

出國報告(出國類別:實習)

廢熱回收鍋爐之設計、製造、測試、運維訓練研習

服務機關:核能火力發電工程處中部施工處

姓名職稱:張皓安 工程師

派赴國家/地區:美國/休士頓

出國期間:113年8月18日至113年9月1日

報告日期:113年10月16日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱: 廢熱回收鍋爐之設計、製造、測試、運維訓練研習

頁數:29 含附件:是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位職稱/電話

張皓安/台灣電力公司/核能火力發電工程處中部施工處/機械工程專員
/(04)26396002#6513

出國類別: 1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會6 其他

出國期間:113年8月18日至113年9月1日

派赴國家/地區:美國/休士頓

報告日期:113年10月16日

關鍵詞: 熱回收鍋爐，貫流式鍋爐，水平式鍋爐，垂直式鍋爐

內容摘要:(二百至三百字)

台灣高度依賴進口能源，因此推動天然氣燃料的複循環發電機組，以提升發電效率並減少污染物排放。熱回收鍋爐是複循環機組中的關鍵設備，能回收氣渦輪機排放的高溫廢氣，進一步提高整體發電效率，同時減少氮氧化物（NO_x）的排放。

報告中描述了貫流式三壓熱回收鍋爐的運作機制，涵蓋高壓、中壓和低壓各段的功能與設計，並說明了每段蒸汽生成的過程及其對系統效能的影響。SCR系統的功能也被提及，透過選擇性催化還原技術，將NO_x轉化為無害的氮氣和水，達到減少排放的效果。

此外，報告提到水平式與垂直式鍋爐、燃燒式與非燃燒式系統的差異，並介紹了設計時如何考量材料選擇、熱效率、系統靈活性及維護需求，以確保鍋爐的高效運行和可靠性。

目錄

| | | |
|----|-------------------|----|
| 壹、 | 出國目的: | 5 |
| 貳、 | 出國行程: | 5 |
| 參、 | 複循環機組發電概述..... | 6 |
| 肆、 | 熱回收鍋爐概述..... | 6 |
| 伍、 | 熱回收鍋爐設計概述..... | 13 |
| 陸、 | 貫流式三壓熱回收鍋爐概述..... | 17 |
| 柒、 | SCR 系統 | 23 |
| 捌、 | 實習心得及建議..... | 28 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1 複循環機組的配置..... | 6 |
| 圖 2 複循環機組之能量傳遞過程..... | 7 |
| 圖 3 水平式熱回收鍋爐與垂直式熱回收鍋爐示意圖..... | 9 |
| 圖 4 汽鼓式熱回收鍋爐與貫流式鍋爐示意圖..... | 12 |
| 圖 5 各種不同的爐管形式..... | 13 |
| 圖 6 不同的爐管排列方式..... | 13 |
| 圖 7 T-Q 圖中 Pinch Point 與 Approach Point 定義..... | 14 |
| 圖 8 如何透過減少 Pinch Point 增加效率..... | 14 |
| 圖 9 單壓系統..... | 15 |
| 圖 10 雙壓系統相較單壓系統增加熱效率示意圖..... | 16 |
| 圖 11 省煤器於水相位圖中作用區間..... | 18 |
| 圖 12 蒸發器於水相位圖中作用區間..... | 18 |
| 圖 13 過熱器於水相位圖中作用區間..... | 19 |
| 圖 14 高壓噴水減溫示意圖..... | 20 |
| 圖 15 低壓再循環系統示意圖..... | 22 |
| 圖 16 SCR 系統示意圖..... | 23 |
| 圖 17 脫硝反應化學反應式..... | 24 |
| 圖 18 SCR 系統注氨量對於 NO _x 去除效率的影響圖..... | 25 |
| 圖 19 SCR 系統組成設備..... | 26 |
| 圖 20 SCR 系統溫度對 NO _x 還原效率和催化劑活性的影響..... | 27 |

