



# 廢餘熱回收應用與發電

計畫研究人員 / 作者： 簡國祥、蔡禮豐、李宜宸、陳奕瑞、林浩東



# 目錄

1. 前言 .....	6
2. 熱傳形式.....	8
2.1. 熱輻射 .....	9
2.2. 熱對流 .....	12
3. 餘廢熱之應用.....	14
3.1 高溫物體熱輻射 – 預熱水 .....	14
3.2 煙道氣 – 預熱水 .....	16
3.3 煙道氣 – 廢熱鍋爐 .....	18
3.4 廢熱回收 – 製冷 .....	18
3.5 蒸氣 – 蒸氣再壓縮系統 .....	21
3.6 廢熱 – 熱泵蒸汽鍋爐.....	22
3.7 廢熱發電.....	23
4. 餘廢熱回收發電應用案例 .....	27
4.1 ORC 發電系統 .....	28
4.2 熱電發電系統.....	32
5. 新熱工系統之研發 .....	36
6. 結論與建議 .....	40
7. 參考文獻.....	43



## 圖目錄

圖 1、各式製程溫度範圍與所衍生之廢熱來源.....	7
圖 2、熱傳的三種機制.....	9
圖 3、高溫之鋼胚.....	10
圖 4、燒結爐燃燒塔.....	10
圖 5、熱源面積單元與熱回收器距離及尺寸改變之視因子.....	11
圖 6、飽和液態水與飽和蒸汽在不同壓力下之焓值變化.....	13
圖 7、管道的熱對流熱交換.....	13
圖 8、熱管熱交換器用於回收輻射熱.....	15
圖 9、煙道氣熱回收 – 預熱鍋爐飼水.....	17
圖 10、煙道氣熱回收 – 廢熱鍋爐.....	18
圖 11、廢熱 – 吸收式製冷.....	19
圖 12、蒸氣再壓縮系統於多效蒸發系統之應用.....	22
圖 13、熱泵蒸汽鍋爐.....	23
圖 14、傳統朗肯循環系統.....	24
圖 15、濕、乾與等熵流體在降壓降溫後的差異.....	26
圖 16、不同熱源溫度範圍所適合之流體.....	26
圖 17、熱電發電模組的架構示意圖.....	27
圖 18、熱電元件冷熱端溫差與輸出功率之關係.....	27
圖 19、鋼鐵廠加熱爐煙道氣廢熱回收預熱空氣與 ORC 發電.....	29
圖 20、石化業製程冷凝水廢熱回收發電.....	30
圖 21、造紙業熱水廢熱回收發電.....	31
圖 22、廢棄物處理業多餘蒸汽之廢熱發電.....	31
圖 23、熱電發電系統示意圖.....	32
圖 24、熱輻射取熱裝置示意圖.....	33
圖 25、鋼鐵熱輻射廢熱回收熱電發電系統.....	33



圖 26、柴油引擎廢熱發電系統-中低溫熱電模組 .....	34
圖 27、柴油引擎廢熱發電系統.....	34
圖 28、粉末冶金燒結爐燃燒塔.....	35
圖 29、熱電發電系統實際運作狀況.....	35
圖 30、傳統 ORC 蒸發器的夾點位置 .....	36
圖 31、ORC、TRC 與 TFC 系統主要架構 .....	37
圖 32、ORC、TRC 與 TFC 系統之取熱量比較 .....	37
圖 33、廢熱回收用於同一製程中之空氣預熱.....	40
圖 34、廢熱回收用於工廠或其他製程熱水之用 .....	41
圖 35、輔助加熱系統.....	42
圖 36、工業場域中高低溫餘熱運用模式 .....	42



# 表目錄

表一、廢熱之分類及來源.....	7
表二、不同流體與不同狀態下之熱對流係數.....	13
表三、吸收式冰水機系統之工作流體與原理.....	20
表四、吸收式與吸附式制冷簡易比較.....	21
表五、廢熱調查表.....	29
表六、ORC 與 TRC 取熱量比較表.....	38
表七、ORC 與 TFC 取熱量比較表.....	38



## 1. 前言

能源轉換與消耗是所有工業製程中不可或缺的一個重要程序，舉凡化學材料製造業、化學製品製造業、金屬基本工業、食品飲料業、造紙業等均有各種不同吸熱或放熱之化學與物理反應在交替進行著，以製作所需之各式材料與產品。在能源有百分之九十八以上依存國外進口的情況下，如何有效利用及平衡這些不同之吸/放熱反應，將放熱過程之熱能轉移及供給吸熱過程所需之熱源以節省能源，並減少石化燃料之使用量便益形重要。同時能源之應用不僅要著眼於能源使用效率之提昇，以充份有效利用現有之能源，更需考慮到環境保護之因素，如最近因化石燃料之使用所造成二氧化碳增加而衍生之溫室效應，也是從事能源節約研究工作不可忽視之重點。政府也已宣示2050達淨零碳排的能源目標，因此提升能源使用效率，將會是關鍵手段之一。凡加入製程中之各種能源，在以熱能型式完成其預期且有附加價值之工作(如圖1所示)後所剩餘之熱能，此部份熱能無法在原有製程內再利用，因此將以不同方式排放至大氣中，這些熱能即稱為廢熱或是餘熱。如何評估整廠甚或區域性熱能需求，進而進行熱能回收及利用成為一項重點工作。

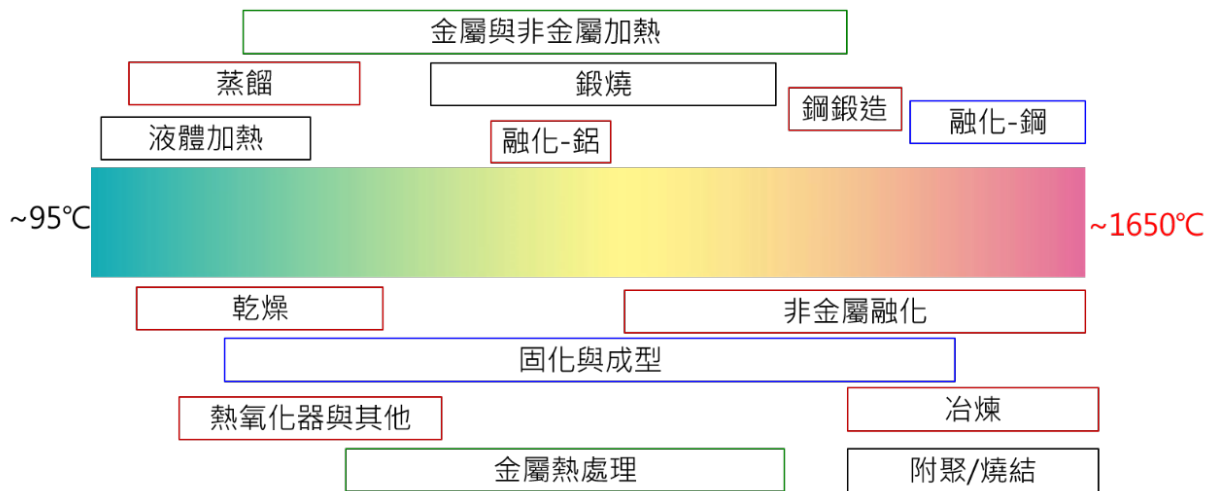


圖1、各式製程溫度範圍與所衍生之廢熱來源

若依據一般工業設備及其排放的廢熱溫度範圍，亦可以整理如表一內容，廢熱以氣態或是液態流體的方式排放。

表一、廢熱之分類及來源

高溫(>650°C)	中溫(230~650°C)	低溫(<230°C)
精煉鋁爐	蒸汽鍋爐廢氣	蒸汽冷凝液
精煉高爐	氣渦輪機廢氣	冷卻水
煉鋼電弧爐	往復式引擎廢氣	乾燥箱
水泥窯	熱處理爐廢氣	製程流體
陶瓷窯	乾燥爐廢氣	
玻璃窯	催化裂解塔廢氣	
焚化爐	熱處理冷卻水	



## 2、熱傳形式

若要進行廢餘熱之回收再利用，我們必須先要了解熱傳遞的形式與特性，才能知道如何進行熱能回收的設計與規劃。兩物體間熱傳發生的驅動力在於彼此要有溫度差的存在，才会有讓熱量的傳遞。而依據傳遞物理機制的不同，熱傳可以區分成三種基本型態：熱輻射、熱傳導與熱對流，其特性簡易說明如下：

**熱輻射:** 透過電磁波輻射方式向外發散熱量，其強度取決熱源的絕對溫度，溫度越高能量輻射越強。此能量傳遞的過程，並不需要任何介質。如下圖 2 中的熱輻射形式，水(代表能量)並不需透過人(代表傳熱介質)的移動或傳遞，即可將水傳送至右方失火中的房子上。如同太陽直接穿過太空將能量傳給地球一樣。

**熱傳導:** 高溫向低溫傳遞的過程，是透過物質中一個分子向另一個分子傳遞振動能的結果。若是導體傳遞還包含自由電子的移動，所以傳熱速度會更快。因著材料傳遞速度快慢的差異，材料一般可以區分成導熱材料(如金屬)或是隔熱材料(如保溫棉)。如下圖 2 中的熱傳導，水透過眾人間一人接續一人傳遞的方式，將水傳送至右方失火中的房子上。

**熱對流:** 是由於流體(液體/氣體)間產生流動的現象，使得不同溫度流體相互混合的熱量傳遞過程。若產生流動的原因，是由於外界提供一壓力



差(如液體泵/風機等)作用所產生流動，稱之為強制對流。若是因為溫度不同所形成的密度差異，因重力作用所引起的流體流動，稱之為自然對流。在某些條件下，強制對流與自然對流是共同存在，且均占有不可忽略的比例時，此時的對流熱傳稱之為混合熱傳。

