭式熱交換器交錯流動操作原理示意圖

(2) 再生式熱交換器

此加熱交換器與回復式熱交換器相同，都必須透過界面來傳遞熱量，所不同的是，熱傳遞並不在同一時間發生，其傳遞方式可以圖 4.1.1-6 來說明，在 (a) 時間內，流體 A 流經傳熱界面，而把熱量傳至界面上，界面則將熱量儲存在熱交換器的本身的材質上。在 (b) 時間內，儲存在界面的熱量在流體 B 流經時，再將熱量釋放至流體 B 上。

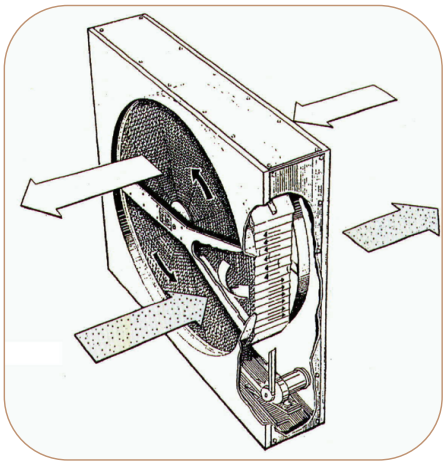


資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007.[7]

圖4.1.1-6 再生式熱交換器工作原理

再生式熱交換器原則上是一種蓄熱或蓄冷的熱交換器，若採用正常的蓄熱或蓄冷操作，熱交換器的性能表現會與操作時間有關，且必須切換冷熱交換模式，因此系統並非在一穩定狀態操作；但一般應用中，餘熱或餘冷都是持續提供，為解決此一持續的問題，使用圖 4.1.1-7 所示意之緩慢旋轉的轉輪式設計就可以提供較為穩定的操作狀況來進行餘熱或餘冷回收。

由於再生式熱交換器蓄熱的特質，熱交換器的材質基本上與回復式熱交換器不同，為了能有效的儲存熱量，材質通常選用較大的比熱與較小熱傳導



(a) 工作原理

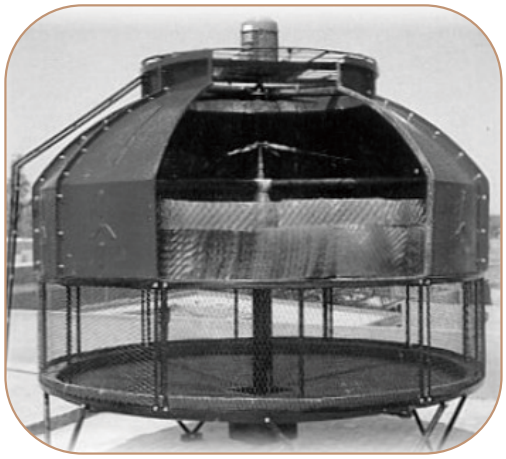
(b) 轉輪

資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007 年。[7]

圖4.1.1-7 再生式熱交換器之運作與轉輪示意

(3) 直接接觸式熱交換器

直接接觸式熱交換器是兩個工作流體藉由直接 (或僅是部份直接) 接觸來傳遞熱量，典型例子以冷卻水塔最常見，設備如圖 4.1.1-8 所示。不過，即使兩種工作流體是透過直接接觸方式來傳遞熱量，在實際運轉上仍須有一些填充材與導板來增加工作流體的接觸時間與接觸面積來提升更有效的混合程，以提高傳熱效率。



資料來源：王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007 年。[7]

圖4.1.1-8 直接接觸式熱交換器範例-冷卻水塔

2.技術特點與優勢

以熱交換器回收餘熱來預熱介質可達到節能效益，本節簡介餘熱回收的主要工具 - 熱交換器，並介紹熱交換器的形式與其熱交換的原理；熱交換器的材質與餘熱回收的環境 (包含工作流體、溫度、壓力、雜質等) 有相當的關聯，本節提供一些初步定性的可能選項供讀者參考，包含各式熱交換器大致的應用範圍與尺寸。

由於餘熱環境變化甚大，在較乾淨的環境中，及可忍受的溫度壓力下，可考慮選擇較密集式的熱交換器 (如板式、板鰭式、螺旋式、印刷電路板式等)，以擁有較高的熱回收效率；但如果餘熱環境較差，可選用效率較低但操作性較佳的殼管式熱交換器或套管式熱交換器較易清理，並於前端加裝過濾器以降低清理頻率；如果回收熱源為空氣，可考慮使用面積較大的鰭片置於回收側進行較有效的熱回收。由於再生式熱交換器的材料可相對容易採用非金屬類的設計，因此在高溫餘熱的回收上，可考慮使用再生式熱交換器。

3.應考慮因素與限制

本技術規劃設計應考慮因素包括：

(1) 熱流需求：

包括熱交換量、工作流體的溫度、壓力與可允許的壓損，選擇的熱交換器當然必須滿足這些熱流的基本需求；且熱交換器能在工作溫度壓力下長期運作，能忍受因溫差所產生的熱應力影響，應力主要由入口壓力與溫度差所引起，常見各種熱交換器所能忍受的最大壓力與溫度範圍大致如表 4.1.1-1 所示。

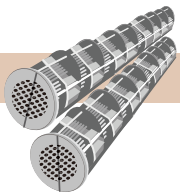


表4.1.1-1 各式熱交換器的大致應用範圍

熱交換器形式	最大壓	溫度範圍	流體限制	典型熱交換器尺寸範圍	特性
氣冷式 Air-cooled	500 bar (製程側)	~ 600℃ (製程側)	僅受限於材料製作	5~350 m^2，系統可用多模組	通常搭配風扇使用，並大量使用鰭片
可拆卸板式熱交換器	16~25 bar (某些應用設計可達 40 bar)	-25~ 200℃	通常不適用氣體與兩相流動，使用上襯墊是決定因素	1 ~to 1,200 m^2	模組化設計，不易清理
固定床式再生式熱交換器	1 bar	~ 600℃	常用於燃燒廢氣的熱回收來預熱空氣	–	製作上常使用磚或陶瓷材料
雙套管式熱交換器	300 bar(殼側) 1400 bar (管側)	– 100 to 600℃ (使用特殊材料時可更高)	僅受限於材料製作	0.25 ~ 200 m^2 (單一熱交換器)，系統可用多模組	效率相對高，可模組化
熱管熱交換器 Heat-pipe	~ 1 bar	通常低於200℃，但可依需要選取管內工作流體，工作於高溫中	適用於低壓氣體	100 ~ 1000 m^2	可設計成逆向像流動，冷熱側均可使用鰭片增加面積
板鰭式 Plate-fin	100 bar (鋁合金) 200 bar (不銹鋼)	– 273~150℃ (鋁合金) ~ 600℃ (不銹鋼)	結垢量低的流體	5 ~ 350 m^2	單位體積的熱交換面積非常大，可應用於多流體的熱交換應用
印刷電路板式 Printed circuit Board	1000 bar	~ 800℃ (不銹鋼)	結垢量低的流體	1 ~ 1,000 m^2	單位體積的熱交換面積非常大，常使用不銹鋼或特殊合金材料
轉輪再生式 Rotary regenerators	~ 1 bar	~ 980℃	適用於低壓氣體	應用範圍廣、變化高	區隔轉輪冷熱側的隔板多少都會有洩漏，可能會促成一定成度的影響
殼管式 Shell-and-tube	300 bar(殼側) 1400 bar (管側)	– 25 ~ 600℃ (使用特殊材料可操作於更低或更高的溫度)	僅受限於材料製作	10 ~ 1,000 m^2 (單一熱交換器)，系統可用多模組	耐高溫、高壓、特殊工作流體
螺旋式 Spiral	18 bar	~ 400℃	受限材料製作限制，常使用於有結垢的應用	~ 200 m^2	高熱傳效率，圓柱形結構有助於整合至蒸餾塔槽中

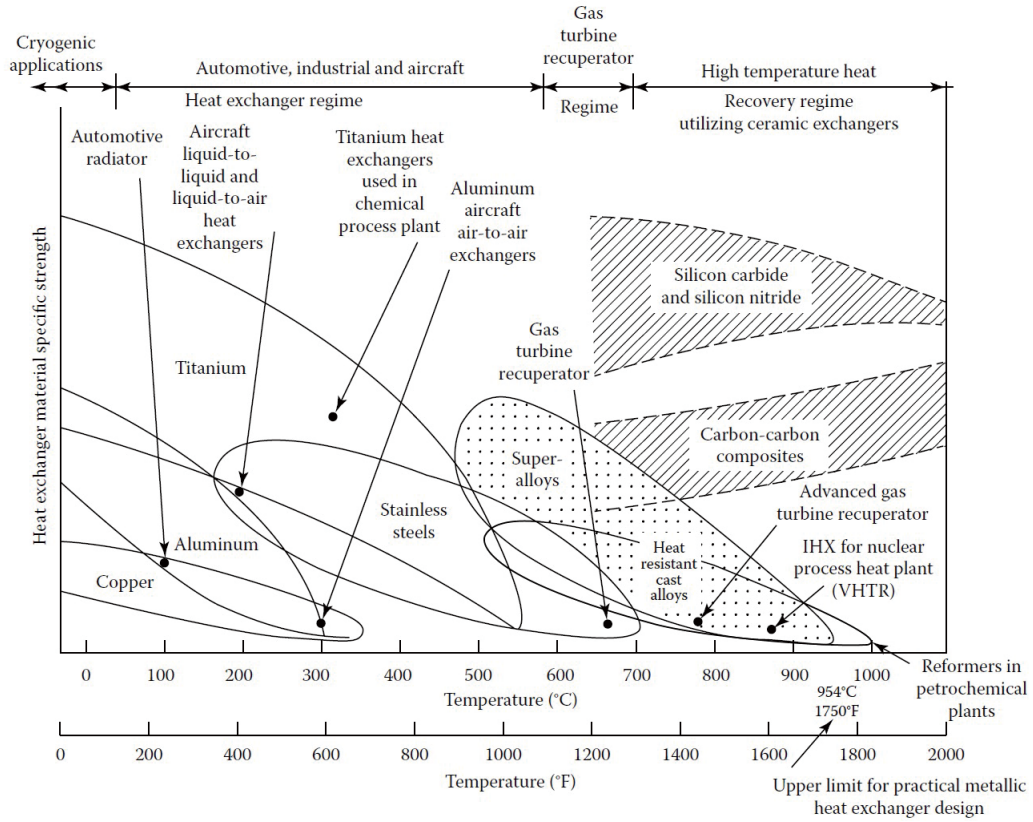
資料來源：McDonald, C.F., The Role of the Ceramic Heat Exchanger in Energy and Resource Conservation, Trans. ASME J. Eng. Power, Vol. 102, pp. 303-315,1980.〔9〕，並經本彙編彙整。

(2) 材質考量：

金屬為熱交換器最常使用的材料，因為其具備延展性和容易於製造的特性，是回復式熱交換器與直接接觸式熱交換器的理想選擇；但金屬缺乏耐高溫能力，容易受到廢氣的腐蝕。碳鋼類通常在溫度高於 425℃時會快速氧化，不銹鋼在高於 650℃也會開始氧化，如果廢氣流中含有腐蝕性成分，則會發生嚴重腐蝕。

各種熱交換器材料的大致溫度範圍如圖 4.1.1-9 所示。通常，在 1,600℉ (為 871℃) 以上，金屬換熱器由於需要昂貴的合金成本，而且高溫氣體密度甚低，熱傳性能相對變差；且高熱應力導致的維護問題都限制了金屬的使用。不銹鋼和某些鎳基和鐵基合金比較適用於高溫的應用，而合金鋼材質則適用於耐高溫及耐腐蝕之應用上。

此外，對於回收低溫餘熱可能造成的露點腐蝕問題，最常用的解決方案是使用不鏽鋼材質或是在熱交換器表面噴塗鐵氟龍或陶瓷鍍層；如果應用溫度不高 (例如低於 120℃)，高分子塗層亦是可以考慮的方式。雖然這些方法都可以達到抗腐蝕效果，不過這些材質或塗層的熱傳導係數都較低，將會降低熱傳的表現。



資料來源：McDonald, C.F., The Role of the Ceramic Heat Exchanger in Energy and Resource Conservation, Trans. ASME J. Eng. Power, Vol. 102, pp. 303-315,1980.〔9〕。