壹、 出國目的:

台灣本島自產能源十分貧乏，進口能源高達 98%。因此除努力開發再生能源之外，仍需持續開發電源，積極推動多項大型發電計畫，惟近年環保意識高漲，燃煤機組逐漸不受民眾青睞，以天然氣為燃料的複循環機組取而代之，原因在於機組除具有高效率、起停快速、負載反應快之優勢外，以天然氣為燃料，更具環保排放優點(低氮氧化物(NO_x)、幾乎無硫氧化物(SO_x)及粒狀物(PM))，包括大潭、興達、台中燃氣複循環機組等更新擴建計畫，期能維持合理備用容量目標，以提供充裕電力支持經濟發展。

配合政府能源政策，因應長期電力負載成長及維持區域供電穩定，規畫推動「台中電廠新建燃氣機組計畫」，本公司於台中發電廠 9 號和 10 號燃煤機組之南側規劃設置 2 部 130 萬瓩燃氣複循環機組(效率 64.1%)，涵蓋面積大約 13.4 公頃，其中熱回收鍋爐為燃氣複循環機組之主要設備，本次出國實習即為熱回收鍋爐的設計、製造、測試及運維訓練研習之訓練。

貳、 出國行程:

| 起始日 | 迄止日 | 機構名稱 | 國家城市名稱 | 詳細工作內容 |
|-----------|-----------|----------------------------|--------|---|
| 2024/8/18 | 2024/8/18 | | 台北-休士頓 | |
| 2024/8/19 | 2024/8/30 | GE Houston Learning Center | 休士頓 | 1. Heat Recovery Steam Generator-Operation and Maintenance 2. Balance of Plant-Operation |
| 2024/8/31 | 2024/9/1 | | 休士頓-台北 | |

參、 複循環機組發電概述

複循環機組為布雷登循環(Brayton Cycle)與朗肯循環(Rankine Cycle)二種循環之組合。氣渦輪機(Gas Turbine)為布雷登循環，空氣由濾清消音器吸入，經壓縮燃燒後推動氣渦輪機發電，排放之煙氣導入熱回收鍋爐回收，再經由煙囪排入大氣，至此完成布雷登循環之運作;汽輪機(Steam Turbine)為朗肯循環，利用熱回收鍋爐產生的蒸汽藉由主蒸汽管依其壓力等級，引入各級汽輪機做功並驅動發電機發電，汽輪機排出之蒸汽進入連接之冷凝器，藉由海水冷卻使其回復冷凝水狀態，再由泵浦送飼水回熱回收鍋爐，以持續下個發電循環。一般來說，氣渦輪機的效率約 30%~40%，經熱回收鍋爐的回收，可將效率再增加約 30%，台中燃氣計畫採用的氣渦輪機為 GE 公司設計 7HA.03 機型，熱效率約 43.3%，透過熱回收鍋爐的廢熱回收，可將效率提升至 64.1%。