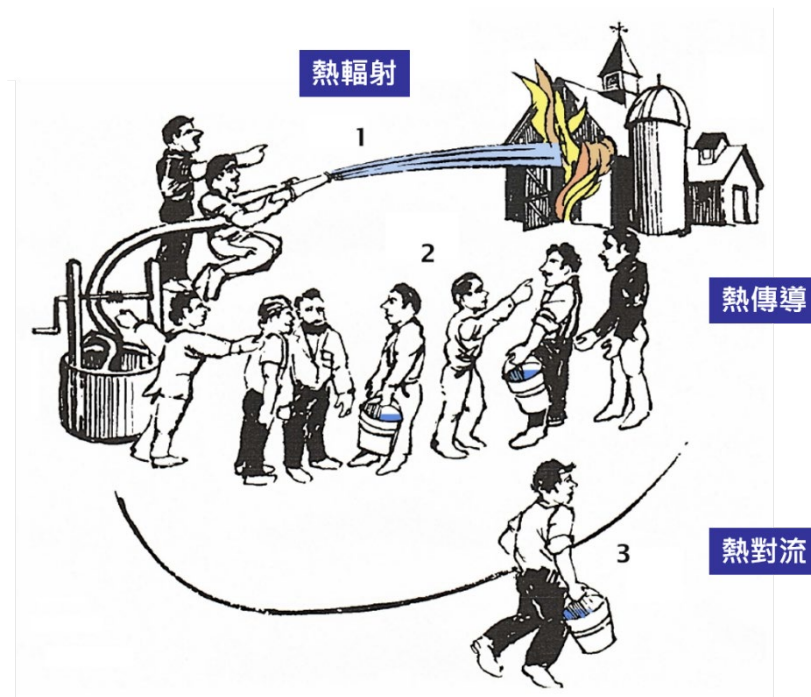


圖 2、熱傳的三種機制[1]

## 常見的廢熱形式與場域

### 2.1 熱輻射

工業製程中較容易遇到的熱輻射廢熱，一是金屬工業中的鋼胚加熱製程，另一種則是燃燒塔出口的燃燒火焰，兩者在工作現場非常容易感受到其輻射出來的熱量，其環境如圖 3 與圖 4 所示。這兩個場域的廢熱，還可能伴隨著相對微弱的熱對流熱傳。



圖 3、高溫之鋼胚(輻射熱)

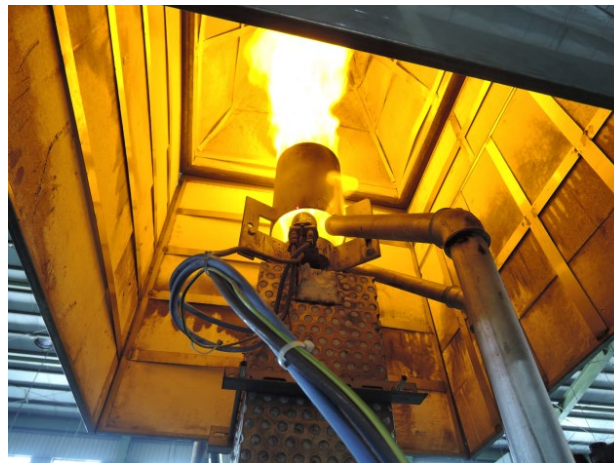


圖 4、燒結爐燃燒塔(熱對流+輻射熱)

計算高溫物體的熱輻射量，是使用史蒂芬-波茲曼輻射定律（Stefan-Boltzmann Law）來進行評估。方程式(1)即為計算物體 1 熱輻射至物體 2 之能量 $\dot{Q}$ 計算公式:

$$\dot{Q}_{1-2} = A_1 \times F_{1-2} \times \sigma \times \varepsilon \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

其中， $A_1$  為物體 1 的表面積； $F_{1-2}$  為物體 1 與物體 2 間的視因子 (view factor)； $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼常數  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ； $\varepsilon$  是物體 1 表面的放射率，此值  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ； $T$  則是物體的絕對溫度 ( $\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.15$ )。

對於熱回收而言，由方程式(1)可以得知，物體 1 與物體 2 之間有一關鍵參數就是視因子  $F_{1-2}$ ，其值受到幾個變數的影響。如圖 5 所示，熱源面積單元 ( $dA$ ) 與熱回收器面積 ( $L_1 \times L_2$ ) 及距離 ( $D$ ) 有關，當  $D/L_1$ 、 $D/L_2$  比值小時 (亦即距離近或是熱回收器面積大)，才能獲得較大的視因子。影響熱輻射熱傳量大小的變數，包含視因子、放射率與角度等相關參數，有興趣深入研究的讀者，可以參考大學熱傳學課本的內容。

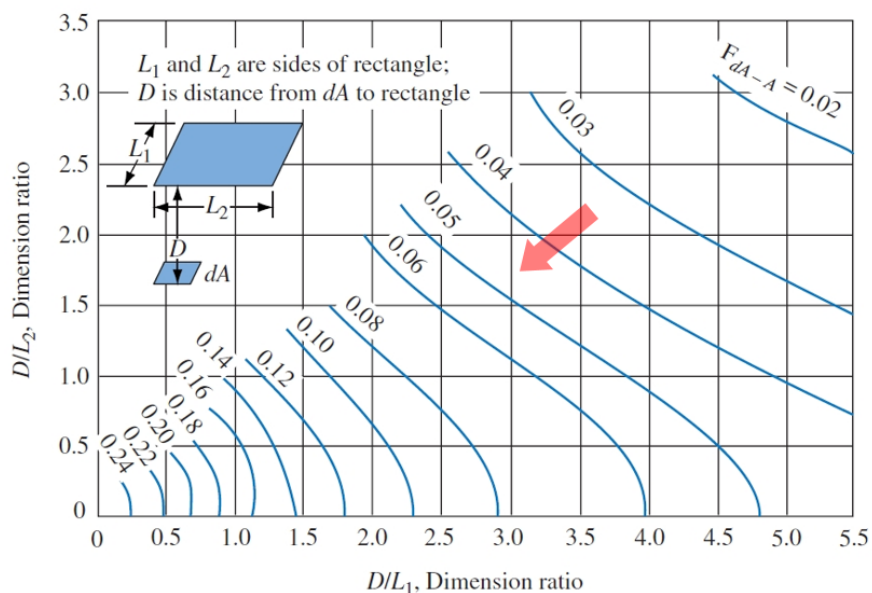


圖 5、熱源面積單元與熱回收器距離及尺寸改變之視因子[2]



## 2.2 熱對流

工廠製作生產產品的過程中，經常會有加熱的需求，例如圖一的製程與表一中的設備及來源等，因此將常有廢餘熱的產生。廢熱形式除了少數為熱輻射外，占比最多的就是以熱對流形式產生，攜帶能量的流體包含管道中之蒸氣、煙道氣、熱水、熱煤油或其它各式參與製程所需的工作流體等。熱對流之熱交換量一般是使用牛頓冷卻定律(Newton's law of cooling)方程式(2)來進行估算。

$$Q = h \times A \times (T_f - T_s) \quad (2)$$

其中， $h$  為熱對流係數，其值大小與流體種類及狀態有關； $A$  則為熱交換處之面積； $T_f$  為流體溫度； $T_s$  則是熱交換處的管壁溫度。

對於熱對流的能量交換(熱回收)角度出發，首先必須要注意的是流體種類與狀態。例如圖 6 中的工作流體相同為水，但在不同壓力下可以明顯看出飽和蒸汽擁有比飽和液態水更高的能量，亦即在相同飽和壓力與溫度下，能回收的能量多寡將會有明顯差異。另外，評估熱回收時，還需要考慮不同流體不同狀態對於熱對流係數的影響。以空氣為例，表二可以明顯看出自然對流與強制對流，其熱對流係數差異大約 10 倍。因能量守恆之關係，若圖 7 兩側溫度差一樣的條件下，由方程式(2)可以得到方程式(3)，這代表著管內外兩側所需的熱交換面積約會有 10 倍的差異，亦即進

行熱回收時，必須要有足夠的空間來容納熱交換器所需要的面積。

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow h_1 \times A_1 = h_2 \times A_2 \quad (3)$$

廢餘熱流體的不同，所含的能量也不同。

預熱的流體不同，所需要的面積就不同。

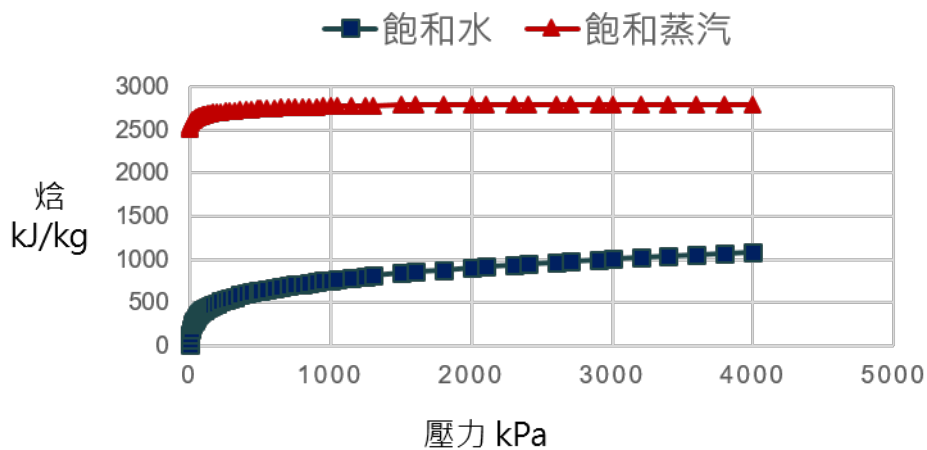


圖 6、飽和液態水與飽和蒸汽在不同壓力下之焓值變化

表二、不同流體與不同狀態下之熱對流係數[2]

Fluid	W/m <sup>2</sup> K
Air, free convection	6-30
Superheated steam or air, forced convection	30-300
Oil, forced convection	60-1,800
Water, forced convection	300-18,000
Water, boiling	3,000-60,000
Steam, condensing	6,000-120,000

影響熱對流熱傳量大小的變數，除了溫度差以外，最關鍵的就是熱對流係數的評估，而影響熱對流係數的變數很多，有興趣深入研究的讀者，可以參考大學熱傳學課本的內容。

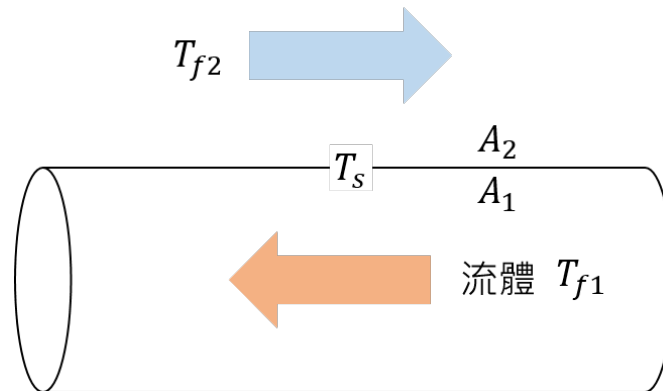


圖 7、管道的熱對流熱交換

### 3. 餘廢熱之應用

廢餘熱的再利用的方式，可以依據工廠區域內的需求，分成以下幾類：

預熱：一般加熱的對象，包含空氣、水或是其他工作流體，甚至是固態的工件(如需加熱之鋼胚等)；蒸氣：包含廢熱鍋爐，或是利用熱泵來產生蒸氣等不同的方式；製冷：透過吸收式或是吸附式冰水機來產生製程或是空調系統所需的冰水；發電：可以利用傳統的熱工循環系統或是固態元件，將熱能轉換成電能。各式運用的簡單說明，請參考以下說明。