圖4.1.1-9 熱交換器材料之使用大致範圍

(3) 熱交換器與流體的匹配性：

熱交換器的材料必須與工作流體能長期搭配，無腐蝕的問題；其中必須特別注意結垢的影響，設計上應同時考慮正常操作設計點下與非設計點上運作時，結垢在不同溫度壓力變化下的影響。一般而言，典型氣對氣熱交換器的結垢影響較小，這是因為許多製程的應用上，氣體多半比液體來的乾淨，而且如果使用轉輪式的再生式熱交換器，氣體在不同時間時相反方向的流動也有助於熱交換器本身的自清，因此結垢的影響相對比液體側小；不過此類再生式熱交換器也因氣體交互流過熱交換器而可能產生污染問題。

(4) 流體型式：

由於氣體的熱傳係數遠低於液體，因此氣對氣熱交換器通常需非常大的熱交換面積，一般的作法乃藉由增加鰭片、縮小水力直徑與使用小管徑熱傳管來增加面積的密集度；密集度增加同時增加流動壓損，氣側壓損的影響相對於液體測重要很多，設計上必須特別注意。對液對液的熱交換而言，為了避免交叉污染的影響，通常不應該考慮使用再生式熱交換器，相較於氣對氣熱交換器，液對液熱交換器的壓損影響較小。對氣對液的熱交換器而言，由於氣側的熱傳係數遠低液體側，因此設計上的初步原則為盡量平衡兩側的熱阻。

(5) 維護性：

設計時必須考量停機清理與置換的問題；同時應留意製程應用條件改變時所帶來的影響。

(6) 造價：

造價為選擇設計非常重要的因素，例如板式熱交換器的造價會比殼管式熱交換器大，但是如果同時考量裝置、操作、維護等成本的影響，板式熱交換器成本可能反而比較便宜。設計上如果比較在意長期操作的成本，則在設計上就必須特別留意流動的壓損而非純粹的熱傳考慮。

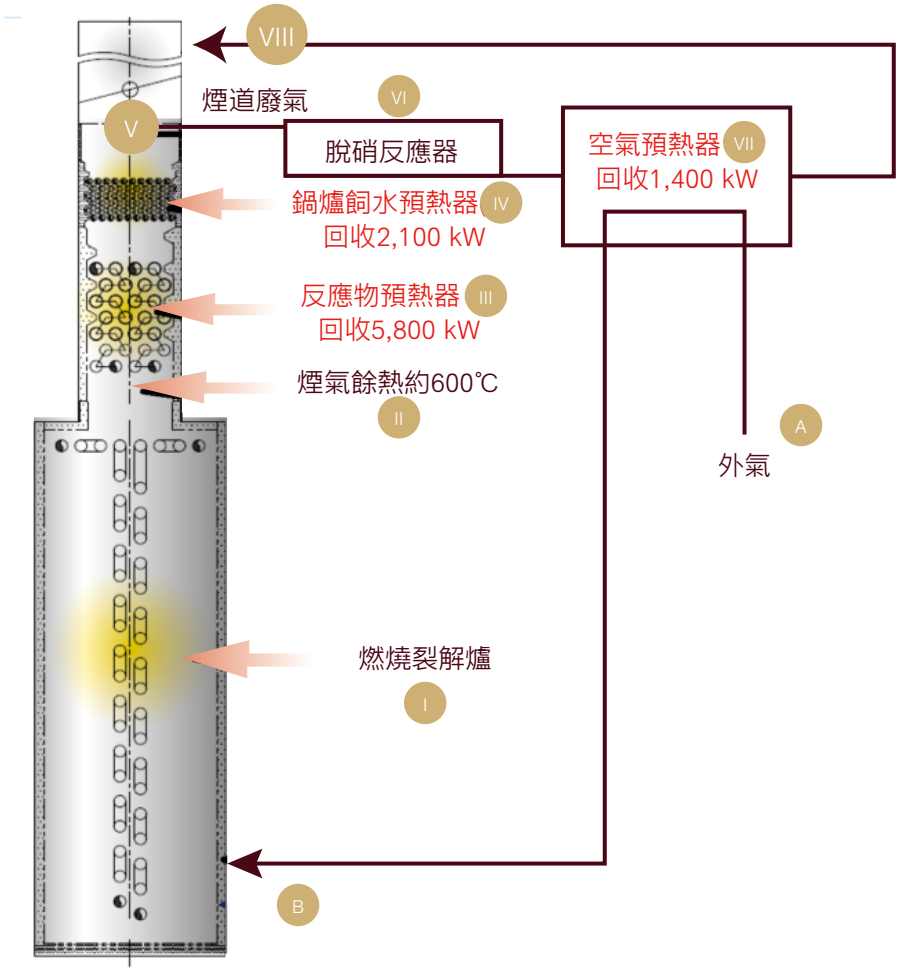
(7) 空間與重量：

許多應用上必須考慮到裝置時空間與重量的問題，例如熱交換器裝置於高樓層的重量負荷或是都會區維護空間缺乏的現實問題。

4.1.2 技術設備實務案例

1.案例廠應用簡介

案例廠為化工產業，本案為一典型的餘熱回收案例，製程使用高溫燃燒爐裂解某一項化工產物，設置預熱器以回收燃燒爐產生之餘熱加以利用之節能方式如圖 4.1.2-1 所示意。



資料來源：國立陽明交通大學機械工程學系王啟川教授。

圖4.1.2-1 案例廠高溫燃燒爐裂解餘熱回收示意圖

2.改善方案執行過程

(1) 單元應用前情境說明

燃燒裂解爐使用甲烷(CH_4)為燃料，產生非常高熱的環境去裂解管內 (I) 產物後，產生非常高溫的煙氣餘熱 (II)，其餘熱出口溫度高達 600℃左右，若能回收再利用將可達到節能成效。

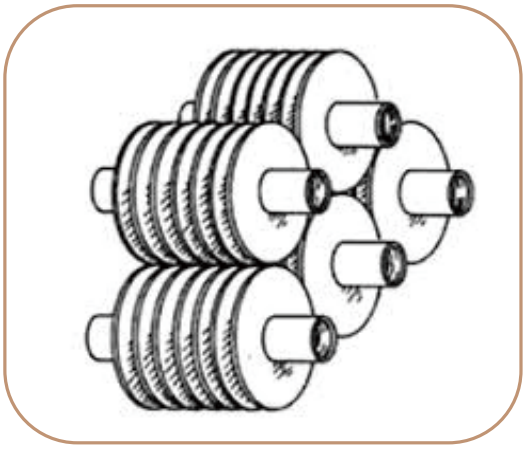
(2) 單元應用後情境說明

經規劃評估後，首先進行第一道回收，用來預熱要裂解產物 (III)；隨後降溫後的煙氣再進行第二道的回收，用來加熱水產生水蒸汽供其他製程使用 (IV)；剩下的煙道廢氣 (V) 仍有相當的溫度，在排到大氣前，先進行脫硝 (VI) 滿足環保上的需求，隨後進入一空氣預熱器 (VII) 進行外氣預熱，最後再回到煙囪排到大氣。空氣預熱器 (VII) 主要在預熱進入爐體的外氣 (A)，在進入爐體後 (B) 有較高的溫度，以提升燃燒效率。在這個案例中，主要有三個餘熱回收熱交換器，一個用來預熱裂解產物，一個用來產生水蒸汽，另外一個用來預熱外氣。

高溫燃燒爐裂解餘熱回收情形如表 4.1.2-1 所彙整，爐體反應後排出之高溫餘熱出口溫度高達約 600℃ (II)，因此先以此高溫餘熱預熱裂解物，此一反應物預熱器 (III) 約可回收 5,800 kW，這段預熱回收後，廢氣出口溫度降到約 390℃，此一預熱器為裸管熱交換器 (圓管無鰭片，廢氣走管外)；餘熱回收用來產生水蒸汽 (IV，熱交換器為圓管圓鰭片熱交換器，廢氣走管外，如圖 4.1.2-2 (a) 所示)，約可再回收 2,100 kW，廢氣出口溫度降到約 230℃；隨後再用來預熱從外界進入裂解爐的環溫空氣 (VII，熱交換器為殼管式裸管熱交換器，殼為方殼，如圖 4.1.2-2 (b) 所示)，再回收約 1,400 kW，最後廢氣溫度降到約 110℃再排到外氣中 (VIII)，總共回收 9,300 kW 的熱量。

表4.1.2-1 案例廠高溫燃燒爐裂解餘熱回收情形

區域及其說明	熱交換器形式	出口溫度	回收能源
裂解爐出口(II)	-	約600 ℃	-
反應物預熱器(III) 預熱反應物	裸管熱交換器 (圓管無鰭片)， 廢氣走管外	約390 ℃	5,800 kW
鍋爐飼水預熱器(IV) 產生水蒸汽	圓管圓鰭片熱交換器， 廢氣走管外	約230 ℃	2,100 kW
空氣預熱器(VII) 預熱進入裂解爐之外氣	熱交換器為殼管式裸管 熱交換器，殼為方殼	約110 ℃	1,400 kW



(a)

(b)

資料來源：https://www.geurtsheatexchangers.com/wp-content/uploads/2018/01/Rectangular-shell-tube-Geurts-leaflet.pdf

圖4.1.2-2 案例廠回收傳熱管與方殼圓管熱交換器示意

3.成效分析與節能減碳效益

(1) 應用預熱器餘熱回收技術之節能量

應用熱回收技術之節能量總計為 9,300 kW，約為 7,998,000 kcal/ 小時 (熱值以 860 kcal/ kWh 計算)。

(2) 投資效益

案例廠預熱器餘熱回收技術之執行

節能量	63,984,000,000 kcal/年。 (以年運轉時數8,000小時/年、天然氣熱值9,000 kcal/立方公尺計算，換算節省天然氣年用量為7,109,333立方公尺/年)
節能績效	約611萬元/年。 (以2021年10月01中油天然氣1牌價8.6元/立方公尺計算)
減碳量	1,504公噸CO_2e/年。 (以天然氣2.116公噸CO_2e/千立方公尺之排放係數計算)

4.2 有機朗肯循環ORC發電技術

4.2.1技術設備概述

有機朗肯循環 (Organic Rankine Cycle, ORC) 為一熱機循環系統，主要用於將中、低階的熱能轉換為電力，其設備因應不同的熱源溫度範圍，可搭配合適的工作流體 (working fluid)，達到最佳熱能轉換電能的效益，具有廣泛應用範圍、系統穩定、轉換效率高，為具節能減碳效益之中低溫熱能發電設備。

1.技術應用原理

有機朗肯循環 ORC 發電設備係由工作流體液泵、蒸發器、膨脹機、發電機、冷凝器等主要部件構成，有機工作流體在內部封閉迴路中循環，與外界冷、熱流體為間接接觸，迴路內工作流體運行環境潔淨，因此具備經濟壽期長 (≧ 20 年)、穩定性佳、可靠度高、維修少等產品特性。

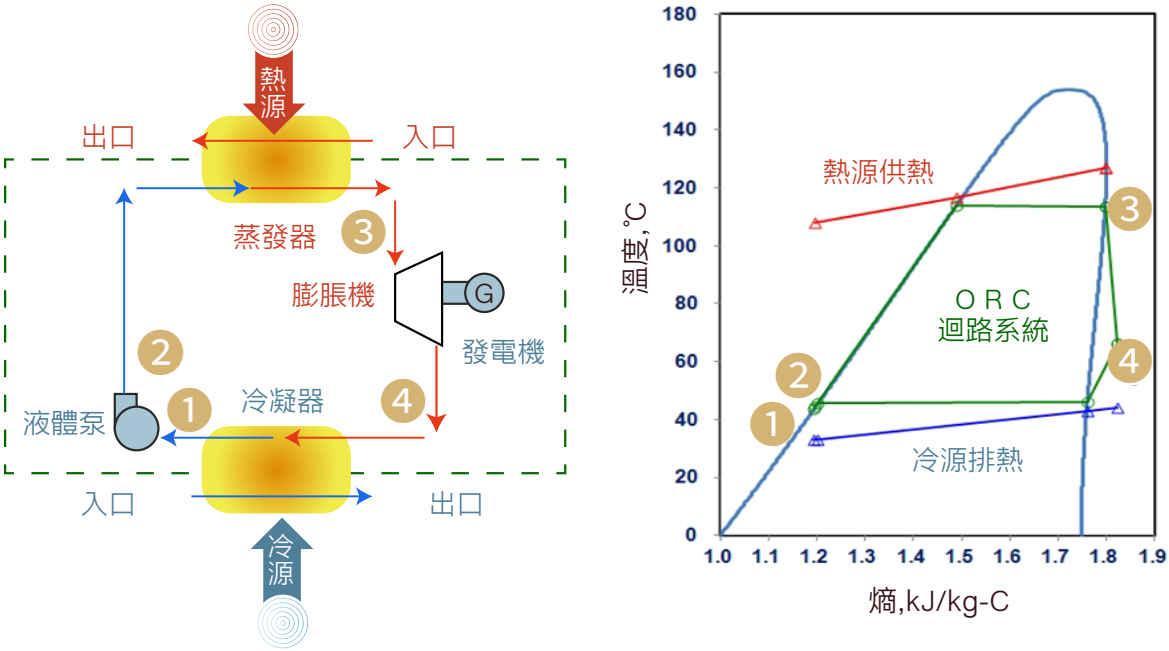
有機朗肯循環 ORC 發電設備的熱源可利用現場製程後端的低壓蒸汽、冷凝熱水 (溫度 >80℃)、熱油 (溫度 >80℃)、煙氣 (溫度 >150℃) 等餘熱；冷源排熱則可利用現場的循環冷卻水、空冷或蒸發冷等方式。有機朗肯循環 ORC 發電設備的運轉示意圖如圖 4.2.1-1 所示，其工作原理說明如下：