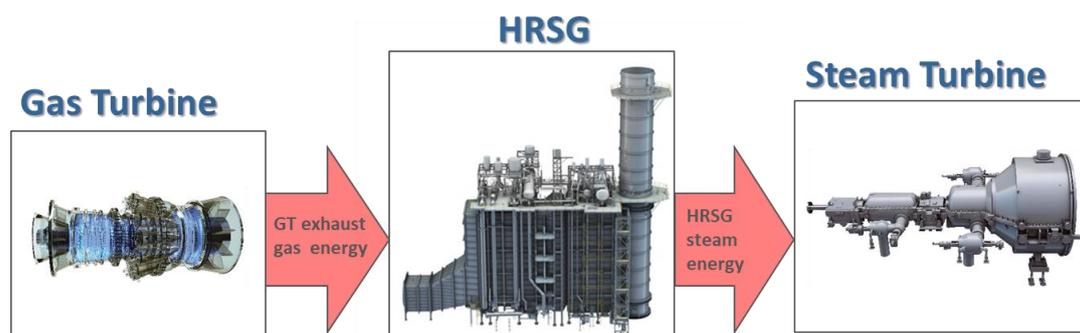


圖 1 複循環機組的配置

肆、 熱回收鍋爐概述

熱回收鍋爐(Heat Recovery Steam Generator ,HRSG)，雖然中文翻譯為鍋爐，但實際上為一大型熱交換器，在複循環機組中扮演提升效率的角色，將氣渦輪機排出煙氣導入熱回收鍋爐回收，與注入鍋爐內的飼水進行熱交換，將水加熱至高溫、高壓的過熱蒸汽並送至汽輪機做功，高溫廢氣則在熱交換過程中透過 SCR 系統降低 NO_x 濃度，最後由煙囪排出。

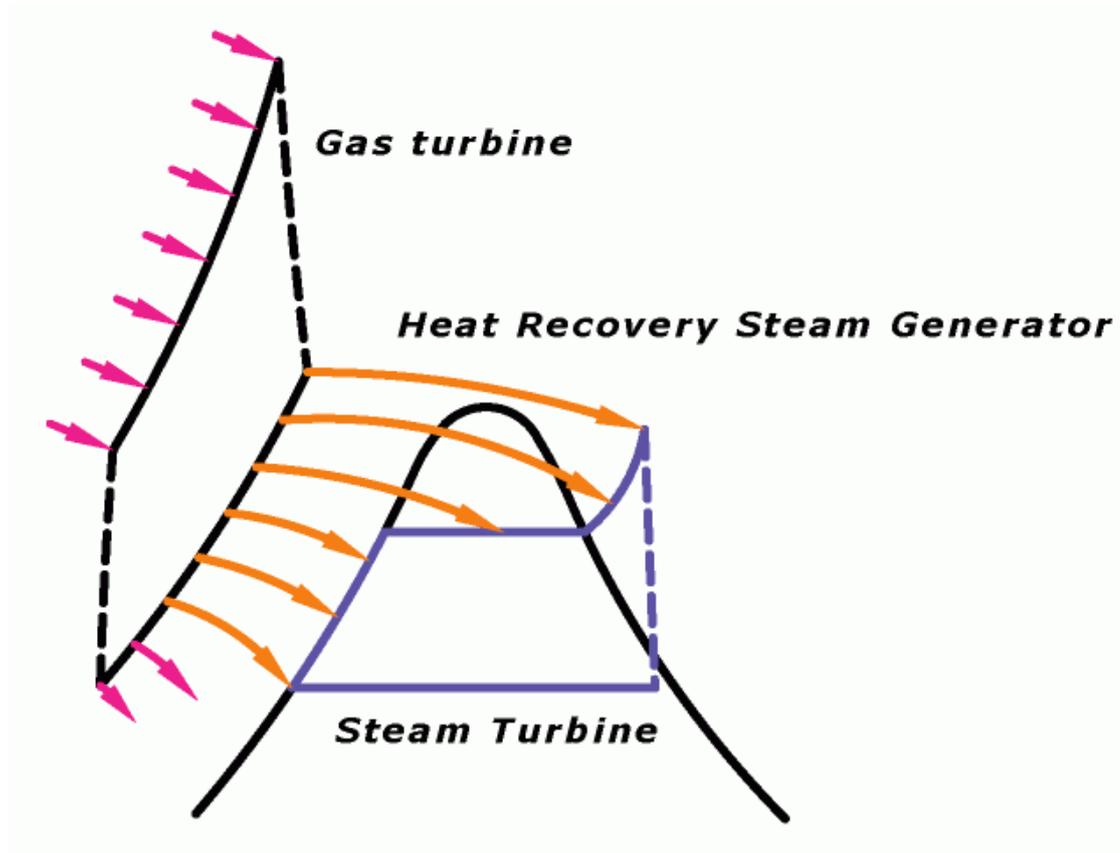


圖 2 複循環機組之能量傳遞過程

與電廠中的大多數子系統不同，熱回收鍋爐不是標準的「現成」設備，而是根據機組的具體特徵來設計的，例如：氣渦輪機的熱功率、燃料類型、煙氣溫度、啟、停速率以及是否為基載機組，所有這些參數都必須考慮，其型式更會依據在廠內的佈置而有所不同(如場地較小則必需採用垂直式鍋爐)。這也是為什麼熱回收鍋外觀可能非常相似，但不同的電廠的設計卻不盡相同。