#### 3.1 高溫物體熱輻射 – 預熱水

如圖 9 剛從加熱爐出來的高溫鋼材，以一熱管熱交換器進行回收其輻射熱能量後，將水加熱。如前文說明熱輻射熱交換的特性，欲增加熱回收量，必須以近距離或是加大熱交換面積才能達到，因此在製程產線上的空間需求上必須要能配合。圖 8 亦可以明顯看出，熱管熱交換器是近距離放置在輸送帶的上方，這也代表著熱回收設備必須要具有能簡易移開的設

計，才能方便產線進行維護。此輻射熱回收熱交換器之性能，讀者可以參考原始研究論文[3]，以進一步了解實際運用情形。

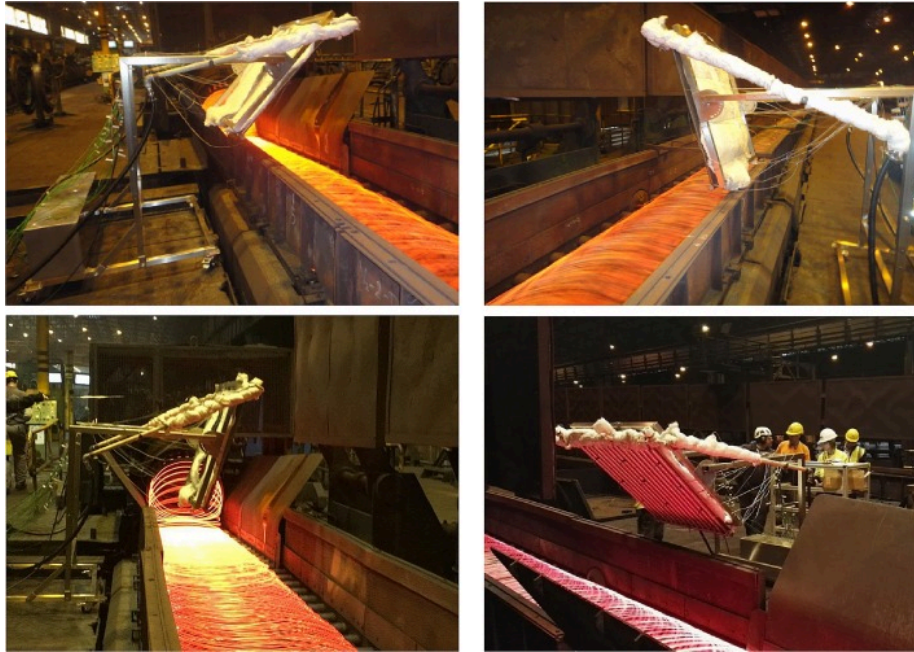


圖 8、熱管熱交換器用於回收輻射熱[3]

### 3.2 煙道氣 – 預熱水

工廠有許多加熱的製程需求，因此會有許多使用燃料燃燒產生熱量的設備，如加熱爐、熱媒鍋爐與蒸汽鍋爐等。而燃燒後所排放的煙道氣，仍具有一定的溫度，因此煙道氣能量可以透過熱交換器進行回收。如圖 9 所示，透過在煙道中裝設一熱交換器(虛線框)直接回收蒸汽鍋爐燃燒後的熱能，用以加熱將要進入鍋爐的飼水(feed water)，如此可減少鍋爐燃料使用量，獲得約能源的成效。在此熱回收的過程中，煙道氣能量透過熱對流



方式先傳給熱交換器外側，熱量再由外側傳導至內側後，再以對流方式傳給飼水。如前文說明，空氣熱對流係數較水的熱對流係數低 10 倍以上，亦即熱交換器煙道側的面積將會遠大於水側面積，一般可藉由鰭片的設置，來減少所需要的空間。但這也表示：

- i. 煙道擁有足夠空間可以裝設此熱交換器；
- ii. 因為煙道內裝設大表面積的熱交換器後，將會造成煙道氣流動阻力的增加，需注意是否需要提升風機馬力或是增設風機，以克服此問題，避免進而影響燃燒設備之燃燒效率；
- iii. 煙道氣溫度將會因熱回收的關係而降低，若煙道氣包含  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  等成分，必須注意是否有露點腐蝕的疑慮。若有疑慮，則可以透過控制熱交換器煙道側出口溫度，或是熱交換器採用抗腐蝕材料克服此問題；
- iv. 若煙道中有粉塵存在，則鰭片間距不宜太密集，以免產生堆積問題，進而影響熱回收量以及產生壓損增大的問題。



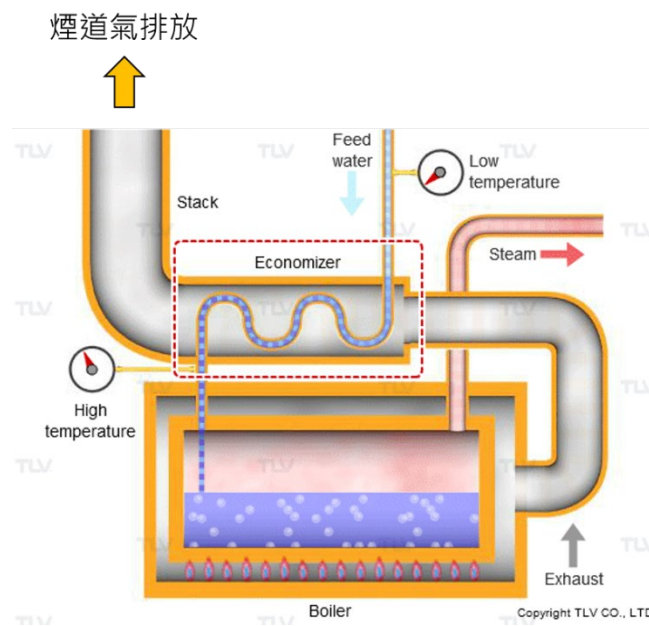


圖 9、煙道氣熱回收 – 預熱鍋爐飼水[4]

### 3.3 煙道氣 – 廢熱鍋爐

若煙道器溫度與能量仍十分充足，且廠內有蒸汽之需求，則此時煙道氣廢熱可以導入熱交換器(廢熱鍋爐)中，直接產生蒸汽供廠內使用，如圖 10。而因增加熱交換器所可能衍生的須注意事項，與前一節的 i~iv 點說明內容一樣。

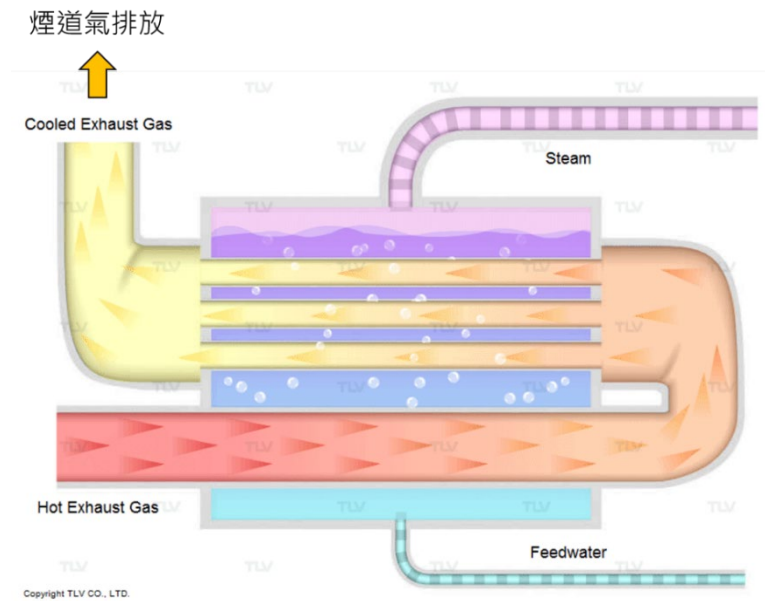


圖 10、煙道氣熱回收 – 廢熱鍋爐[4]

### 3.4 廢熱回收 – 製冷

若工廠內並沒有預熱的需求，或是製冷需求高於預熱需求，此時就可以透過吸收式製冷(absorption refrigerator)系統將廢餘熱之能量轉換成製作冰水，圖 11 為系統架構之示意圖。此系統中包含四項工作流體：① 廢餘熱流體，在產生器(generator)中將熱量傳給製冷工作流體，以汽化其中的水。圖中為熱源為蒸汽，實際上還可能包含液體或其他氣體；② 製冷工作流體(absorbent)，此為溴化鋰-水的混合物，透過水的蒸發、冷凝與膨脹汽化過程，產生製冷的效果；③ 冰水(chilled water)，能量被製冷工作流體吸