(1) ❶→❷：工作流體泵昇壓液態工作流體為高壓過冷液態後，進入蒸發器；

(2) ❷→❸：高壓液態工作流體透過蒸發器吸收熱傳介質 (水蒸汽、熱水或熱的熱能蒸發為飽和汽態或過熱汽態，進入膨脹發電機組；

(3) ❸→❹：汽態工作流體在膨脹機內將熱能、壓力能轉換為膨脹機軸功率，再以發電機將軸功率轉換為電力輸出；

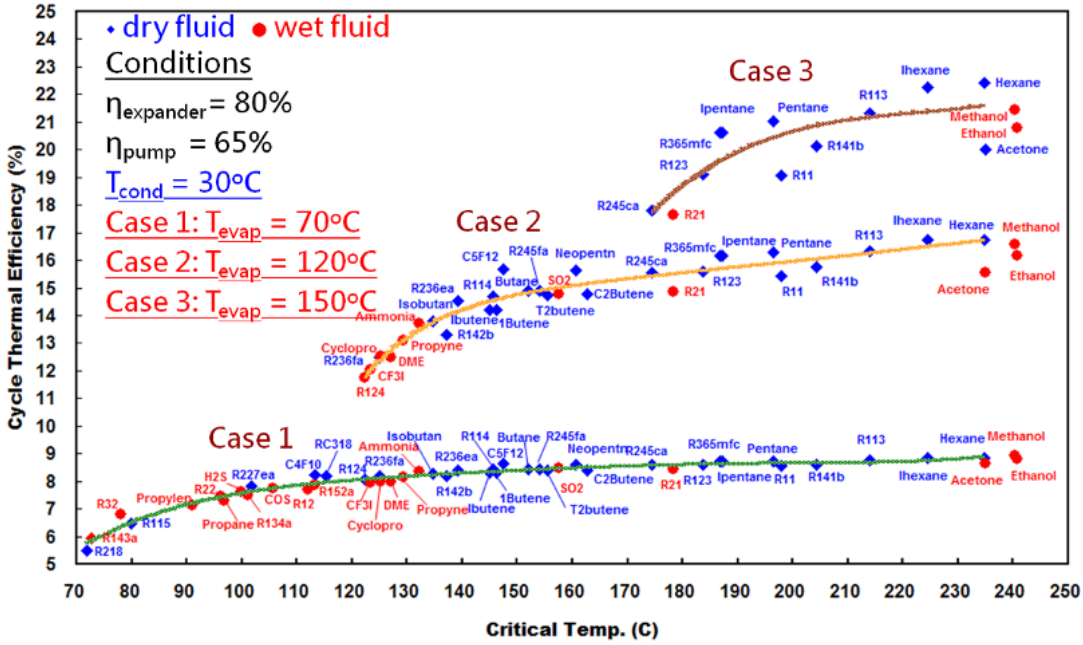
(4) ❹→❶：膨脹後的過熱工作流體，透過冷凝器釋出熱能後成為液態，再進入液泵，完成系統循環。



資料來源：漢力能源科技股份有限公司

圖4.2.1-1 有機朗肯循環ORC熱力循環示意圖

ORC 系統熱效率受冷媒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，反之亦然。茲以 ORC 循環系統冷媒的冷凝溫度 30℃為參考，圖 4.2.1-2 說明蒸發溫度在 70℃ (Case 1)、120℃ (Case 2) 及 150℃ (Case 3) 時的系統熱效率。



資料來源：漢力能源科技股份有限公司

圖4.2.1-2 有機朗肯循環ORC熱效率

2.技術特點與優勢

有機朗肯循環 ORC 發電技術有以下特點：

(1) 可利用現場製程後端中、低階的熱能轉換為電力，將餘熱有效再利用；

(2) 客製化系統設計：因應不同冷熱源條件，設計、配置最適化核心動力及關鍵部件，依使用端需求提供客製化的系統設計；

(3) 自動化控制系統：搭配自動控制系統，可自動追蹤熱源、冷源變動，快速反應並產出最大發電量，達到熱能利用最大效益；

(4) 操作範圍寬廣：有機朗肯循環 ORC 發電設備的寬廣操作範圍 (10%~120%)，可應用於冷熱源穩定及變動大的場合，機組稼動率高，最大化全年運轉時數；

(5) 自我保護系統：設置自我保護系統可自動偵測各種工況條件及突發事件，自我調適機組、保護機組，確保有機朗肯循環 ORC 發電設備經濟壽期。

3.應考慮因素與限制

本技術規劃設計應考慮因素包括熱源、冷源、環境設置及電力需求等參數，大致考量如下：

(1) 熱源參數：熱源流量及溫度條件等變動性，型態為熱水、熱油、蒸汽或煙氣，流體成分是否有腐蝕性，其進、出口溫度及壓力等條件；

(2) 冷源參數：型態為循環冷卻水、河水、海水、空冷或蒸發冷，其進、出口溫度及壓力等條件；

(3) 環境設置：機組及冷熱源相對位置及空間，環境特性如腐蝕性、鹽害、防爆區等；

(4) 電力條件：為感應發電機或同步發電機，電力是否直接饋接於廠區電網供廠區用電，及現場電壓情形等考量。

4.2.2 技術設備實務案例

1.案例廠應用簡介

案例廠為石化產業之丙烯腈 (AN) 製造廠商，應用之餘熱為製程後的低壓蒸汽 (約 3 kg/cm^2)，以有機朗肯循環 ORC 發電設備擷取蒸汽潛熱 (latent heat) 後，將冷凝水回收。ORC 轉換蒸汽潛熱產生 500 kW 電力，且可解決低壓蒸汽排放時的白煙及熱污染問題。

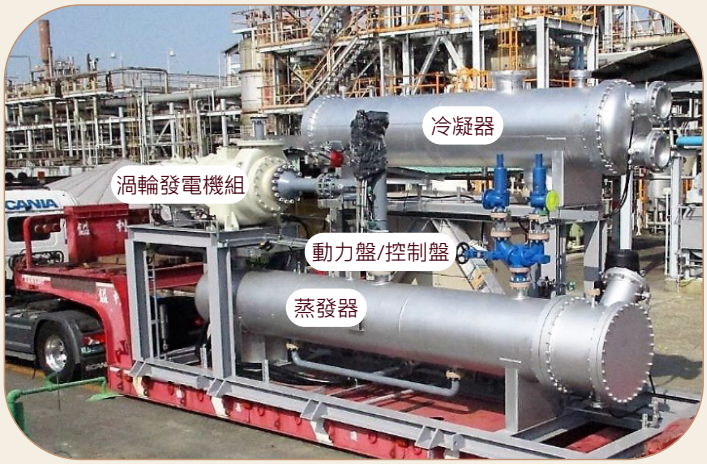
2.改善方案執行過程

(1) 單元改善前情境說明

改善前約 3 kg/cm^2 之低壓蒸汽排入冷卻水塔降溫，餘熱無利用且需耗費能資源將熱量移出。

(2) 單元改善後情境說明

約 3 kg/cm^2 之低壓蒸汽導入有機朗肯循環 ORC 發電設備後，成為冷凝水回收利用，並產生 500 kW 電力予廠區使用。案例廠有機朗肯循環 ORC 發電技術設備如圖 4.2.2-1 所示，改善後之系統如圖 4.2.2-2 所示意。

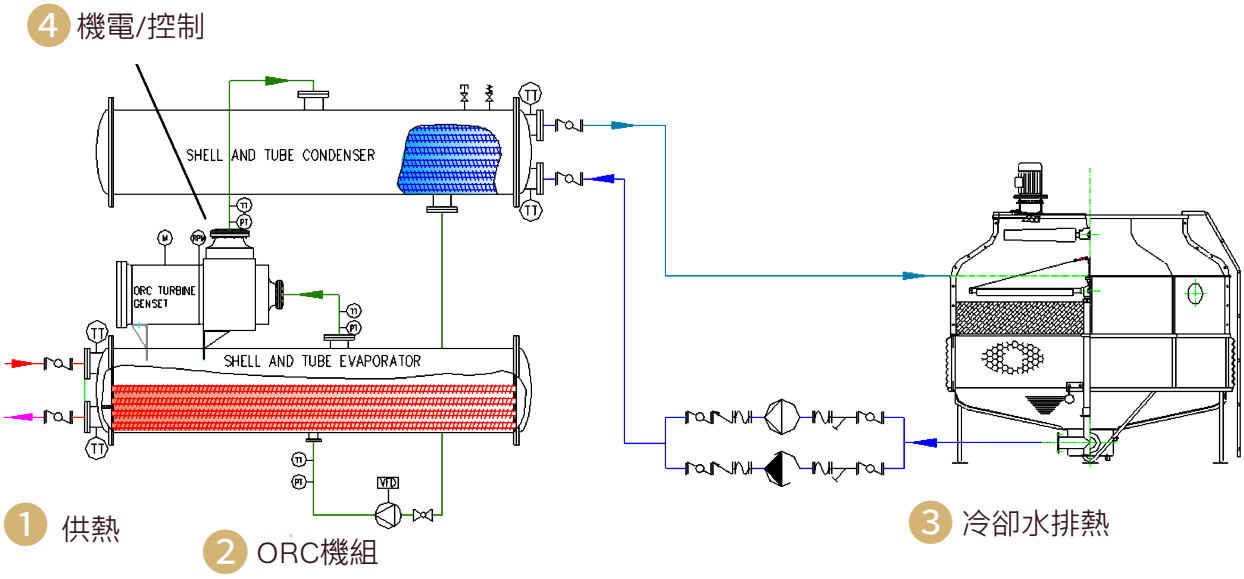


主要元件及運作原理說明

本蒸汽餘熱 ORC 發電機組的主要元件有工作流體泵 (升壓液態工作流體)、蒸發器 (低壓蒸汽供熱並汽化液態工作流體)、渦輪發電機組 (轉換汽態工作流體壓力能、熱能為軸功率，並帶動發電機輸出電力)、冷凝器 (冷卻水排出汽態工作流體熱能，並轉成液態工作流體)。液態工作流體送回工作流體泵入口，完成 ORC 熱力循環。

資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.2.2-1 案例廠有機朗肯循環ORC發電技術設備圖



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.2.2-2 案例廠改善後系統示意圖

3.成效分析與節能減碳效益

(1) 應用預熱器餘熱回收技術之節能量

本案例機組發電量為 500 kW，預估全年發電量約為 4,000,000 kWh。

(2) 投資效益

案例廠有機朗肯循環 ORC 發電技術之執行

投資金額	約4,000萬元。 (主體設備約2,000萬元，其他土木工程、管材閥件、電力供應系統、安裝工程等約2,000萬元)
節能量	發電量約4,000,000 kWh/年。 (以年運轉時數8,000小時/年計算)
節能績效	約880萬元/年。 (以電力單價2.2元/kWh計算)
減碳量	2,008公噸CO_2e/年。 (以經濟部能源局公告109年電力排放係數0.502 kg-CO_2e/ kWh計算)
回收年限	約4.55年。