熱回收鍋爐依煙氣流向、是否有輔助燃燒設備、是否有汽鼓有各種不同種類，分類如下：

一、 煙氣流向:

依煙氣流向可分為垂直式鍋爐及水平式鍋爐，主要在設計和配置上有以下幾個關鍵差異：

(一).氣流方向：

1. 垂直式：在垂直式配置中，廢氣是從下往上垂直接動的。這種設計使得重力可以幫助排除冷凝物，減少管路內的積水問題。
2. 水平式：在水平式配置中，廢氣以水平方式流動，經過蒸汽生成管束。這種設計相對簡單，並且適合安裝在空間較大的場地。

(二).佔地面積與空間利用：

1. 垂直式：這種配置通常在佔地面積上較小，適合用於空間有限的場地。
2. 水平式：這種配置需要較大的水平空間，通常在佔地面積上較大，但高度較低。

(三).維護方便性：

1. 垂直式：由於設計上需要考慮重力因素，需要更複雜的維護程序，而且垂直布置的部件更難以接近維護。
2. 水平式：水平設計在檢查和維修上通常較為方便，尤其是對於管路和其他設備的檢查較為容易。

(四).熱效率：

兩者在熱效率上可能相差不大，但由於垂直式設計更有利於自然對流的形成，可能在某些應用中會更有優勢，尤其是在冷凝物排放方面。水平式熱回收鍋爐在設計和操作上通常會增加一些設備來處理冷凝物問題，以確保系統的持續穩定運行。

(五).應用場合：

1. 垂直式：通常用於需要減少佔地面積的場地，特別是工業應用和需要高度整合的發電廠。
2. 水平式：通常用於大規模的複循環發電廠，由於其相對簡單的設計和較大的空間要求。

總結來說，垂直式和水平式熱回收鍋爐的選擇取決於場地條件、設備配置要求和維護需求。垂直式更適合空間有限的應用，而水平式則更適合空間充裕且注重維護便利性的場地。水平式鍋爐為市場上的主流，亦為台中燃氣計畫採用的型式。