收後成為所需的冰水；④ 冷卻水(cooling water)，作為製冷工作流體在冷  
凝器(condenser)與吸收器(absorber)冷卻之用。

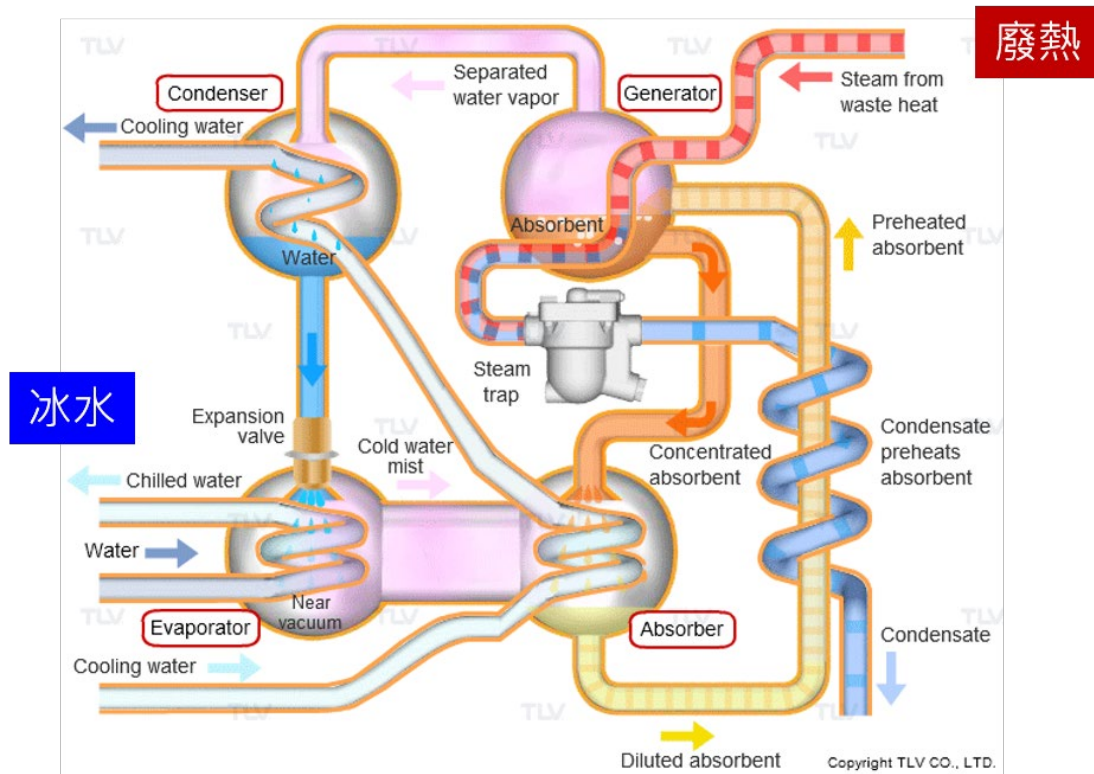


圖 11、廢熱 – 吸收式製冷[4]

依據吸收製冷各項工作流體以及工作程序之說明整理如下表:

表三、吸收式冰水機系統之工作流體與原理

流體	工作程序與原理
廢餘熱	在產生器中加熱製冷工作流體，使水蒸發並變成過熱蒸汽。
製冷工作流體 溴化鋰-水	在產生器中吸收熱後，因水被蒸發使得濃度增加。濃縮後進入吸收器吸收水分，回到常態濃度。再經預熱器加熱後，回到產生器。



製冷工作流體 水	在產生器中吸熱後變成過熱蒸汽，進入冷凝器中被冷凝成液態。液態水經膨脹閥膨脹降壓閃化成低壓低溫蒸氣後，進入蒸發器吸收能量，成為低溫水霧進入吸收器。被濃縮吸收液吸收，並產生低真空環境
冰水 (製冷用)	在蒸發器中被吸熱降溫成為冰水
冷卻水	在吸收器與冷凝器中冷卻製冷工作流體

另外一種廢熱驅動製冷設備為吸附式製冷系統(absorption refrigerator)，其工作原理與吸收式類似，都過透過製冷劑(水)的低壓汽化吸熱來獲得製冷的效果。兩系統最主要差異是吸附式製冷的吸附器(adsorber)，會吸附製冷劑蒸氣到固體(一般是矽膠或是沸石等具有吸附效應的材料)的表面，而吸收式製冷的吸收器(absorber)會將製冷劑蒸氣吸收，溶解在液體中。表四為傳統製冷技術與吸收式及吸附式制冷的簡易比較表，吸收式較吸附式適合廢熱溫度稍高的條件。對於吸收式與吸附式製冷系統有興趣的讀者，可以尋找相關資料進行研讀與比較後，在判斷合適工廠使用需求的廢熱驅動製冷系統。

表四、吸收式與吸附式制冷簡易比較[5]

	壓縮製冷	吸收制冷	吸附製冷
制冷機制	冷媒氣化吸熱		
壓縮形式	機械壓縮	熱吸收迴路	熱吸附迴路

驅動力	電力	熱能 85~180°C	熱能 55~95°C
冷媒	HFC/HFO 類 冷媒	水與吸收劑 (溴化鋰或氨等)	水與吸附劑 (矽膠或沸石等)

### 3.5 蒸氣 – 蒸氣再壓縮系統

蒸氣再壓縮系統(MVR: Mechanical Vapor Recompression)可視為熱泵系統，以系統內工作流體為冷媒進行壓縮，以提高溫度與壓力直接做為系統本身的加熱源，適用於蒸餾、蒸發、濃縮等製程中。MVR 在蒸餾製程具有高效率的原因，主要是用壓縮機系統取代冷卻系統與真空系統(圖 12 之中圖與右圖)，降低整體的能源需求，獲得節約能源的效應。或是主要是用壓縮機系統增加氣態工作流體的壓力與溫度後，取代原先的加熱設備，一樣可以獲得節能的成效(圖 12 之左圖與右圖)。

MVR與蒸發系統(取代傳統多效蒸發罐)

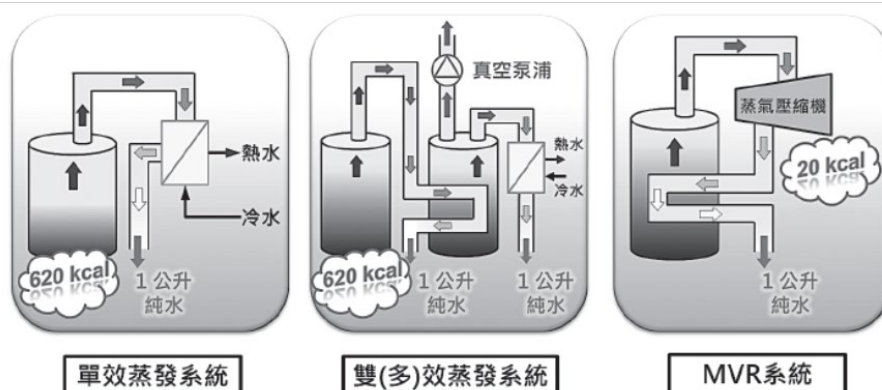


圖 12、蒸氣再壓縮系統於多效蒸發系統之應用[6]

### 3.6 廢熱 – 熱泵蒸汽鍋爐

若工廠有蒸汽需求，但工廠廢熱溫度過低( $<100^{\circ}\text{C}$ )，無法透過廢熱鍋爐來產生蒸汽時，則可以考慮裝設熱泵蒸汽鍋爐系統，來產生較低溫( $<200^{\circ}\text{C}$ )蒸汽。熱泵蒸汽鍋爐系統大致如圖 13 的架構，整體系統先由熱泵吸收廢餘熱以提高水的溫度後，水進入低壓之閃蒸罐進行降壓汽化與液汽分離，最後蒸汽透過 MVR 來提高的溫度與壓力，液態水部分則回到系統中持續加熱使用。若欲進一步提高水的溫度，或是廢熱溫度較低時，可以利用熱泵串聯(二階或是多階)的方式來達成。目前國外已有許多熱泵蒸汽鍋爐的商業化產品，可供選擇。依據神戶製鋼[7]熱泵蒸汽鍋爐的使用結果，顯示與傳統的燃氣鍋爐系統相比，熱泵蒸汽鍋爐的運轉成本可以降低約 50%，能源消耗可降低約 60%。在熱源溫度  $65^{\circ}\text{C}$  提供  $120^{\circ}\text{C}$  蒸汽的條件下， $\text{CO}_2$  的排放更可以減少達 70%。

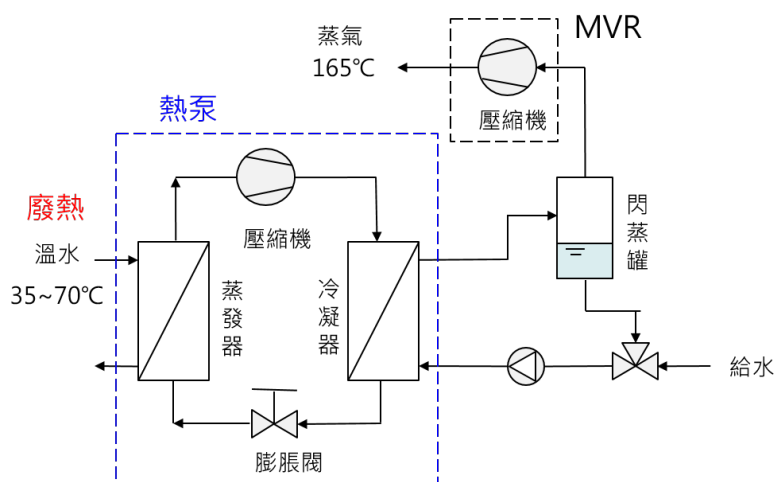


圖 13、熱泵蒸汽鍋爐



### 3.7 廢熱發電

當工廠內部盤點還有電力需求時，可以考慮利用廢熱進行發電。目前常見的發電技術，包含傳統蒸汽發電系統(朗肯循環系統；Rankine cycle)、有機朗肯循環系統(ORC: Organic Rankine Cycle)以及熱電系統(TE: Thermoelectric)等三種系統。

#### 3.7.1 朗肯循環系統

朗肯循環系統即為傳統火力電廠與汽電共生電廠等採用的循環系統，使用水作為工作流體。圖 14 為系統運作的原理，簡單說明如下：

- 過程 1→2(泵浦升壓工作流體過程)：  
以升壓泵浦將液態工作流體，加壓後傳送至蒸發器。
- 過程 2→3(蒸發器蒸發工作流體過程)：  
液態工作流體吸收熱源熱能後，轉換為過熱蒸汽，傳送至渦輪機。
- 過程 3→4(工作流體於渦輪機內做功過程)：  
高溫、高壓過熱蒸汽推動渦輪機，將熱能、壓力能轉換為機械能，機械能經由發電機轉換為電力輸出。做功後的低溫、低壓汽態工作流體傳送至冷凝器。
- 過程 4→1(冷凝器冷凝工作流體過程)：