4.3 蒸汽壓差發電技術

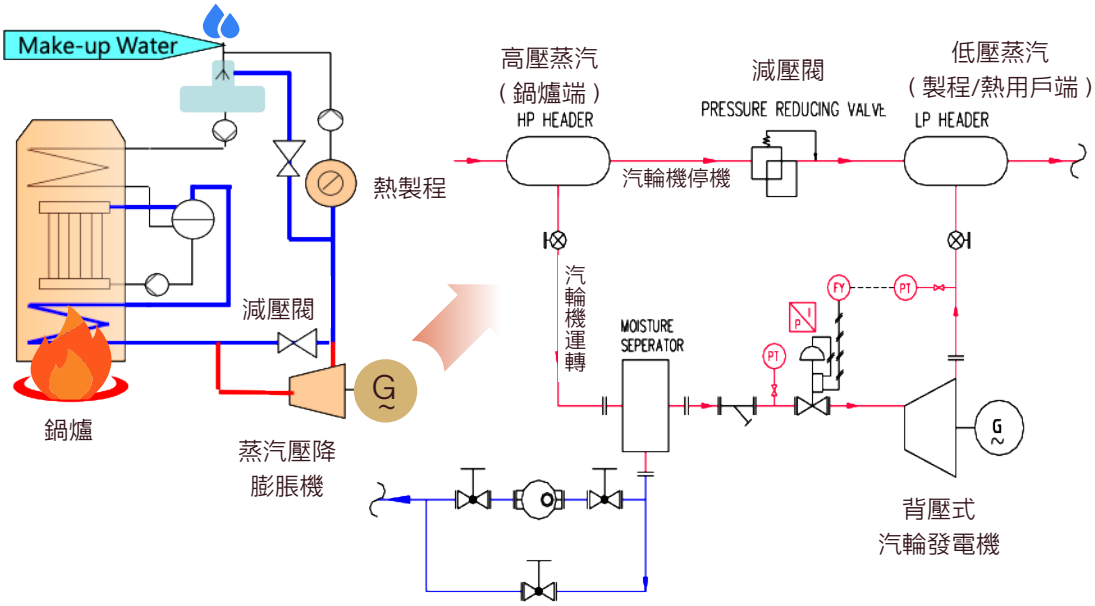
4.3.1技術設備概述

鍋爐產生高壓蒸汽，以符合高溫製程要求；然而，因應低溫熱製程蒸汽需求，一般利用減壓閥 (Pressure Reducing Valve) 降壓，供給低壓蒸汽。此減壓閥降壓動作，伴隨產生噪音、降低蒸汽可用能量，造成能量浪費。為了充分利用高壓蒸汽的可用能量，可設置一台蒸汽壓降發電機組，轉換蒸汽壓降可用能量，利用蒸汽壓降產生電力，提高能源使用效率。

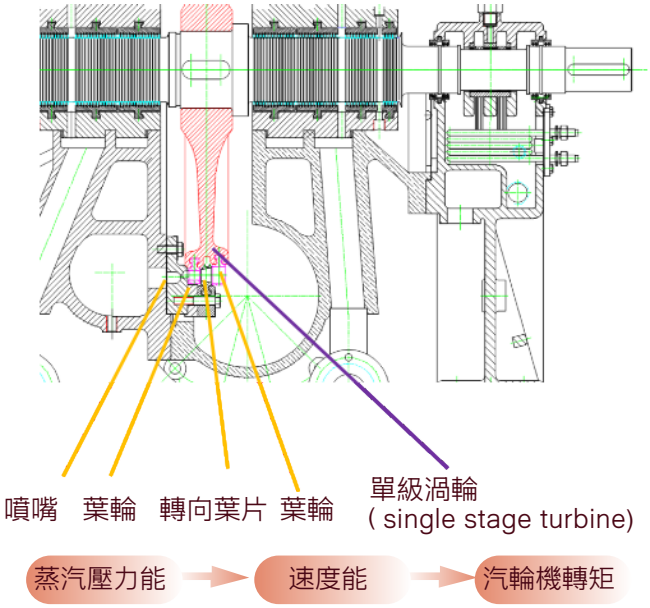
1.技術應用原理

蒸汽壓差發電機主要的部件有蒸汽噴嘴 (Steam nozzle) 或靜子葉片 (Stator blade)、轉子葉片、葉輪、轉軸、潤滑系統、聯軸器、發電機等。高蒸汽進入蒸汽噴嘴後，蒸汽壓力能轉換成速度能，經過噴嘴的高速蒸汽，直接衝擊轉子葉片，帶轉葉輪、轉軸，產生軸功率；汽輪機轉軸經由聯軸器耦合一發電機，轉換軸功率為電功率，輸出電力。

若低壓熱製程端需求的蒸汽壓力低於鍋爐端供應蒸汽壓力，就可裝設蒸汽壓差發電機，系統配置範例如圖 4.3.1-1(a) 所示意，能量轉換機制如圖 4.3.1-1(b) 所示意。蒸汽壓差發電機與原有的減壓閥並聯配置，汽輪機運轉時，高壓蒸汽經由汽輪機降壓後，排入低壓蒸汽管網；汽輪機停機 (維保或故障等) 時，高壓蒸汽直接經由原有的減壓閥降壓後排入低壓管網。裝設蒸汽壓差發電機，不影響原有蒸汽系統運作。



(a) 系統配置範例示意



(b) 能量轉換機制示意

資料來源：漢力能源科技股份有限公司

圖4.3.1-1 蒸汽壓差發電技術系統配置及能量轉換機制示意圖

2.技術特點與優勢

蒸汽壓差發電技術具備下列特點：

(1) 階段式能源利用：轉換高、低壓蒸汽間的壓差能，產生電力，低壓蒸汽再排入低壓管網，供熱製程應用，形成小型汽電共生系統，達到節能及經濟效益；

(2) 精準調控汽輪機排放壓力：以汽輪機排放壓力回授汽輪機入口閥開度，排放壓力調控於設定值的 ±0.1bar 內，大幅提高低壓製程端蒸汽品質，提升低壓熱製程產品品質及良率。

3.應考慮因素與限制

裝設蒸汽壓差發電設備，需要考慮因素包括蒸汽、電力等參數及環境設置等，大致考量如下：

(1) 蒸汽參數：蒸汽流量，入口條件如飽和 / 過熱蒸汽、壓力、溫度，出口條件如壓力需求等，例如蒸汽最小入口流量約為 3 T/h、最小入口壓力約為 0 kg/cm^2(最低溫度 100℃)、最高入口壓力為 60 kg/cm^2、最高出口壓力為 10 kg/cm^2；

(2) 電力條件：為感應發電機或同步發電機，電力是否直接饋接於廠區電網供廠區用電，及現場電壓情形等；

(3) 環境設置：機組位置及空間，環境特性如腐蝕性、鹽害、防爆區等考量。

4.3.2 技術設備實務案例

1.案例廠應用簡介

案例廠為化工產業之丙烯酸脂製造廠商，生產產品包含酯化級丙烯酸、聚合級丙烯酸、丙烯酸丁酯、丙烯酸異辛酯等，應用技術設備為利用蒸汽壓差設備降壓並發電，後端蒸汽則排入低壓管網。

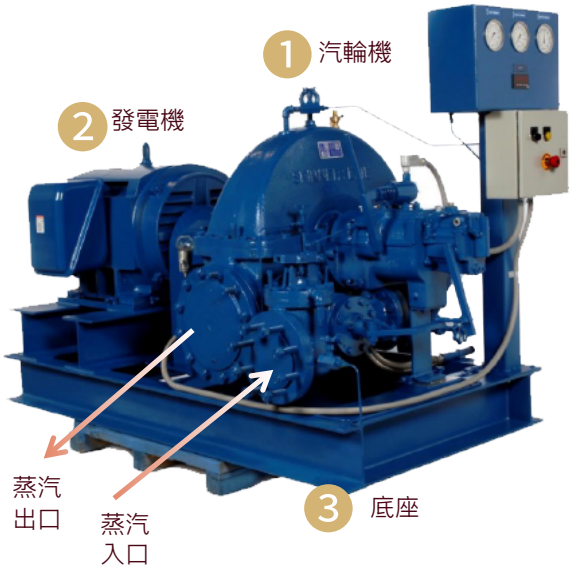
2.改善方案執行過程

(1) 單元改善前情境說明

改善前低壓蒸汽之來源為高壓蒸汽利用減壓閥降壓，此減壓閥降壓動作降低蒸汽可用能量，造成能源浪費。

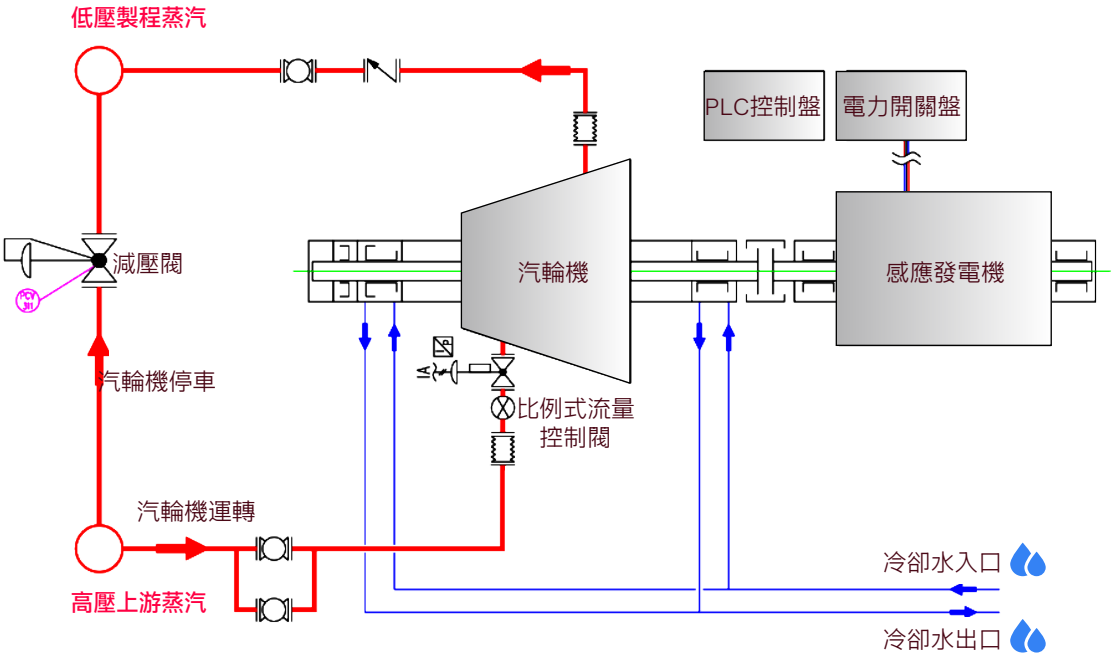
(2) 單元改善後情境說明

應用技術設備為 400 kW 級蒸汽壓降發電設備，利用上游 13 kg/cm^2 飽和蒸汽，經由蒸汽壓差設備降壓至 3.5 kg/cm^2 後，利用降壓輸出電力，降低營運成本並可達到節能效果，其後端低壓蒸汽則排入低壓管網。蒸汽壓差發電機如圖 4.3.2-1 所示意，其蒸汽壓差發電系統儀表管線布置圖如圖 4.3.2-2 所示意。



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.3.2-1 案例廠蒸汽壓差發電機示意圖



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.3.2-2 案例廠蒸汽壓差發電系統管線布置示意圖

3.成效分析與節能減碳效益

(1) 應用蒸汽壓差發電技術之節能量

本案例機組發電量為 400 kW，預估全年發電量約為 3,200,000 kWh。

(2) 投資效益

案例廠蒸汽壓差發電技術之執行

投資金額	約3,000萬元。 (主體設備約1,400萬元，其他土木工程、管材閥件、電力供應系統、安裝工程等約1,600萬元)
節能量	發電量約3,200,000 kWh/年。 (以年運轉時數8,000小時/年計算)
節能績效	約704萬元/年。 (以電力單價2.2元/kWh計算)
減碳量	1,606公噸CO_2e/年。 (以經濟部能源局公告109年電力排放係數0.502 kg-CO_2e/ kWh計算)
回收年限	約4.26年。