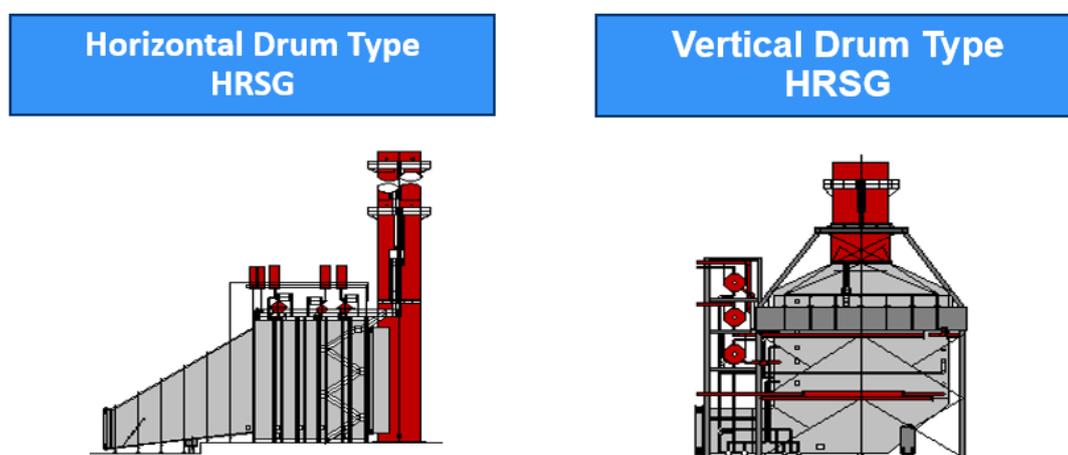


圖 3 水平式熱回收鍋爐與垂直式熱回收鍋爐示意圖

二、 是否有輔助燃燒設備（Supplementary Firing）

熱回收鍋爐依是否有燃燒設備分為燃燒式及非燃燒式，主要差異如下：

(一).熱效率與蒸汽產量：

1. 燃燒式：輔助燃燒設備可以通過額外燃燒燃料來提高廢氣溫度，從而增加蒸汽產量和提升熱效率。一般來說氣渦輪機在夏季會有出力不足的問題，燃燒式熱回收鍋爐可透過燃燒燃料彌補此缺點。
2. 非燃燒式：完全依賴進入爐內的廢氣熱量，因此蒸汽產量和效率取決於氣渦輪機排出的廢氣溫度，通常受限於固定負載條件。

(二).操作靈活性：

1. 燃燒式：系統運行更加靈活，能在負載需求增加時啟動輔助燃燒器來提升蒸汽產量，適應變動的能源需求。例如，在高峰負載時可短時間內提高蒸汽的生成量。
2. 非燃燒式：由於缺少額外的熱源，通常只能在固定的運行範圍內工作，操作靈活性相對較低。

(三).燃料使用與運轉成本：

1. 燃燒式：雖然輔助燃燒能增加蒸汽產量，但也需要額外的燃料，因此運轉成本較高。在燃料價格波動較大時可能面臨較高的成本壓力。
2. 非燃燒式：完全依賴於氣渦輪機的廢氣，因此運轉成本較低，沒有額外燃料的消耗問題。

(四).系統設計與複雜性：

1. 燃燒式：設計上需要加入燃燒系統和控制設備，使得整個系統更加複雜。此外，還需要考慮安全問題，如防止過熱和燃燒過程中的污染物排放。
2. 非燃燒式：結構較為簡單，沒有燃燒器和相關控制系統，因而在設計、安裝和維護上相對容易。

(五).應用場合：

1. 燃燒式：常用於需要更高蒸汽產量的應用場合，例如在高峰時期的電力需求增長，或在工業過程中需要額外的熱能，非常適合於那些要求靈活調度的複循環發電廠。
2. 非燃燒式：通常用於標準運行的複循環發電廠，這些設施的負載變化相對較小，因此不需要增加輔助燃燒設備來提升產能。

總結來說，有輔助燃燒設備的熱回收鍋爐具備更高的靈活性和蒸汽產量，但運行成本也較高，適合負載變化大的應用場合。而沒有輔助燃燒設備的熱回收鍋爐則更經濟實惠，適合穩定運轉的情境。考量額外增加的設備成本及操作

維護上之複雜性，即使燃燒式熱回收鍋爐有相較靈活的操作性，台中燃氣計畫採用非燃燒式鍋爐。

三、 熱回收鍋爐可依高壓段採用汽鼓或汽水分離器分為汽鼓式(Steam Drum Type)及貫流式(Once Through Type)主要差異如下:

(一).結構設計

1. 貫流式：沒有傳統的汽鼓，水和蒸汽在系統內部一次性流動，水進入後經過加熱直接轉化為蒸汽。系統內部的流體流動是連續的，從進水端到出蒸汽端是一次性流程，不需要中間儲存的過程。
2. 汽鼓式：配有汽鼓，汽鼓用來分離水和蒸汽並且在系統中儲存部分水和蒸汽。蒸汽和水可以在汽鼓內循環，進行多次加熱直到達到所需的蒸汽流量和壓力。