汽態工作流體在冷凝器中將熱能排放給冷源後，轉變為液態工作流體後，完成熱力循環。

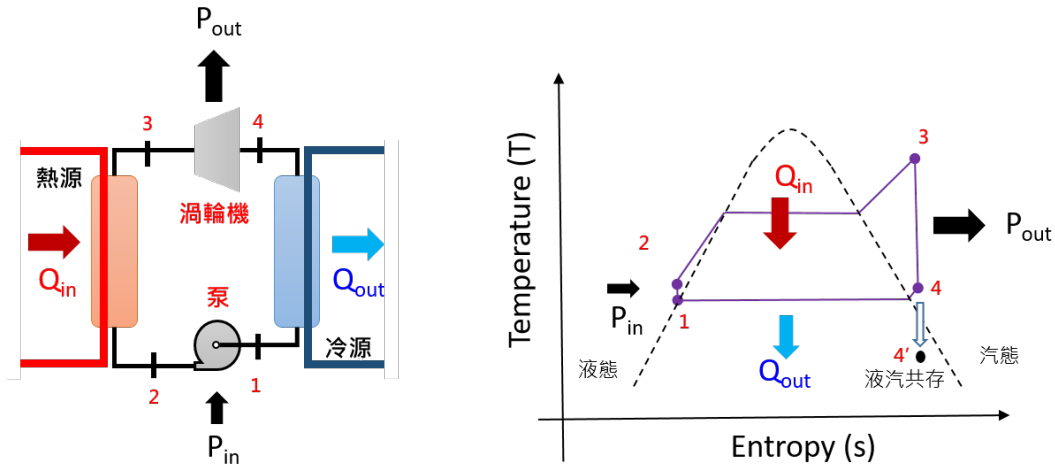


圖 14、傳統朗肯循環系統

對於以水為工作流體的朗肯循環系統，在熱源條件不變的情況下，欲提升系統的發電量時，會面臨一個風險的發生。如圖 14 右圖狀態點 4，持續降壓降溫的過程中，若渦輪機出口條件已進入水的液汽共存區(4→4')時，則會有液態水滴撞擊渦輪葉片造成損壞的情形發生，因此限制了系統運作的溫度操作範圍。一般狀況下，當廢餘熱溫度低於 320°C時，即不建議使用水為工作流體的朗肯循環系統作為發電系統。

### 3.7.2 有機朗肯循環系統(ORC)

當處於過熱氣(蒸汽)狀態的流體在降壓降溫的過程中，依最終狀態可大致分成三種類型(圖 15): 一是由過熱態進入兩相共存的飽和態，此種流





體稱之為濕流體(wet fluid)，水即為代表性的流體；二是變成過熱度更高的狀態，此種流體稱之為乾流體(dry fluid)，如甲苯、正戊烷與 R123 等；三是過熱(或飽和)度幾乎沒有變化，狀態點沿著等熵線變化，流體稱為等熵流體，如目前 ORC 常用的 R245fa。前節所述朗肯循環系統所面臨的限制，其主因是採用水作為工作流體，而水為濕流體所衍生的問題。因此在較低溫的條件，水或其他濕流體已不適合作為朗肯循環的工作流體，必須改用乾流體或是等熵流體，此時系統就稱為 ORC 系統。ORC 系統操作程序、運作原理與系統元件設置架構，基本跟傳統的朗肯循環是完全相同的，請參考前節內容。ORC 系統可使用之流體非常多，因著流體物理性質的差異，其適合使用的溫度範圍也會有所不同，圖 16 為學者依據理論研究分析系統具有最佳效率的建議工作流體，包含各式冷煤以及烷類等。

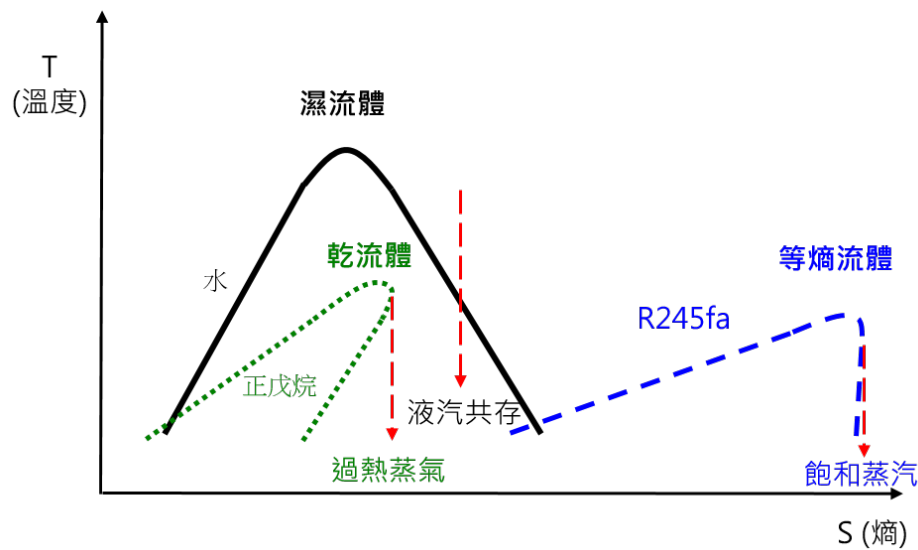


圖 15、濕、乾與等熵流體在降壓降溫後的差異

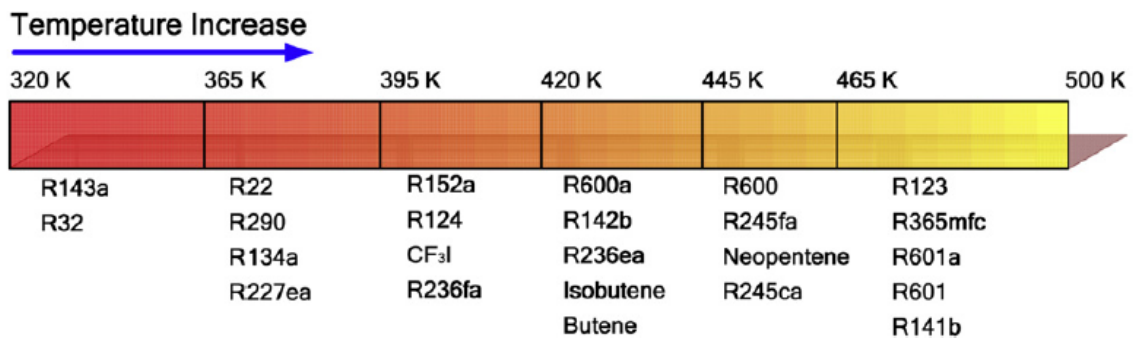


圖 16、不同熱源溫度範圍所適合之流體[8]

### 3.7.3 熱電系統(TE: Thermoelectric)

熱電元件是利用塞貝克 ( Seebeck ) 效應，就是當兩種不同的導體組成一個閉回路，若兩接頭處存在溫差，則回路中將產生電流，可將熱 ( 溫度差為驅動力 ) 直接轉換成電能的一種裝置。熱電轉換為一種藉由控制材料內部電子的傳輸來讓熱能及電能做到直接互相轉換的能源利用技術，能量轉換時不須任何機械動件，因此具有可體積小、無噪音、無震動等優

點。圖 17 為整個熱電發電器的架構，包含冷熱端(形成必要的溫差)、兩種不同(P、N 型半導體)的材料與組合串接方式等。與傳統的熱機系統(如 ORC)一樣，熱電發電系統也必須有足夠的散熱機制(冷端)，維持足夠甚至拉大冷熱端的溫差(圖 18)，將有助於提升發電功率。若熱無法由冷端順利移除(散熱不良)，將導致發電功率下降，這是必須注意的地方。

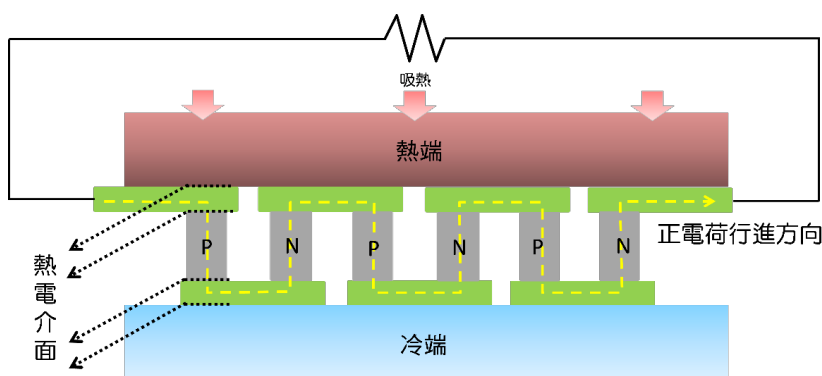


圖 17、熱電發電模組的架構示意圖[9]

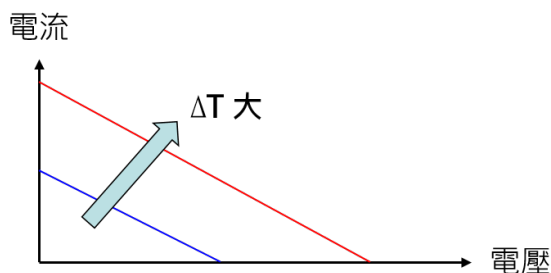


圖 18、熱電元件冷熱端溫差與輸出功率之關係

每種熱電材料在不同溫度範圍時有不同的物理性質，因此必須使用適合該溫度範圍之模組才能發揮最大之效益，常見的熱電材料系統依不同溫度可分為：

- i. 低溫熱電材料：溫度在 500 K 以下的範圍，其主要的材料系統為



$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ (碲化鉍)及其固溶體合金。

- ii. 中溫熱電材料：溫度在 500 ~ 1,000 K 的範圍，其主要的材料系統為  $\text{PbTe}$ (碲化鉛)、 $\text{Zn}_4\text{Sb}_3$  及其合金。
- iii. 高溫熱電材料：溫度在 1,000 K 以上的範圍，其主要的材料系統為  $\text{SiGe}$ (矽鍺)合金。

以高溫流體廢熱為例，當進行熱回收之後，流體溫度因能量損失而開始下降，此時熱回收系統可以考慮串聯不同溫層的熱電材料，例如中溫-低溫的配置方式，如圖 26 之應用架構。



## 4. 餘廢熱回收發電應用案例

在設置餘廢熱回收發電系統之前，必須針對工廠現場冷熱源、需求與周邊條件等進行調查與了解後，才能進一步規劃與制定廢餘熱發電系統的各项規格，並評估包含設置空間大小需求、可行性及投資回收年限等各项關鍵要素。因此表五之廢熱調查表，包含熱源的形式(液態、氣態)、溫度、壓力、流量、流體腐蝕性及設備防爆要求等，是在設計與制定發電設備規格前，所必須知道的各項參數。