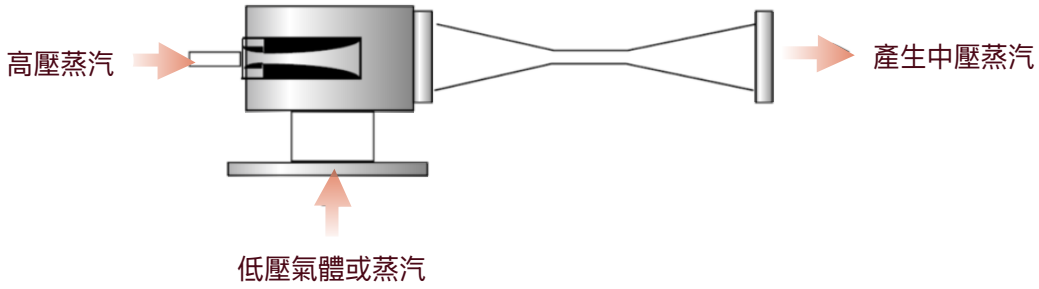
4.4 低壓蒸汽回收/壓力提升技術

4.4.1技術設備概述

低壓蒸汽回收 / 蒸汽壓力提升技術主要應用產業相當廣泛，舉凡有使用蒸汽之行業及工廠皆可應用，可將無法直接利用的低壓蒸汽提高壓力後，提供給製程做使用，使能源更有效益的利用。

1.技術應用原理

熱壓縮機 (Thermal Vapor Recompression, TVR) 或稱蒸汽噴射器 (Steam Ejector) 係利用高壓的蒸汽通過內部噴嘴 (Motive nozzle) 把壓力能轉成速度能；在噴出噴嘴後達到比音速還快的超音速速度往前行進，順勢把低壓側的氣體或蒸汽帶入熱壓縮機內混合，後段則利用文氏管 (Venturi) 原理再混合排出熱壓縮機之外，可將低壓蒸汽提高壓力後再回製程使用。熱壓縮機剖面如圖 4.4.1.-1 所示意。



資料來源：毅懋企業有限公司

圖4.4.1-1 熱壓縮機剖面示意圖

2.技術特點與優勢

以熱壓縮機應用於低壓蒸汽回收有以下特點：

(1) 可將低壓蒸汽提高壓力後重新回製程再利用，減少能源的浪費；

(2) 熱壓縮機可直接安裝在管線中間，無安裝角度限制；

(3) 設備沒有電力需求，不用考量防爆問題；

(4) 無轉動部件，幾乎不需要維修。

3.應考慮因素與限制

本設備規劃設計應考慮因素包括：

(1) 需要相對高壓蒸汽進行熱壓機驅動，應評估整體蒸汽需求；

(2) 出口壓力 / 進口壓力的比值最好在 2.0 之內，較有經濟優勢；

(3) 應進行管線保溫。

4.4.2 技術設備實務案例

1.案例廠應用簡介

案例廠為化學原料製造廠，經評估將壓力約 3.0~3.8 kg/cm^2 之低壓蒸汽進行回收應用，因待回收的低壓蒸汽會因製程關係有所浮動，故本案例選用具備控制閥的熱壓縮機，將蒸汽加壓至約 5.2 kg/cm^2 左右回廠內加熱盤管使用。

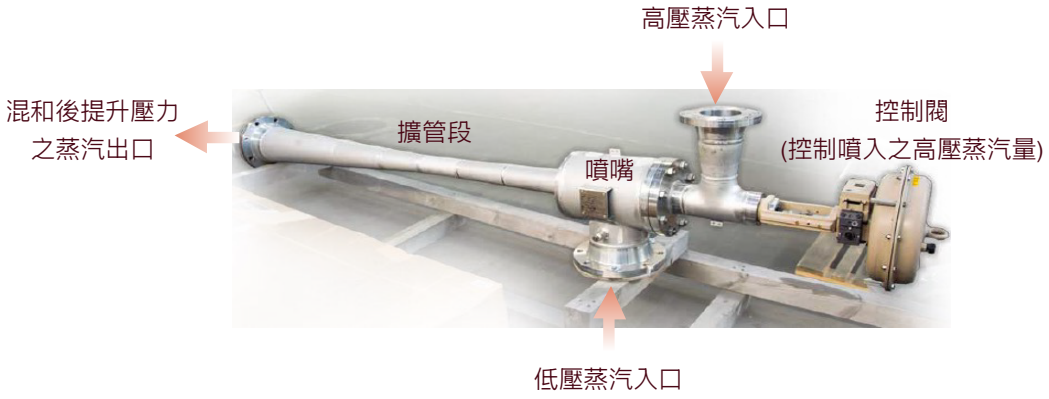
2.改善方案執行過程

(1) 單元改善前情境說明

壓力約 3.0~3.8 kg/cm^2 之低壓蒸汽無進行回收，能源無妥善利用。

(2) 單元改善後情境說明

以具備控制閥的熱壓縮機進行低壓蒸汽回收，實際上熱壓縮機可利用 8,839 kg/hr、壓力 19 kg/cm^2 之高壓蒸汽，來回收 5,161 kg/hr、壓力 3.0 kg/cm^2 之低壓蒸汽，加壓至約 5.2 kg/cm^2 左右；若低壓側的壓力較高到達 3.8 kg/cm^2，則僅需使用 6,138 kg/hr 的高壓蒸汽就可以回收 7,619 kg/hr 的低壓蒸汽，出口壓力亦設定為 5.2 kg/cm^2。產生之中壓蒸汽再回廠內加熱盤管使用，改善之熱壓縮機設備如圖 4.4.2-4 所示意，低壓蒸汽回收情形如表 4.4.2-1 所示。



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.4.2-1 案例廠改善之熱壓縮機示意圖

表4.4.2-1 案例廠增壓蒸汽回收情形

中壓蒸汽		回收之低壓蒸汽		產生之低壓蒸汽	
壓力 (kg/cm²)	流量 (kg/hr)	壓力 (kg/cm²)	流量 (kg/hr)	壓力 (kg/cm²)	流量 (kg/hr)
19	8,839	3.0	5,161	5.2	約14,000
	6,138	3.8	7,619		

3.成效分析與節能減碳效益

(1) 應用低壓蒸汽回收 / 壓力提升技術之節能量

以使用 8,839 kg/hr 壓力 19 kg/ cm^2 之蒸汽回收 5,161 kg/hr 的低壓 3.0 kg/cm^2 蒸汽，產出約 14,000 kg/hr 的低壓 5.2 kg/cm^2 蒸汽計算，年操作時數 8,000 小時，共可回收 3.0 kg/cm^2 低壓蒸汽 41,288 公噸 / 年。其節能效益計算如下：

回收 3.0 kg/cm^2 蒸汽 5,161 kg/hr × 8,000 小時 / 年 = 41,288 公噸 / 年

中壓蒸汽 19 kg/cm^2：8,839 kg/hr × 639 元 / 公噸 = 5,648 元 / 小時

低壓蒸汽 5.2 kg/cm^2：14,000 kg/hr × 629 元 / 公噸 = 8,806 元 / 小時

(8,806 元 / 小時 - 5,648 元 / 小時) × 8,000 小時 / 年 = 2,526 萬元 / 年

(2) 投資效益

案例廠低壓蒸汽回收 / 壓力提升技術之執行

投資金額	約182萬元。 (6吋帶有控制閥的熱壓縮機約82萬元、相關配管費用約100萬元，未含蒸汽系統配置費用)
節能量	回收3.0 kg/cm^{2}低壓蒸汽41,288公噸/年。 (以年運轉時數8,000小時/年計算)
節能績效	約2,526萬元/年。 (以19kg/cm^{2}蒸汽單價639元/公噸及5kg/cm^{2}蒸汽單價629元/公噸計算)
減碳量	1,206公噸CO_2e/年。 (以燃料為煤之蒸汽排放係數0.292公噸CO_2e/公噸計算)
回收年限	約0.072年。

4.5 吸收式冷凍機技術

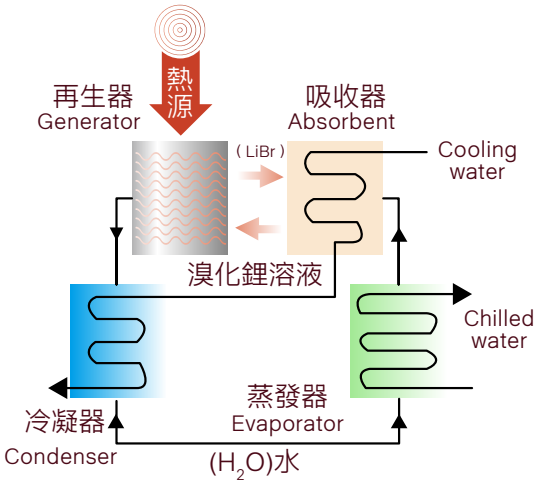
4.5.1技術設備概述

吸收式冷凍機主要靠熱能驅動，因此特別適用於廠內有剩餘熱源的製程，用來替代傳統壓縮式 (如螺旋式或離心式) 冷凍機，以大幅降低用電量，廣泛應用於餘熱回收 / 冷凍空調冷卻系統，是有效節能應用的技術之一。

鑒於國內大型工業廠房無論是設有電廠或因製程放熱反應有多餘熱，若有機會轉換成吸收式冷凍機的驅動熱源來節能減碳，除了省電又可削減尖峰負載的契約容量；且這些節省的電費優勢都能在新設備初期的投資階段快速回收成本。

1.技術應用原理

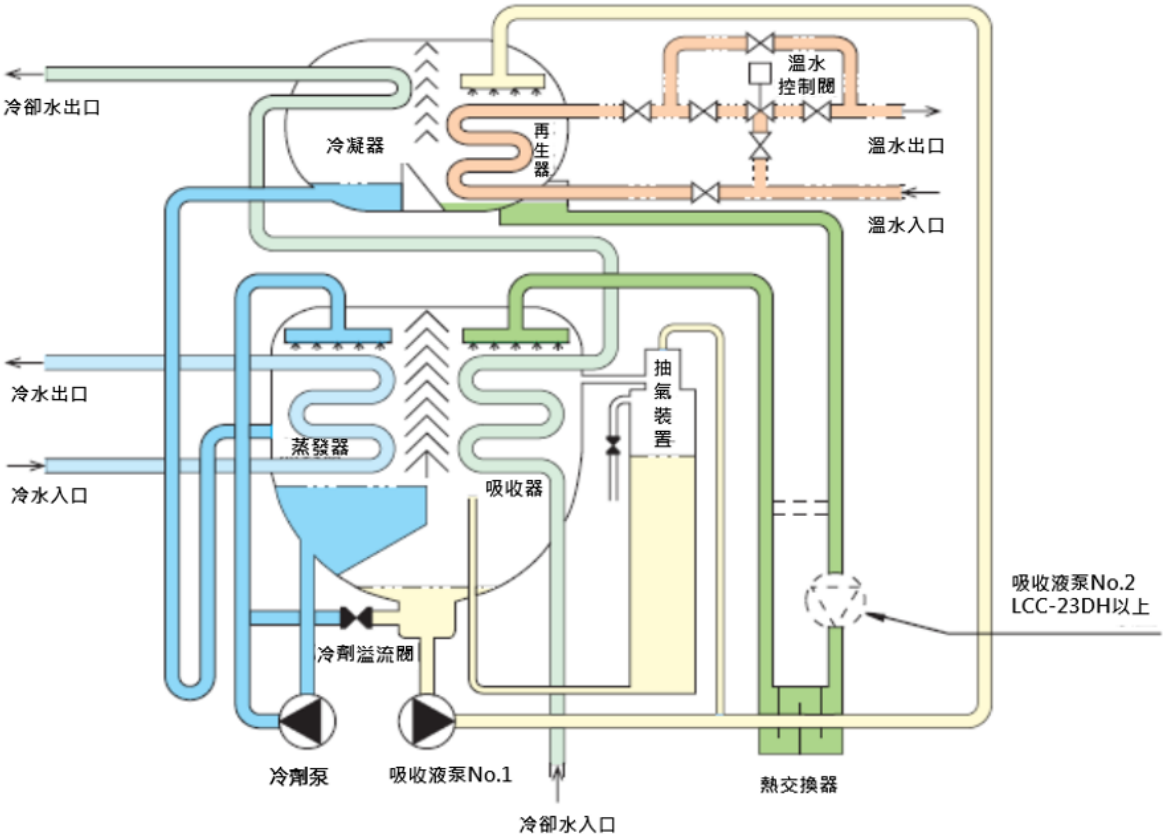
與傳統電力式冷凍機比較，最主要的差異是吸收式冷凍機僅藉由再生器 - 吸收器的組合來取代高馬力的壓縮機，其主要靠熱能驅動，而熱來源可能是瓦斯直燃、鍋爐蒸汽或熱水，故需增設熱源供應管路；主機內除冷媒外另需填充溴化鋰溶液，相關流體示意圖如 4.5.1-1 所示意。