(二).運行模式

1. 貫流式：運行方式更加靈活，可以適應較大的負載變化，特別適合快速啟動和停機的操作。由於沒有汽鼓，水流量小且壓力變化快，啟動時間比汽鼓式短。
2. 汽鼓式：適合於穩定、連續的運行模式，不容易受到負載變化的影響。汽鼓可以在負載變動時穩定系統壓力和蒸汽流量，但啟動和停機時間較長。

(三).操作控制與穩定性

1. 貫流式：因為沒有汽鼓，操作過程中的控制系統需要更精確地調整水和熱量，以保持穩定的蒸汽生成。對於水質要求高，因為水質不良可能直接影響蒸汽品質和設備壽命。
2. 汽鼓式：汽鼓提供了緩衝作用，使系統在操作上更加穩定，對於水質和操作控制的要求相對較低。有一定的水儲存量，可以在短時間內提供穩定的蒸汽流量。

(四).效率與應用

1. 貫流式：通常熱效率較高，因為它能夠更有效地利用廢氣熱量進行一次性加熱。常用於需要快速啟動和頻繁負載變化的應用場合，如分佈式能源系統或需要靈活性較高的發電廠。
2. 汽鼓式：適合於大規模複循環發電廠，能在穩定的運行條件下持續提供高質量的蒸汽。優勢在於能夠在多負載條件下保持穩定運行，適合長時間高負荷運行的工業場合。

(五).維護與壽命

1. 貫流式：由於設計較簡單且沒有汽鼓，維護成本可能較低，但對於管道內的沉積物或結垢問題更敏感。
2. 汽鼓式：雖然結構複雜一些，但運行穩定性高，維護時能夠檢查和清潔汽鼓內部，延長設備的使用壽命。

總結來說，貫流式熱回收鍋爐適合快速啟動、負載變化大的應用，對水質要求高，效率較高，但控制難度較大。汽鼓式熱回收鍋爐適合穩定運行的應用，系統穩定性強，啟動時間較長，但更容易維護。考量現今環境下，快速啟停調度的需求日漸提高，且貫流式相較汽鼓式可減少汽鼓，台中燃氣計畫採用貫流式熱回收鍋爐。

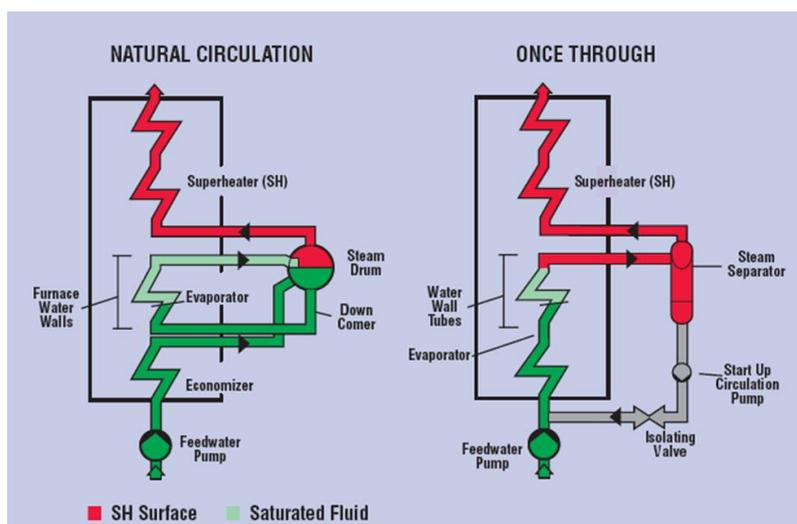


圖 4 汽鼓式熱回收鍋爐與貫流式鍋爐示意圖

伍、 熱回收鍋爐設計概述

在設計熱回收鍋爐時，有許多關鍵因素需要考慮，以確保系統的效率、可靠性和經濟性。以下是設計時的幾個主要重點：

(一).熱效率與熱能回收

1. 最大化廢熱利用：設計的目標是將氣渦輪機排出的廢氣熱能最大化地回收並轉化為蒸汽。這需要適當配置各熱交換元件（如 Economizer、Evaporator 和 Superheater）並增加爐管的熱交換面積(將爐管設計為鰭片，增加與水接觸面積)或是改變爐管的排列方式以提高整體熱效率(增加流體擾動，提高熱交換效率)。