表五、廢熱調查表

如條件變化不大可只填平均	
熱源條件	熱源種類 <input type="checkbox"/> 熱水 <input type="checkbox"/> 蒸氣 <input type="checkbox"/> 煙氣 <input type="checkbox"/> 其他製程流體
	流量 平均: 最小: 最大: 單位: <input type="checkbox"/> TPH(噸/小時) <input type="checkbox"/> Nm <sup>3</sup> /min <input type="checkbox"/> m <sup>3</sup> /min <input type="checkbox"/> LPM
	溫度 平均: 最小: 最大: 單位:°C
	錶壓力 平均: 最小: 最大: 單位: <input type="checkbox"/> kgf/cm <sup>2</sup> (G) <input type="checkbox"/> bar(G) <input type="checkbox"/> kPa <input type="checkbox"/> MPa
	熱源pH值 平均: 最小: 最大:
	餘廢熱內含其他物質 <input type="checkbox"/> NO <sub>x</sub> <input type="checkbox"/> SO <sub>x</sub> <input type="checkbox"/> VOC <input type="checkbox"/> 其他
	熱源可供應時間、條件 _____小時/年 取熱後最低溫度/壓力: _____°C、_____ <input type="checkbox"/> kgf/cm <sup>2</sup> (G) <input type="checkbox"/> bar(G) <input type="checkbox"/> kPa <input type="checkbox"/> MPa
冷源條件	可用冷源種類 <input type="checkbox"/> 水冷 <input type="checkbox"/> 氣冷 <input type="checkbox"/> 無冷源 <input type="checkbox"/> 其他
	冷源出水溫度 _____°C 條件: W.B. (外氣濕球溫度) = 29°C
	可用冷源流量 平均: 最小: 最大: 單位: <input type="checkbox"/> TPH(噸/小時) <input type="checkbox"/> Nm <sup>3</sup> /mm <input type="checkbox"/> m <sup>3</sup> /min <input type="checkbox"/> LPM
電力條件	現場可用電源(可複選) <input type="checkbox"/> 3φ220V <input type="checkbox"/> 3φ380V <input type="checkbox"/> 3φ440V <input type="checkbox"/> 其他
	發電電壓 <input type="checkbox"/> 3φ220V <input type="checkbox"/> 3φ380V <input type="checkbox"/> 3φ440V <input type="checkbox"/> 其他
	發電頻率 <input type="checkbox"/> 50Hz <input type="checkbox"/> 60Hz
	廠區平均電價(元/度)
可用空間	長X寬X高(M) 防爆認證需求 <input type="checkbox"/> 無 <input type="checkbox"/> CNS <input type="checkbox"/> ATEX <input type="checkbox"/> IEC

### 4.1 ORC 發電系統

#### (A). 鋼鐵業煙道氣廢熱回收發電

鋼鐵業加熱爐之高溫煙道氣，利用復熱器(recuperator)進行廢熱回

收，作為空氣預熱之用。預熱空氣有兩個用途，一是作為製程加熱之用；另外一部分則是透過廢熱鍋爐作為 ORC 系統之熱源，以進行廢熱發電。整體廢熱回收架構示意圖如圖 19，利用 545°C 預熱空氣其中流量的 13,000Nm<sup>3</sup>/hr，可產生 61 噸/小時(TPH)136°C 的熱水，作為 200kWe ORC 系統的熱源。此 ORC 系統每年發電達 1,660,000 kWh，將可節省約 NT\$400 萬電費支出，預計減碳量為 1,095 噸/年。設備投資回收年限約為 4.2 年。

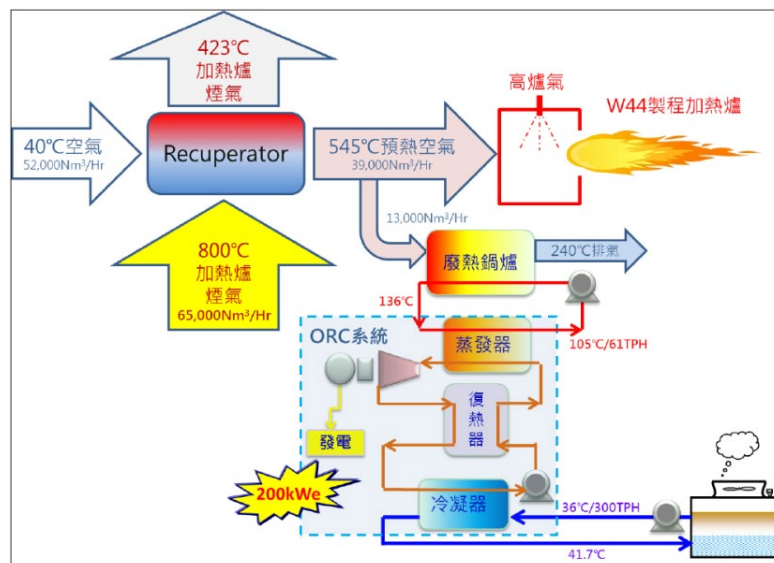


圖 19、鋼鐵廠加熱爐煙道氣廢熱回收預熱空氣與 ORC 發電

## (B). 石化業製程冷凝水廢熱回收發電

原製程產生之冷凝水，是透過冷卻水塔直接進行散熱降溫，未再進行回收利用。進行廢熱回收後，冷凝水改作為 ORC 熱源之用(圖 20)，

其流量為 200 噸/小時，溫度由 82°C 之冷凝水經過 ORC 發電利用後降為 62°C，過程中除了產生 195kWe 的發電功率外，同時也低冷卻水塔的負荷。此 ORC 系統每年發電量達 170 萬度電，將可節省約 NT\$378 萬電費支出，減碳量為 1,713 噸/年，同時每年節省 30 萬噸冷卻水，機組運轉時數 >8,500 小時/年。設備投資回收年限約為 3.7 年。

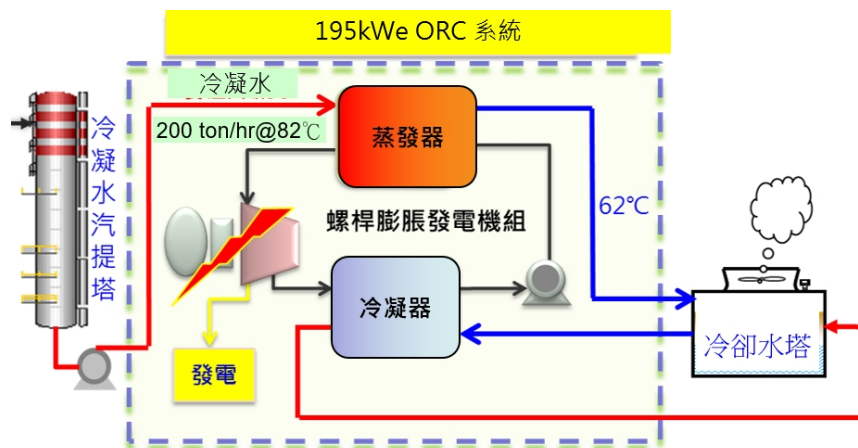


圖 20、石化業製程冷凝水廢熱回收發電

### (C) 造紙業熱水廢熱回收發電

原烘乾紙匹用蒸汽在使用結束是送至冷凝水槽進行降溫後，再當成鍋爐飼水循環使用，其總量達 60 噸/小時，溫度為 110°C。熱回收設計則先利用 125kWe 之 ORC 蒸發器進行熱回收後，再進入冷凝水槽進行降溫，此設計也避免鍋爐給水溫度可能過高的問題，如圖 21。此

ORC 系統其年發電量可達 100 萬度電，將可節省約 NT\$255 萬電費支出，減碳量為 675 噸/年，設備投資回收年限約為 3.5 年。

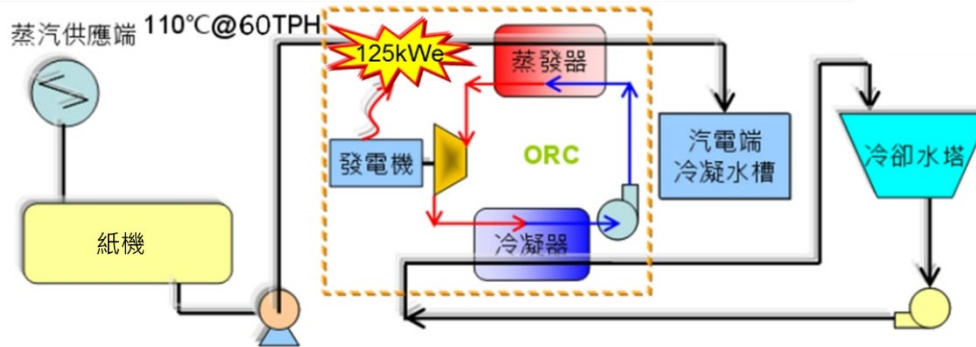


圖 21、造紙業熱水廢熱回收發電

(D) 廢棄物處理業蒸汽廢熱發電

利用汙泥乾燥用多餘之 4 噸/小時 165°C 蒸汽，作為發電功率 255kWe 之 ORC 系統熱源。此 ORC 系統年發電量可達 200 萬度電，將可節省約 NT\$430 萬電費支出，減碳量為 1,200 噸/年，設備投資回收年限約為 3.8 年。

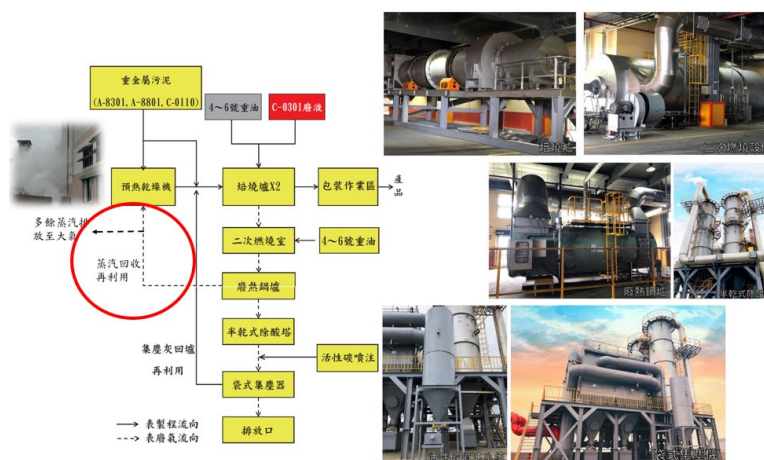


圖 22、廢棄物處理業多餘蒸汽之廢熱發電



## 4.2 熱電發電系統

### (A) 鋼鐵業熱輻射廢熱發電系統

熱電發電系統主要由三個元件組合而成，分別為熱端交換器、熱電模組、冷端熱交換器，如圖 23 所示。其中熱端交換器吸收高溫鋼胚熱輻射能量以產生高溫熱水後，再將熱傳給熱電模組熱端(圖 24)，冷端熱交換器則是將熱電模組冷端所傳出的熱量散出。當熱電模組兩端形成溫度差，就可將熱能轉換成電能。國內鋼鐵廠連鑄製程之熱輻射量，經過評估可達百 kW 以上，因此熱電發電系統設計由 8 組 500 W 級堆疊式熱電發電次系統所組成，預計整組發電系統可發電 4 kW。在熱源溫度 164.5 °C 與冷源溫度 40.1 °C 下，測試結果顯示 1 至 4 組次系統最大發電量為 2.53 kW，而 5 至 8 組次系統最大發電量為 1.89 kW，總發電量為 4.42 kW，