資料來源：恒偉科技股份有限公司

圖4.5.1-1 吸收式冷凍機熱能驅動示意圖

吸收式冷凍機利用機台內部所填充的溴化鋰溶液 (吸收劑) 與水 (冷媒) 產生的物理變化來低溫製冷，此循環利用外來熱源為動力製造冷凍水，圖 4.5.1-2 為吸收式冷凍機循環圖，設備元件主要由冷凝器、蒸發器、再生器、吸收器、換熱器、循環泵等組成。



資料來源：恒偉科技股份有限公司

圖4.5.1-2 吸收式冷凍機循環圖

2.技術特點與優勢

以吸收式冷凍機有效的利用製程餘熱資源並做製程冷卻，除可以降低生產成本，提高企業競爭力，又可減少餘熱的排放。吸收式冷凍機技術主要特點如下：

(1) 以熱能為動力，無需耗用大量電能，能利用低階熱能或餘熱，如蒸汽或熱水；

(2) 除小功率耗電的液泵和真空泵，沒有其他轉動部件，且振動小、噪聲低；

(3) 以水當作相變化傳熱的冷媒在真空環境運轉，無臭、無毒、無爆炸危險，符合環保且安全性高；

(4) 製造簡單，操作、維修保養方便，機組幾乎為熱交換器組成，持續保持主機內真空監控並避免溴化鋰溶液造成內部腐蝕，操作保養相對傳統電力式機型簡單。

3.應考慮因素與限制

本技術規劃設計應考慮因素包括：

(1) 餘熱（熱水或蒸汽）之形式及條件，如能源能階是否穩定足夠、連續供應，冷卻水塔負載量是否足夠；

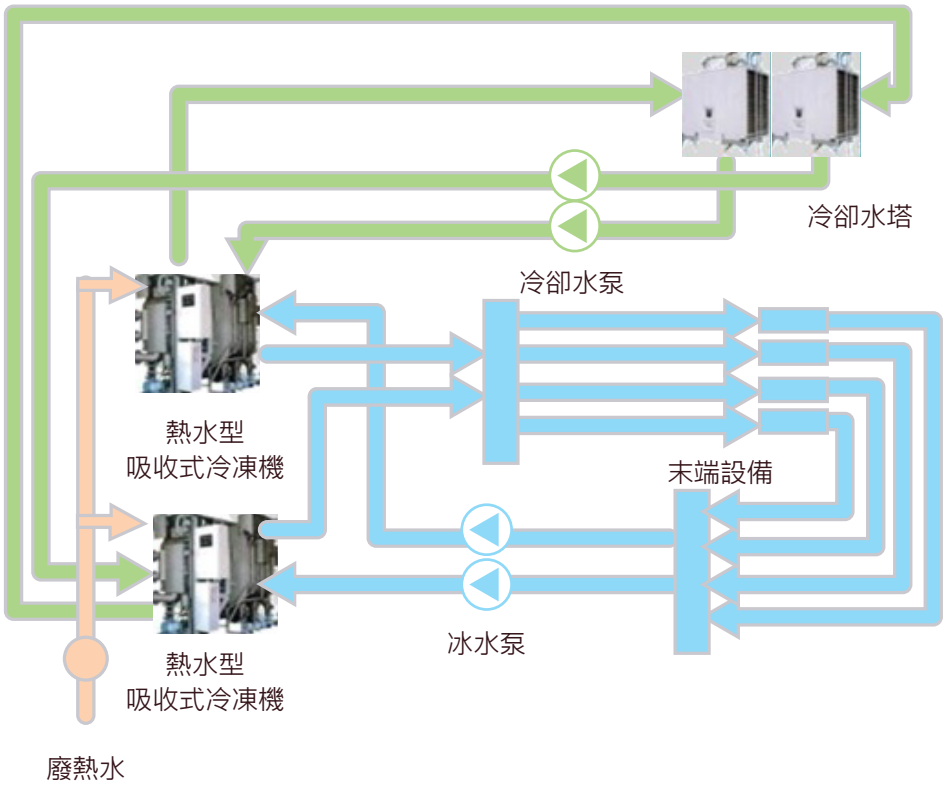
(2) 製程所需冷凍水需求，其溫度是否低於機台最低供水溫度；

(3) 設備相關位置、安裝空間、搬運動線，環境因素包含溫度、腐蝕性物質等。

4.5.2 技術設備實務案例

1.案例廠應用簡介

案例廠為化工集團之銅箔製造廠，產品用於 5G、物聯網 (Internet of Things, IoT)、車用電子及電動車產業的關鍵材料，此次利用既有發電廠所產生的餘熱 – 餘熱水之熱源，引入總冷凍噸為 900 RT 的熱水型吸收式冷凍機提供製程生產所需冰水。除可節電、減少蒸汽冷凝過程產生大量的工業剩餘熱，還可降低冷卻水的蒸發及飛散損失，達到節約用水的功效，其系統如圖 4.5.2-1 所示意。



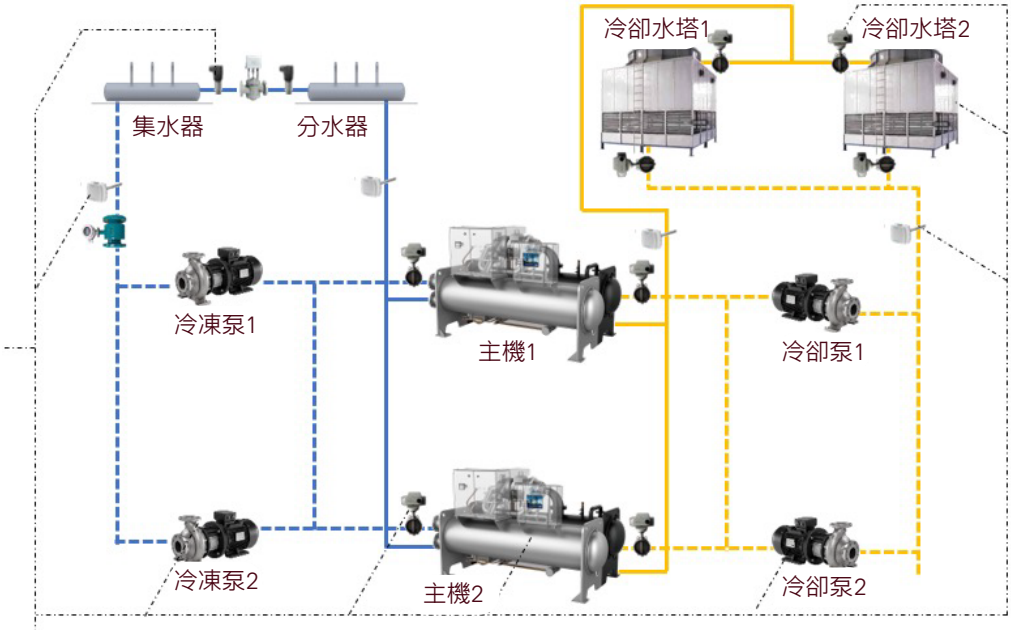
資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.5.2-1 案例廠吸收式冷凍機系統示意圖

2.改善方案執行過程

(1) 單元改善前情境說明

案例廠原使用傳統離心式冷凍機，改善前流程如圖 4.5.2-2 所示意，共 900 RT 冷凍噸的供冷需求。

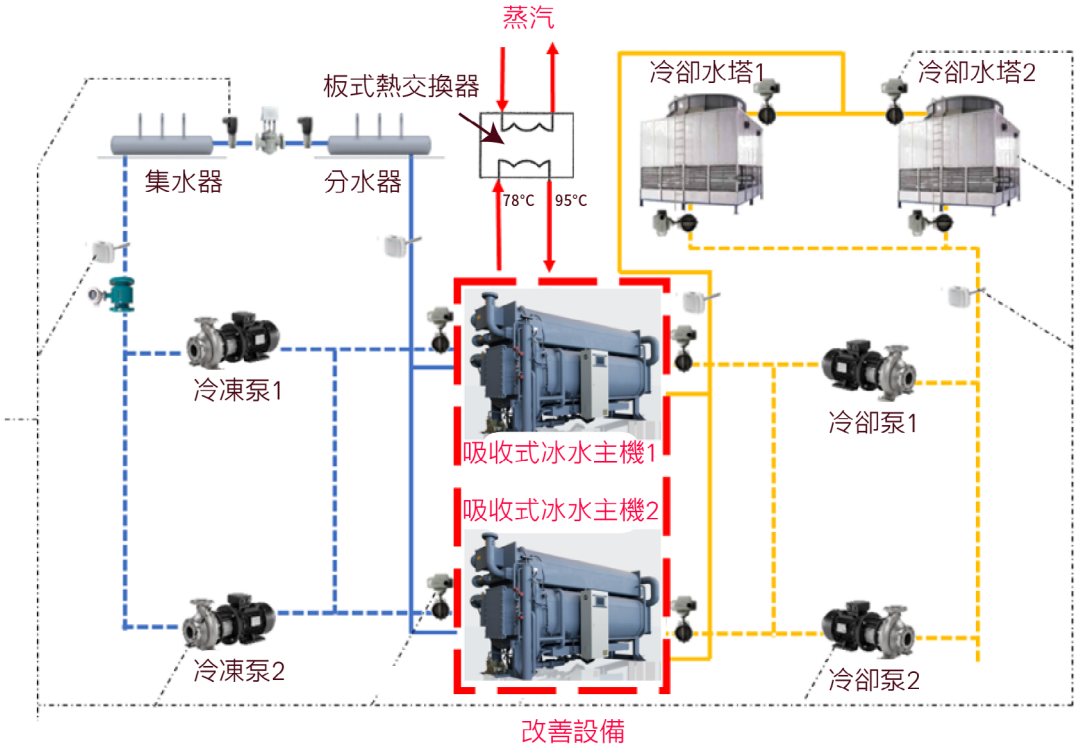


資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.5.2-2 案例廠改善前流程示意圖

(2) 單元改善後情境說明

原有的冰水及冷卻水管路一般都可沿用，但因冷卻水需求量增加，需重新評估冷卻水量是否足夠；另增加熱水循環管路，包括源頭加熱源－廢蒸汽循環管、熱交換器及熱水循環管路，以得到較穩定的熱源供應。經規劃汰換為熱水型吸收式冷凍機，改善後流程如圖 4.5.2-3 所示意。



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.5.2-3 案例廠改善後流程示意圖

3.成效分析與節能減碳效益

(1) 應用吸收式冷凍機技術之節能量

新設吸收式冷凍機實際耗電量僅 30 kW，較傳統離心機耗電量 630 kW 減少了 600 kW。

(2) 投資效益

案例廠吸收式冷凍機技術之執行

投資金額	約1,800萬元。 (主體設備約1,200萬元，其他土木工程、管材閥件、電力供應系統、安裝工程等約600萬元)
節能量	約4,800,000 kWh/年。 (以年運轉時數8,000小時/年計算)
節能績效	約960萬元/年。 (以電力單價2元/kWh計算)
減碳量	2,410公噸CO_2e/年。 (以經濟部能源局公告109年電力排放係數0.502 kg-CO_2e/ kWh計算)
回收年限	約1.9年。

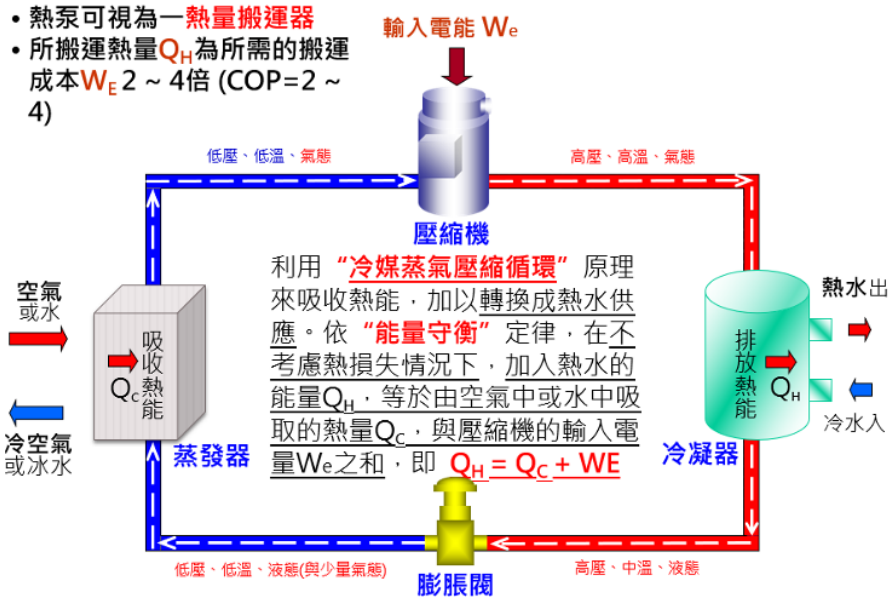
4.6 熱泵熱回收技術

4.6.1技術設備概述

熱泵熱回收技術利用大氣熱能或回收製程系統餘熱加以利用，取代傳統的電、瓦斯、柴油等燃料加熱，建立及統合熱回收系統，安全性較高且有效提升能源使用效率，並減少原有加熱系統之能源使用，達到減碳之目的。