圖 5 各種不同的爐管形式(越右邊熱交換效率越好)

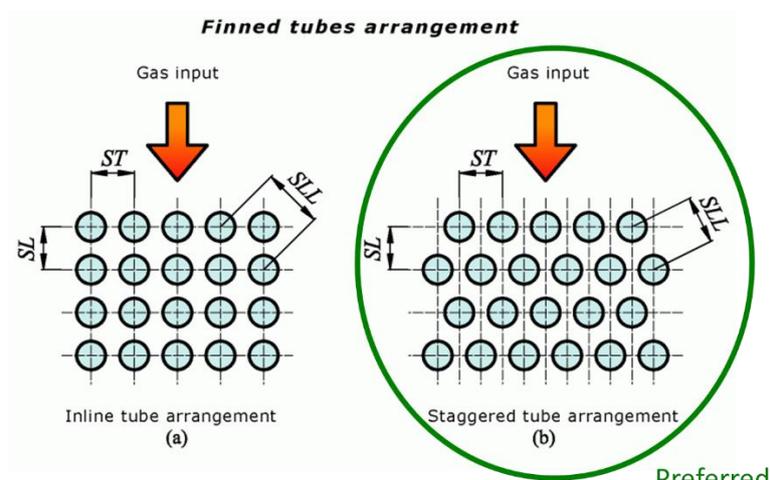


圖 6 不同的爐管排列方式(右側的熱效率較好)

2. Pinch Point 與 Approach Point：這兩個參數是設計中的關鍵。Pinch Point 表示廢氣和流體間的最小溫差，Pinch Point 越小代表熱量能更有效地從廢氣傳遞到蒸汽或水，也代表效率越好。而 Approach Point 表示給水溫度與飽和蒸汽之間的溫差。這些參數會直接影響熱回收鍋爐的效率，效率越小意味著運轉花費的成本越少。

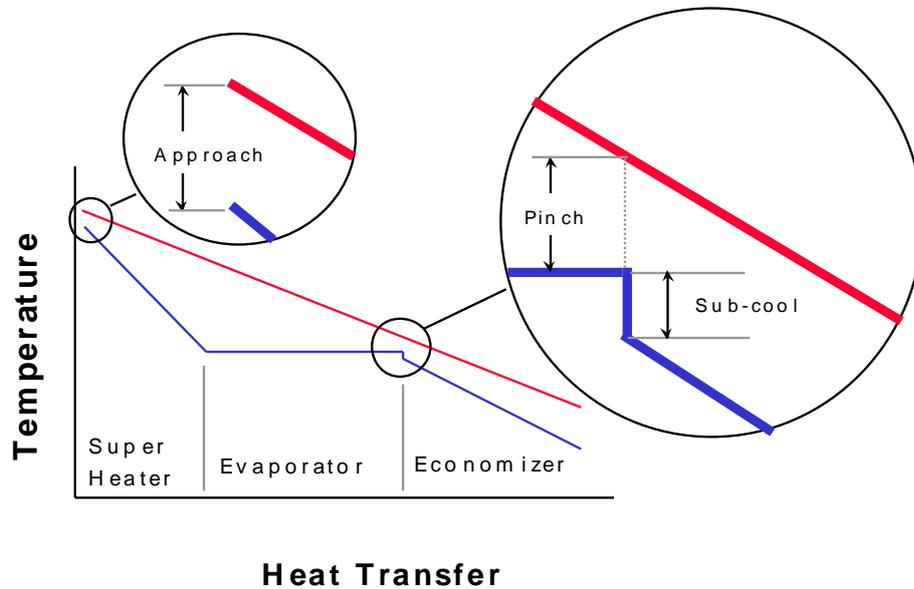
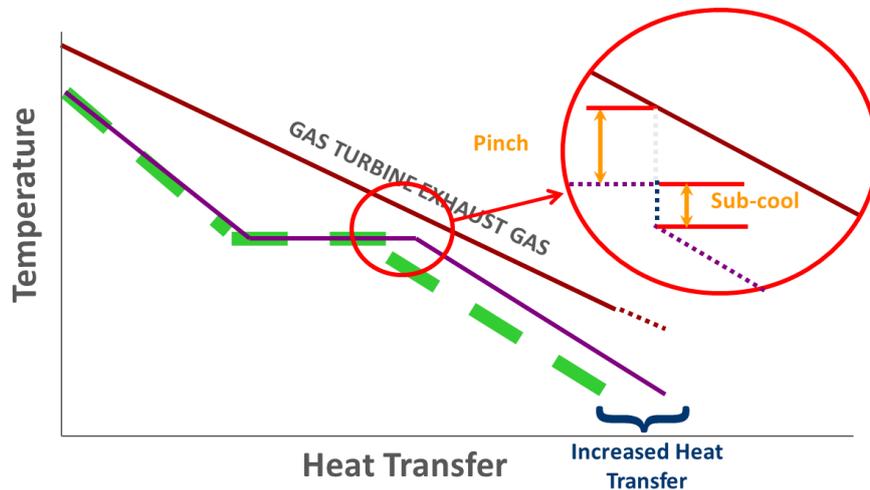