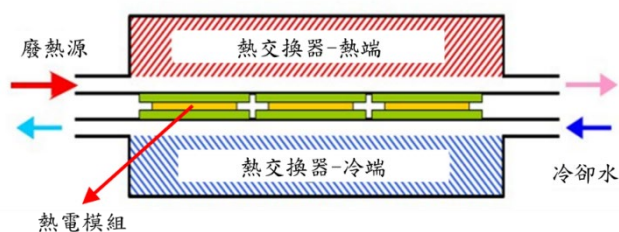


圖 23、熱電發電系統示意圖

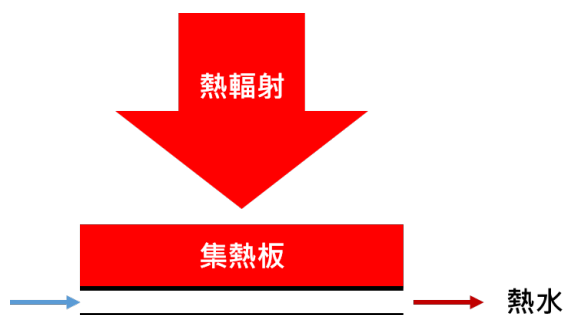


圖 24、熱輻射取熱裝置示意圖



圖 25、鋼鐵熱輻射廢熱回收熱電發電系統

## (B) 柴油引擎廢熱發電系統

以柴油發電機之高溫廢煙氣為熱源，熱電發電系統之入口溫度 428°C、氣體流速 49m/s。因應整個引擎廢氣因熱回收的溫度變化，系統之熱電元件採中低溫晶片串連方式(圖 26 及圖 27)進行搭配。中溫晶片材料適用於溫度 500~1,000K 的 PbTe(碲化鉛)，而低溫晶片材料為 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>(碲化鉍)，測試結果得到中溫模組發電功率 143W，以及低溫模組發電功率 474W，整組次系統發電功率為 616W，系統之

總發電功率 6.78kW。

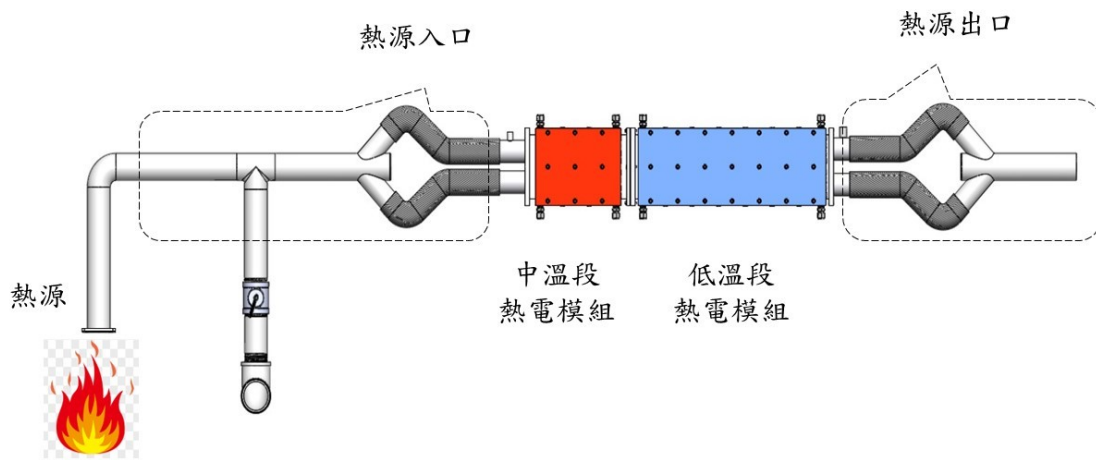


圖 26、柴油引擎廢熱發電系統-中低溫熱電模組

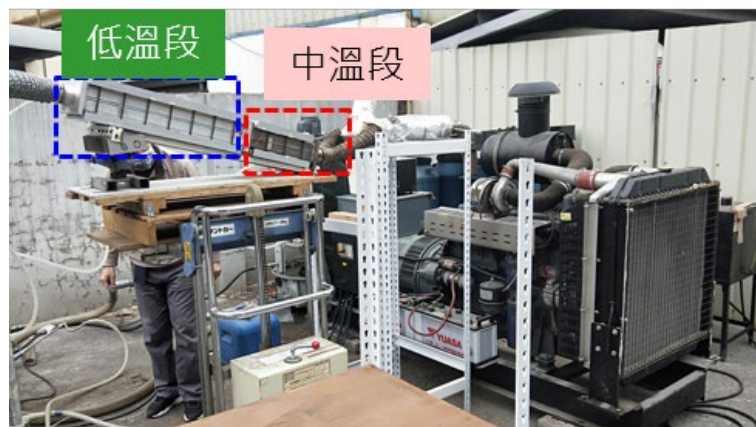


圖 27、柴油引擎廢熱發電系統

### (C) 粉末冶金業燃燒塔廢熱發電系統

粉末冶金廠在燒結的過程中，為了保護工件不被氧化，所以必須在燒結爐內通入含有氫氣的保護氣體。燒結爐出口處會設置燃燒塔(圖 28)，以燃燒排出的保護氣體，因此會有廢熱產生。熱端溫度約為 150~160°C，冷端溫度約為 40~50°C，溫差約為 100~120°C 左右，



故選擇低溫熱電材料  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  進行組成晶片模組搭配。

在燒結爐搭配熱電系統運作過程中，熱端平均溫度  $153.07^\circ\text{C}$ ，冷端平均溫度  $43.33^\circ\text{C}$ ，平均為  $110.37^\circ\text{C}$ ，熱電模組之平均發電功率約  $130.3\text{W}$ 。



圖 28、粉末冶金燒結爐燃燒塔



圖 29、熱電發電系統實際運作狀況

## 5. 新熱工系統之研發

ORC 產品具備技術成熟、可靠度高、成本低等優勢，為目前中低溫餘熱發電最經濟且轉換效率最高的解決方案，廣泛被應用於工業廢熱、地熱、生質熱能及太陽熱能發電等具有足夠冷熱源溫差的場域。然而，ORC 系統在取熱過程中，歷經工作流體的相變化，夾點的限制使得系統無法有效的從熱源吸收能量，這也導致大部份熱能的浪費。由熱力學第二定律來看，如圖 30 所示，因為蒸發器中工作流體開始氣化之後為等溫相變化，夾點限制使得熱源與蒸發器夾點前後其他位置之溫度變大，導致熱傳的不可逆性增加，亦即熱源大部分的能量難以回收再利用。

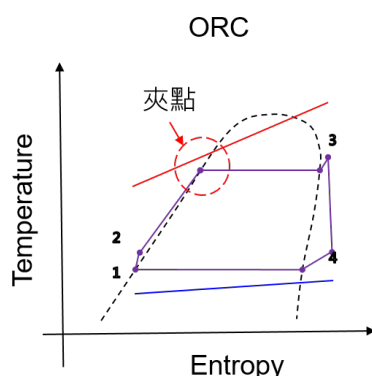


圖 30、傳統 ORC 蒸發器的夾點位置

為了使熱源及工作流體間的熱傳有更好的匹配，相關研究人員從突破 ORC 夾點限制的問題出發，發展了包含 TRC (Trans-critical Organic Rankine Cycle) 以及 TFC (Trilateral Flash Cycle) 兩種新的熱工系統技術。此兩種系統所使用的關鍵組件(圖 31)，與傳統 ORC 是相同的，依樣

包含工質泵、加熱之熱交換器、膨脹機與冷卻用之熱交換器。

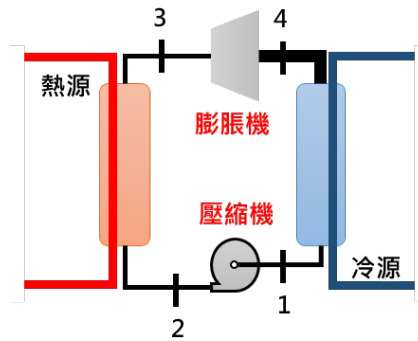


圖 31、ORC、TRC 與 TFC 系統主要架構

TRC 將系統最高壓力控制在臨界點以上，使得熱交換器中熱源與工質溫度的變化盡可能地貼近，以降低兩者間的溫差。而 TFC 則是當工質在熱交換器受熱變成飽和液態之前，一樣是採取盡可能地貼近熱源與工質溫度的作法，來提升可用能。因此由圖 32 可以看到在相同熱源條件下，熱源溫差變化  $TFC > TRC > ORC$ ，亦即取熱量將是  $TFC > TRC > ORC$ 。