1.技術應用原理

熱泵可吸收大自然中的熱能或製程、空調系統之餘熱進行熱交換使其成為所需的中、高溫熱水，依熱源之型態，可分成空氣源、水源、地熱源及太陽輻射源等四種。熱泵利用冷媒壓縮循環原理，自常溫的空氣或是低溫的水源中，回收其中熱能並予以利用，可達到節能、節費的效果，更沒有影響環境的顧慮。主要元件包含壓縮機、冷凝器、膨脹閥、蒸發器等，熱泵之運轉原理如圖 4.6.1-1 所示意，其型式依據需求溫度不同，特點如表 4.6.1-1 所示。



資料來源：承研能源科技股份有限公司

圖4.6.1-1 熱泵熱回收技術運轉原理示意圖

表4.6.1-1 不同形式之熱泵特點

熱泵型式	中溫熱泵	高溫熱泵	
		高溫熱泵	CO_2 熱泵
冷媒種類	R134a, R407	R134a, R407C, R410a	R744 (CO_2)
最大製熱量	約1,100 kW (300 RT)	約350 kW (100 RT)	約100 kW (30 RT)
最高出水溫度	約55℃	約80℃	約90℃
平均製熱COP	約3.6	約3.4 (高溫段約2.4)	約3.8 (高溫段約2.5)
全球暖化潛勢GWP	1,300~1,700	1,300~1,700	1
價格	最便宜	較便宜	較昂貴
加熱方式	循環式	直熱式 循環式(溫差限制)	直熱式 循環式(溫差限制)
用途	生活用熱水 (如醫院、飯店、宿舍等，取代溫水鍋爐)	高溫熱水工業使用 (如鍋爐預熱、MAU熱水、Hot DI、部分協助鍋爐加熱)	

資料來源： 承研能源科技股份有限公司

2.技術特點與優勢

熱泵熱回收技術具備下列特點：

(1) 一般加熱設備如柴油鍋爐、天然氣鍋爐或電熱鍋爐，其加熱系統的性能係數 COP(Coefficientof Performance) 約在 0.80~0.95，而熱泵效率值 COP 可達 3 以上，大幅降低加熱設備能源使用，同時可提供冷能降低冰水主機負載；

(2) 熱泵安全性高，且主機不採燃燒製熱，無空氣污染之虞，其加熱系統吸取大自然中熱能或回收製程系統餘熱，可節能並減少碳排。

3.應考慮因素與限制

熱泵熱回收技術具備下列特點：

(1) 系統選擇：熱泵系統或熱泵與其他加熱系統合併使用；

(2) 取熱來源:為空氣源或水源，可否擷取現有之餘熱能，其熱能條件是否持續穩定;

(3) 排冷利用：可利用於機房、冷凍空調之吸風端或其他需要改善溫度之處；

(4) 熱水需求量：以冬季需求量較多為基準，選用適當機型及數量；

(5) 設置地點：取熱及排冷是否適合、保溫桶之噸數是否影響建築結構、壓差情形、施工安全性、有否障礙等；

(6) 水質：與鍋爐考量相同，需要水質處理以提升熱交換器效率，減少維護頻率與成本，不良的水質容易產生水垢，會影響系統製熱效能；

(7) 運轉時段之設定：熱泵可依對象之需要時段而設定運轉時間，因此瞭解其使用情形，可使系統運轉儘量於離峰時段；

(8) 空氣熱源於 10℃ (冬季) 以下運轉時，須有除霜功能。

4.6.2技術設備實務案例

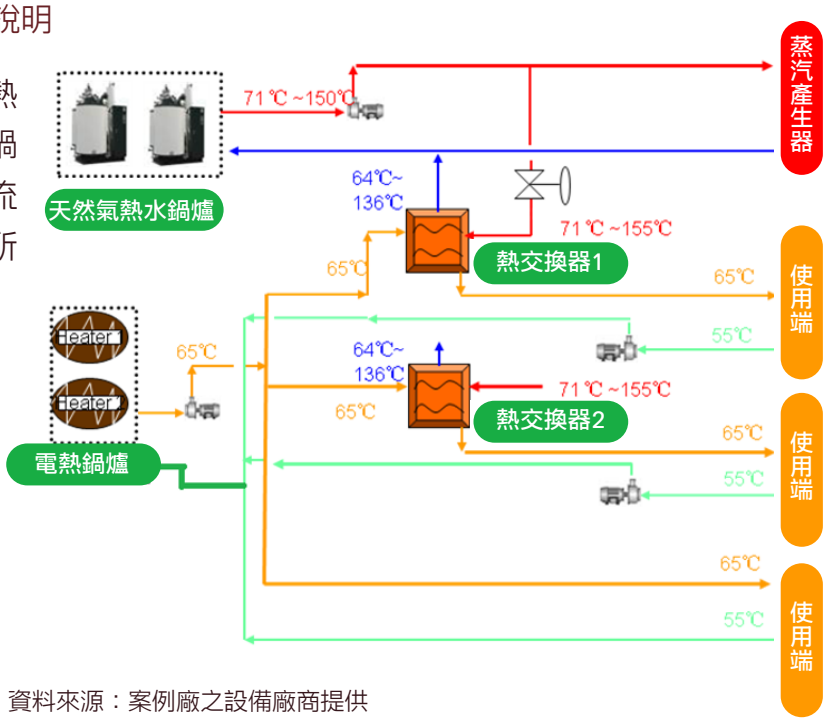
1.案例廠應用簡介

案例廠為台灣專業積體電路晶圓代工廠，本次藉由導入水對水高溫熱泵主機，將過去原有採用電熱鍋爐之外氣空調箱 (Smart Make-up Air Unit, MAU) 二次熱水所需，改由熱泵主機供應支援。利用熱泵的特性，從空調冰水回水管路汲取熱源，經由熱泵可將回收熱源再利用加熱 MAU 二次熱水所需，被取熱後的空調冰水回水其溫度下降後回到冰水主機，可減少冰水主機負載及耗電。本案例應用熱泵能有效降低 MAU 二次熱水加熱能耗，並在供應熱能同時提供冷能降低空調系統冰水負荷。

2.改善方案執行過程

(1) 單元改善前情境說明

MAU 二次熱水原採用電熱鍋爐加熱，改善前流程如圖 4.6.2-1 所示意。

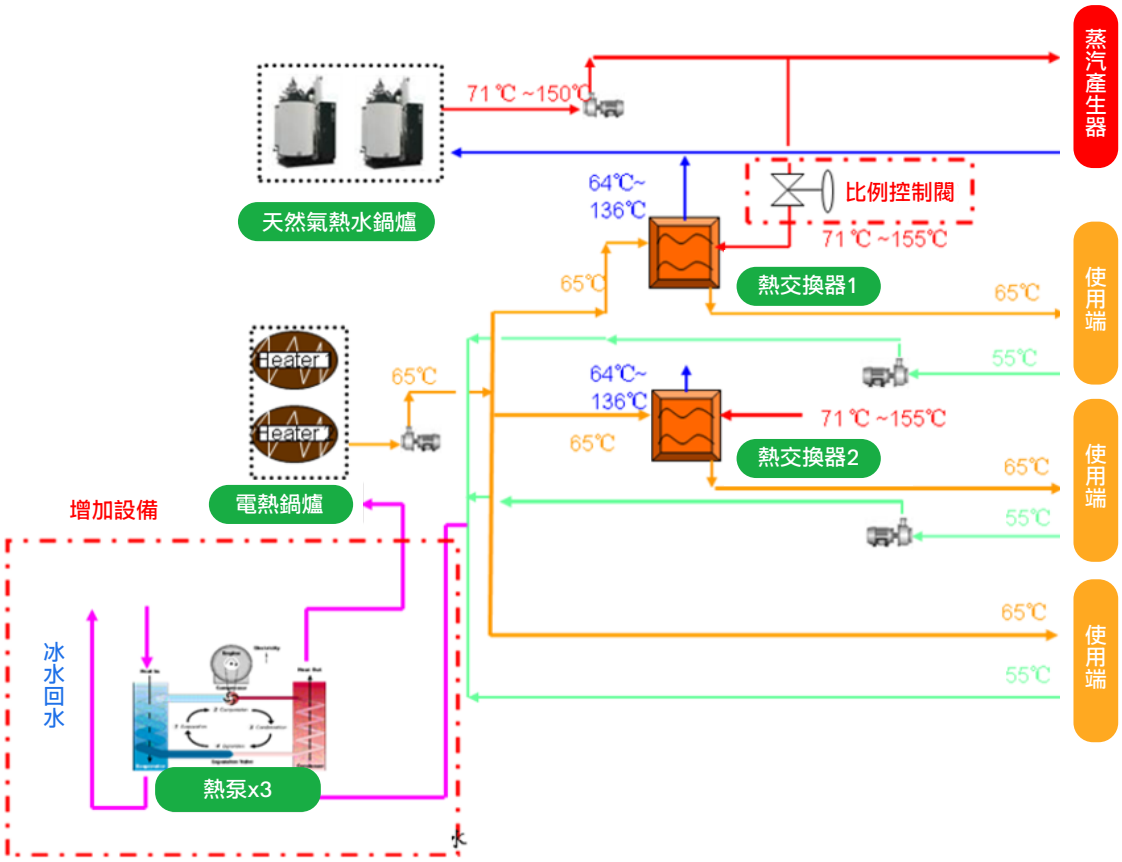


資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.6.2-1 案例廠改善前流程示意圖

(2) 單元改善後情境說明

經規劃導入熱泵系統後，設置 3 台熱泵依溫度需求啟停控制，作為原電熱加熱系統供應熱值之部份輔助；熱泵主機運轉時產生之冷能用以削減冰水主機空調負荷，改善後流程如圖 4.6.2-2 所示意，改善後之照片如圖 4.6.2-3 所示。



資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.6.2-2 案例廠改善後流程示意圖

資料來源：案例廠之設備廠商提供

圖4.6.2-3 案例廠熱泵熱回收應用圖

3.成效分析與節能減碳效益

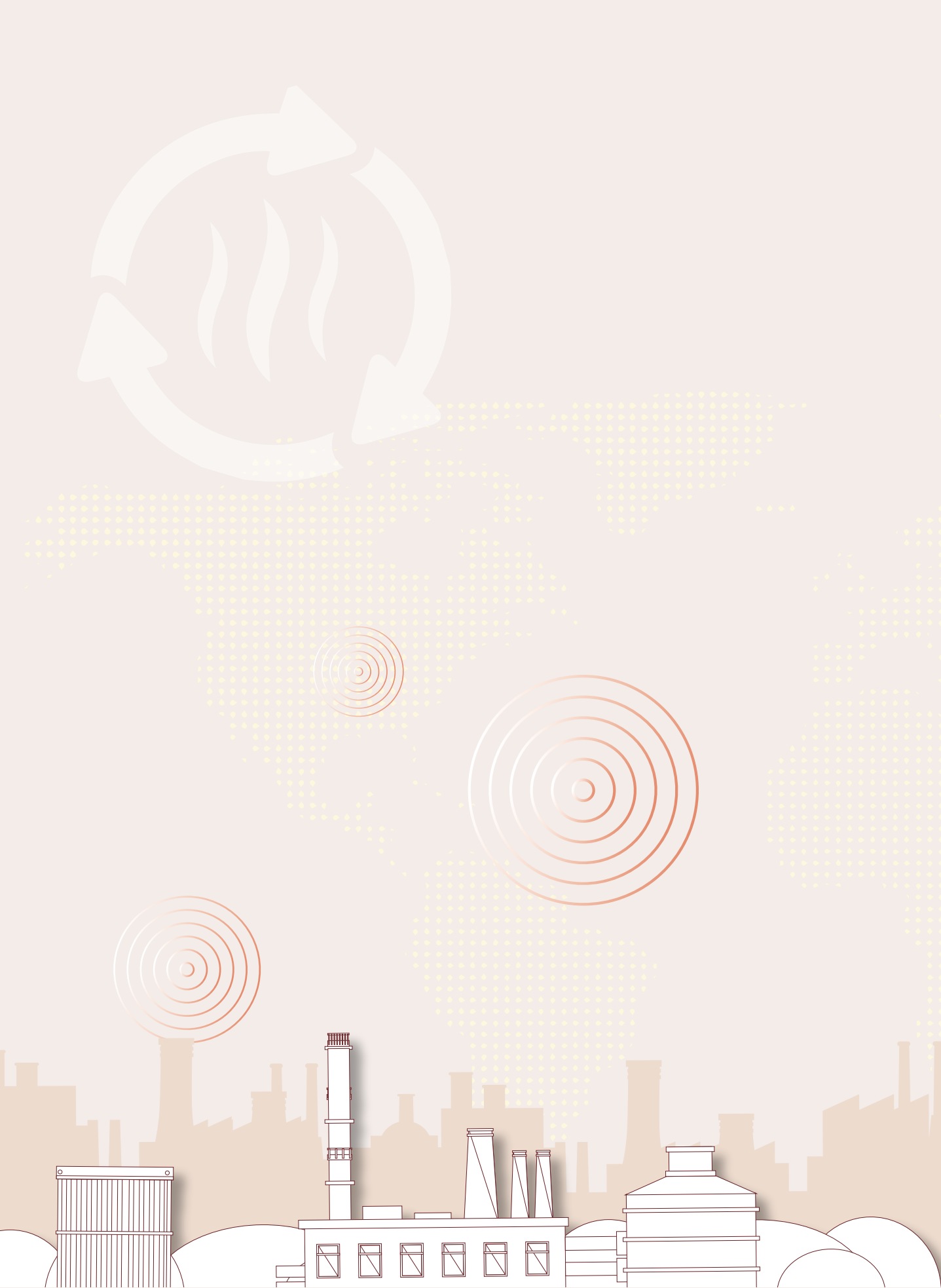
(1) 應用熱泵熱回收技術之節能量

改善後節省原電熱鍋爐耗能之節能量約 790,000 kWh/ 年，本案節能量未計算提供冷能減少冰水主機空調負荷之部分。

(2) 投資效益

案例廠熱泵熱回收技術之執行

投資金額	約300萬元。 (主體設備約180萬元，其他土木工程、管材閥件、電力供應系統、安裝工程等約120萬元)
節能量	約790,000 kWh/年。 (以年運轉8,760時數小時/年計算，未計算提供冷能之節能部分)
節能績效	約197.5萬元/年。 (以電力單價2.5元/kWh計算)
減碳量	397公噸CO_2e/年。 (以經濟部能源局公告109年電力排放係數0.502 kg-CO_2e/ kWh計算)
回收年限	約1.5年。



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

技術應用篇

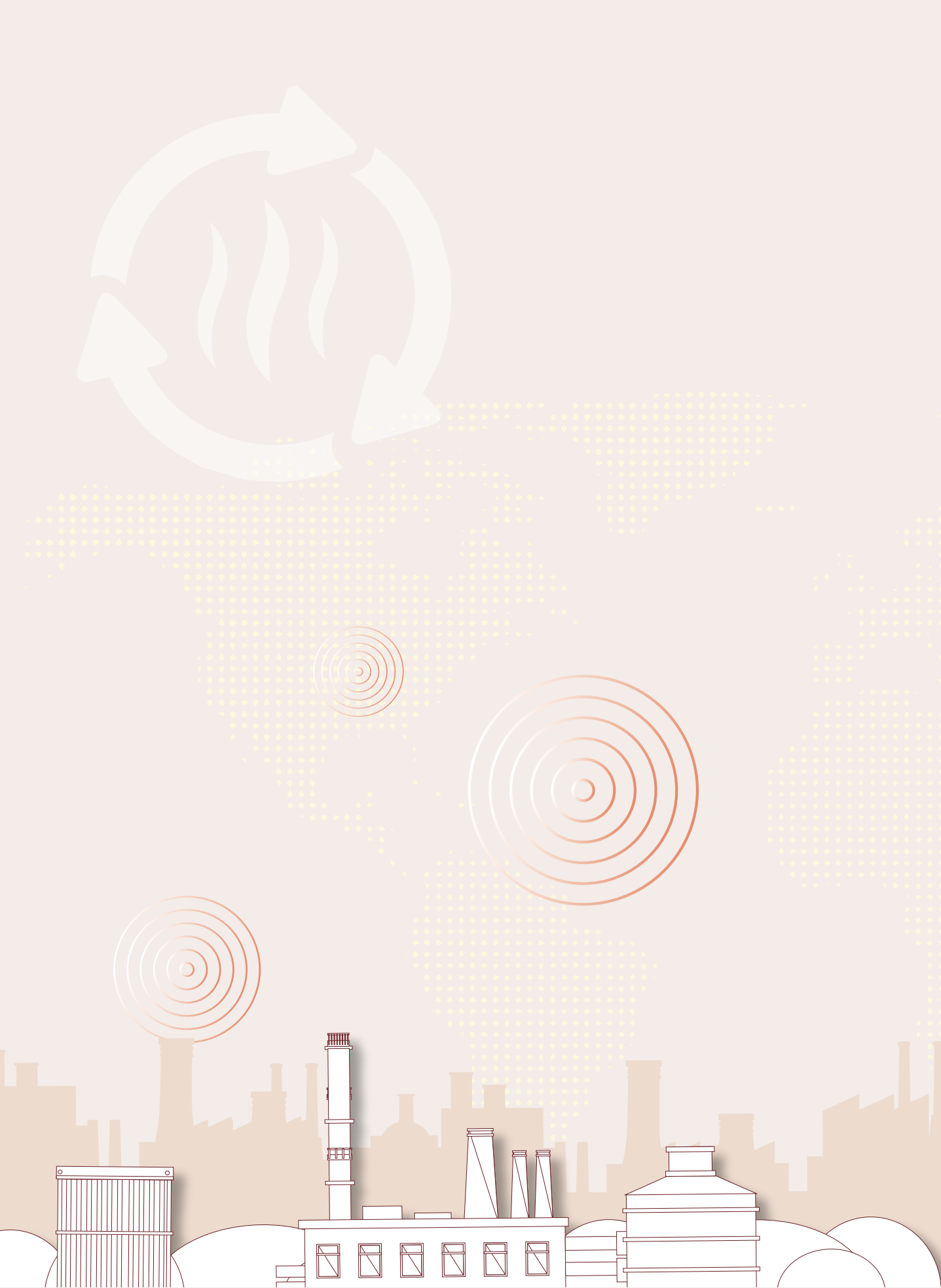
五、結語

五、結語

本彙編收錄之技術及案例應用於製程餘熱回收，可依據各廠製程餘熱來源條件及後端應用需求評估最適技術應用；惟參採時仍須考量個案適用性，應依廠內整體系統現有設備運轉情形及製程需求等條件，進行經濟層面、技術層面、工程層面及現場操作條件上之改善規劃與效益評估，達到節能目的。

製程餘熱回收可應用之節能方式相當廣泛，本彙編收錄較完整之節能應用案例分析及說明，期對於相關產業或技術領域之從業人員有參考與應用之價值，並有助於國內推動節能減碳之工作。

在碳有價化及外部成本內部化的國內外趨勢下，未來企業在面對減碳措施之投資規劃時，應將碳排放相關費用 (如碳邊境稅、碳費等) 納入回收年限等效益評估中才能反映其價值，在碳有價化的時代，企業進行低碳甚至零碳之轉型才能實現永續營運目標。



低碳生產技術彙編

製程餘熱回收

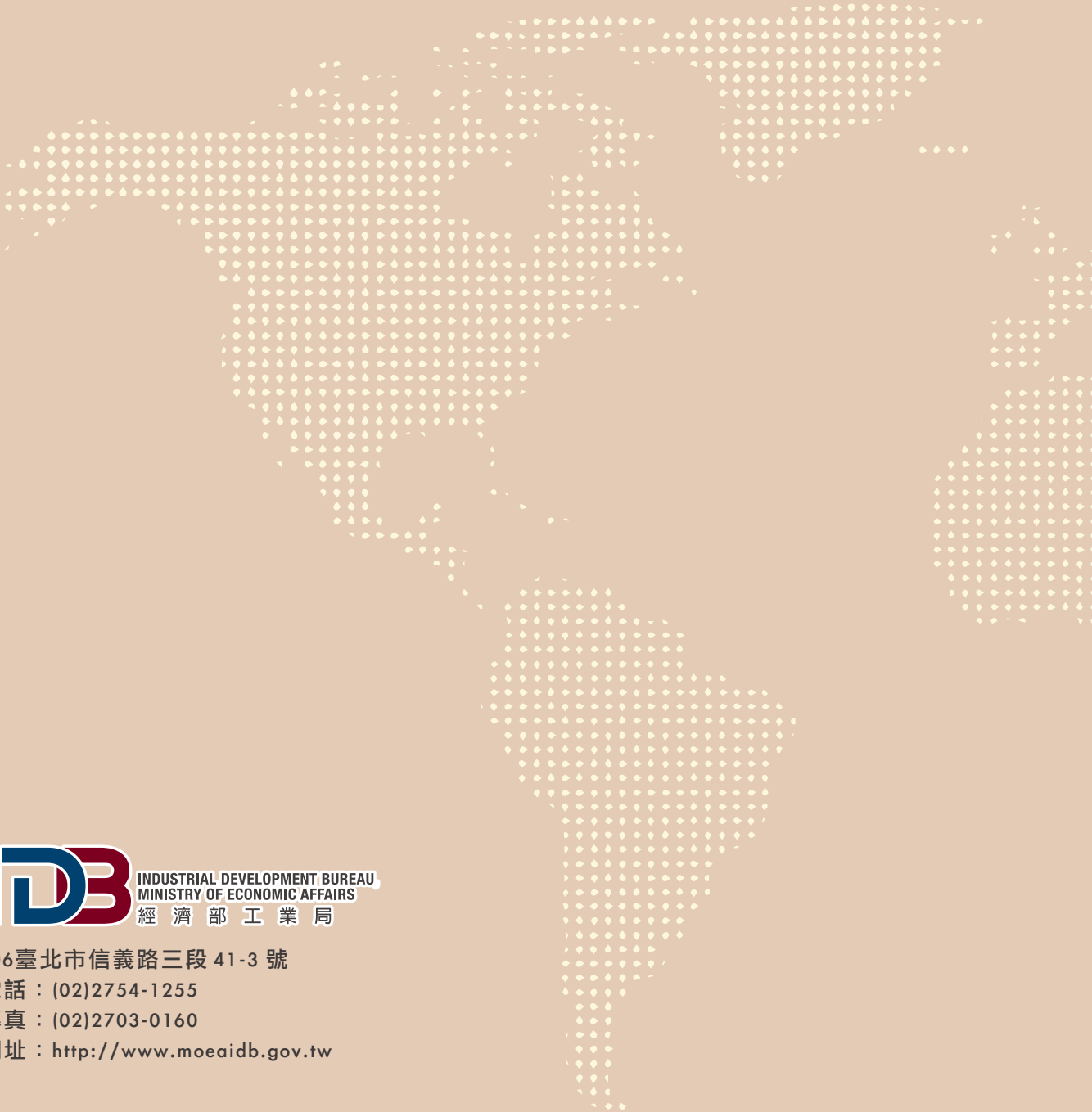
技術應用篇

參考文獻

參考文獻

1. 行政院，國家自定預期貢獻 (Intended Nationally Determined Contribution, INDC)，2015 年。
2. 行政院環保署，2020 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告，2020 年。
3. 經濟部能源局，中華民國 109 年能源統計手冊，2021 年。
4. 工業技術研究院，經濟部節能減碳推動小組會議「全國廢熱、冷之調查成果報告」簡報資料，2015 年。
5. 經濟部能源局，能源平衡表，2021 年。
6. IEA, Net Zero by 2050- A Roadmap for the Global Energy Sector, July 2021.
7. 王啟川，熱交換設計，五南出版社，2007。
8. David Southall et al., Design Considerations for Compact Heat Exchangers, 2008.
9. McDonald, C.F., The Role of the Ceramic Heat Exchanger in Energy and Resource Conservation, Trans. ASME J. Eng. Power, Vol. 102, pp. 303-315, 1980.

NOTE



INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU
MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS
經 濟 部 工 業 局

106臺北市信義路三段 41-3 號
電話：(02)2754-1255
傳真：(02)2703-0160
網址：http://www.moeaidb.gov.tw