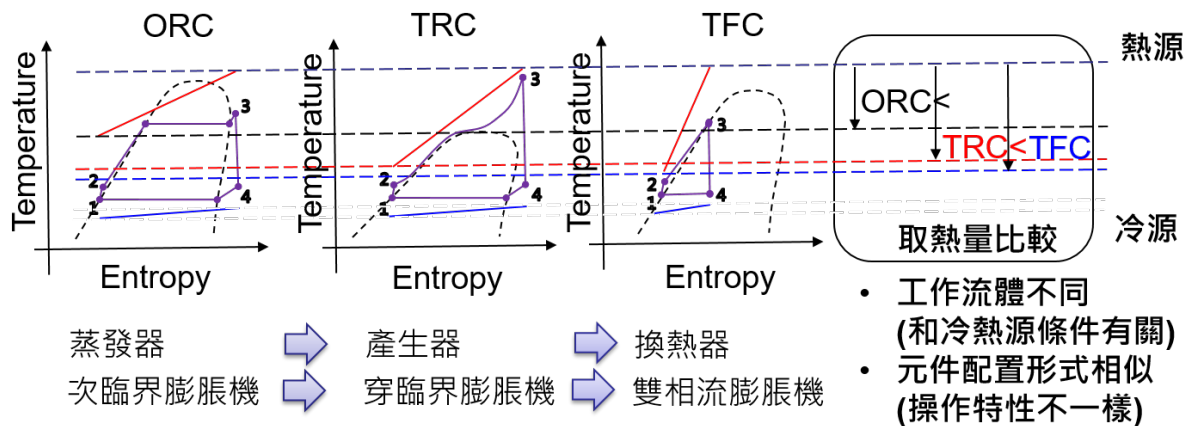


圖 32、ORC、TRC 與 TFC 系統之取熱量比較

工研院綠能所在相同測試環路系統上(冷熱、源熱與交換器相同)的條件下，進行三種熱工系統的取熱量比較之實驗測試。表六為 ORC 與 TRC



取熱量比較實驗分析結果，可發現 TRC 在較低熱功率供應的條件下，可以吸收與 ORC 差不多熱功率量，兩者相較之下 TRC 的取熱比高 ORC 約 33%。表七為 ORC 與 TFC 取熱量比較實驗分析結果，可發現 TRC 在較低熱功率供應的條件下，可以吸收比 ORC 更多的熱功率量，兩者相較之下 TFC 的取熱比高 ORC 約 80%。

表六、ORC 與 TRC 取熱量比較表

	熱源供應功率 kW	系統吸收功率 kW	取熱比
TRC	3,153.94	738,35	23.41%
ORC	4,362,73	755.07	17.31%

表七、ORC 與 TFC 取熱量比較表

	熱源供應功率 kW	系統吸收功率 kW	取熱比
TFC	1,100.62	667.90	60.7%
ORC	1,362.65	458.92	33.7%

雖然 TRC 與 TFC 的取熱量高於 ORC，這也表示 TRC 與 TFC 的兩個熱交換器尺寸與系統質量流率均會大於 ORC。熱交換器尺寸大，代表著系統初期投資成本會增加。質量流率大，代表系統耗電量也會增加，工質泵的成本也會增加。系統間各項關鍵要素的實際比較，包含效率與系統成本等，有待未來後續的驗證與分析。目前國外 TRC 系統剛有商業化的機組可以販賣，但 TFC 目前國外則還未有商業化機組。另外，TFC 的膨脹機因處



於液氣共存的兩相區做功，表示將會受到嚴重的液滴侵蝕作用，合適的材料選用及機構設計開發等，目前世界各國仍在持續研發中。



## 6、結論與建議

餘廢熱的來源包含許多形式，包含熱輻射、蒸氣、熱水與煙道氣等，進行熱回收時因熱交換能力的差異，對於熱回收熱交換器尺寸的需求差異很大，因此熱回收系統所需空間與投入成本均會不同有影響，設備設置之前須審慎評估。

廢餘熱回收再利用有多種可能性，應依工廠需求評估後，再決定如何運用此廢餘熱，使其價值可以有最大的發揮。可能的應用方式包含如下：

### 6.1 熱回收利用於製程中

熱能回收後，可作為原本製程中所需之空氣、水、工作流體以及物體之預熱用。如圖 33，廢熱回收作為該加熱系統所需空氣預熱之用。

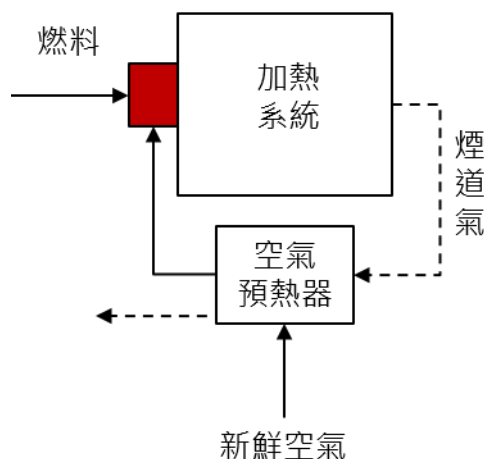


圖 33、廢熱回收用於同一製程中之空氣預熱

## 6.2 熱回收利用於工廠中

若經過評估，工廠其他區域亦有熱能之需求，因此熱能回收除滿足原製程需求外，亦可輸送至工廠其他區域使用，如圖 34 所示。或是利用熱泵、MVR、吸收/吸附式冰機等其他設備，將熱能轉換成工廠所需的蒸汽或冰水等其他之需求。

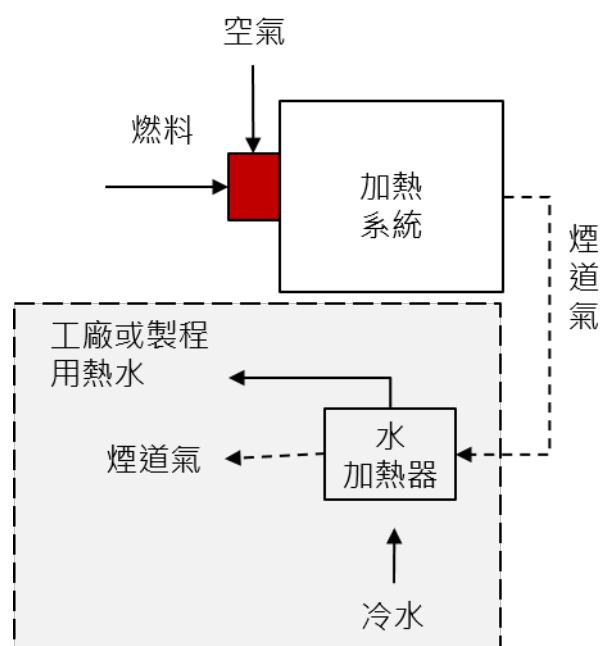


圖 34、廢熱回收用於工廠或其他製程熱水之用

## 6.3 熱回收發電

廢餘熱亦可以作為發電系統的熱源，若以朗肯循環作為發電系統，此時必須注意所使用的工作流體種類。若廢熱溫度  $> 320^{\circ}\text{C}$  只要回收溫度不要過低，可用水作為工作流體；若溫度  $< 320^{\circ}\text{C}$ ，因為水為濕流體之關係，則建議改使用乾流體或是等熵流體作為工作流體，亦即採用 ORC 作為廢熱發電系統，以維持系統的效率。另外，亦必須注意熱源供熱的狀態

態，若熱源為間歇式供熱的條件(如批次生產的製程)，廢熱溫度與供應量將會呈現上下起伏波動的狀態，這將不利於(有機)朗肯循環發電系統的操作，此時建議可加上一補助加熱系統，以維持穩定的能量供給，如圖 35 之示意圖。

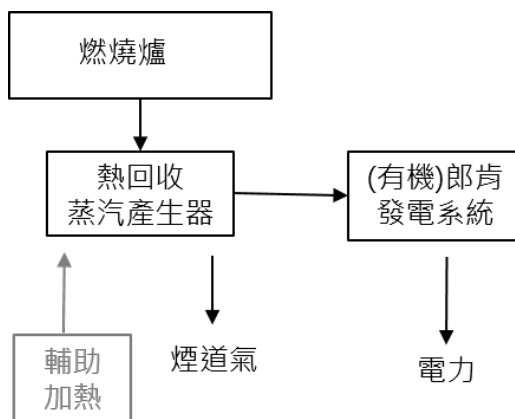


圖 35、輔助加熱系統

熱電元件於能量轉換時不須任何機械動件，因此具有可體積小、無噪音、無震動等優點。應用方面除了前文 4.2 節之說明外，亦可同時搭配(有機)朗肯循環系統，進行高中低溫的餘廢熱回收發電(圖 36)，以提高能源利用效率。

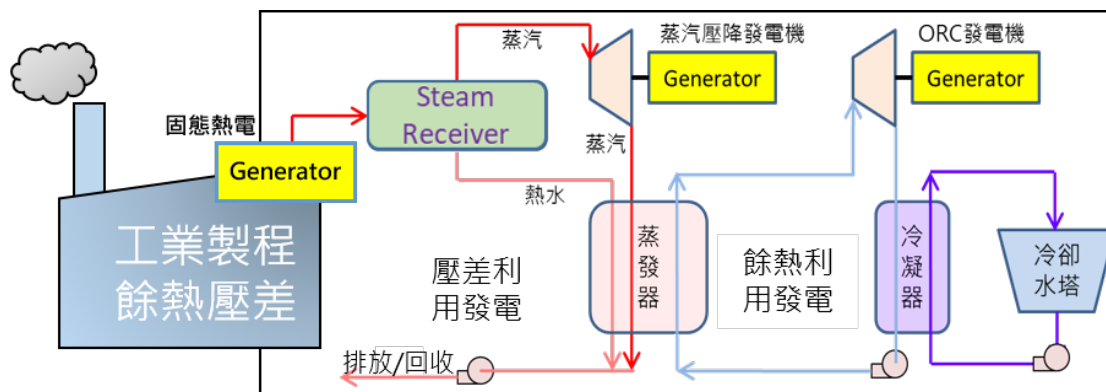


圖 36、工業場域中高低溫餘熱運用模式



## 7. 參考文獻:

1. J.H. Lienhard, "A heat transfer textbook" , 5<sup>th</sup> ed., Phlogiston Press, 2020.
2. F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Bohn, "Principles of Heat Transfer" , 7<sup>th</sup> ed., Cengage Learning, 2011.
3. H. Jouhara et al, "Experimental and theoretical investigation of a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in the steel industry" , Vol. 141, pp. 1928-1939, Energy, 2017.
4. <https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/waste-heat-recovery.html>
5. A. KUCZYŃSKA and W. SZAFLIK, "Absorption and adsorption chillers applied to air conditioning systems" , Vol. 31(2010), No. 2, 77–94, archives of thermodynamics.
6. 李正春、戴開志，"MVR 技術介紹"，台灣 ESCO 會訊第六十一期。
7. [https://www.kobelco.co.jp/chinese/releases/1193477\\_15016.html](https://www.kobelco.co.jp/chinese/releases/1193477_15016.html)
8. D.X. Wang, X. Ling, H. Peng et al, "Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation" , Vol. 50, pp. 343-352, Energy 2013.
9. 圖片出處 Wordpress.com