圖 7 T-Q 圖中 Pinch Point 與 Approach Point 定義



Reduced Pinch & Sub-cool Needs More Surface but Increases Heat Transfer & Yields More ST Power

圖 8 如何透過減少 Pinch Point 增加效率

(二).系統靈活性

1. 負載變化適應性：熱回收鍋爐需要能夠在不同運行條件下穩定運行，包括快速啟動、頻繁負載變化和部分負載情況。因此，設計時必須考慮系統的靈活性，以應對複循環發電廠的變動負荷需求。
2. 輔助燃燒器的選擇：在有輔助燃燒器的熱回收鍋爐設計中，需考慮如何在不同狀況下有效地啟動和調節輔助燃燒器，以增加蒸汽產量。

(三).材料選擇

1. 耐高溫 and 耐腐蝕性：材料必須能承受高溫和高壓環境，特別是在 Superheater 和 Evaporator 中。通常使用低合金鋼和不銹鋼以滿足耐高溫及抗腐蝕的需求。
2. 成本與壽命平衡：選材時需要在成本和壽命之間取得平衡。雖然高性能材料能提升設備壽命和效率，但成本較高，因此設計時需根據應用需求選擇合適的材料。

(四).設計配置

1. 多壓設計：對於大型複循環機組，可以設計多壓熱回收鍋爐（如雙壓或三壓系統）來提升整體效率。這些系統使用不同壓力等級的蒸汽來進行分階段回收熱能，以達到更高的效率。

Typical HRSG Heat Release Diagram Single Pressure System

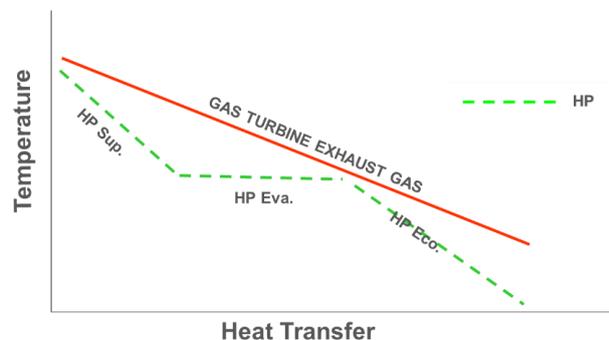


圖 9 單壓系統

Typical HRSG Heat Release Diagram Two Pressure System

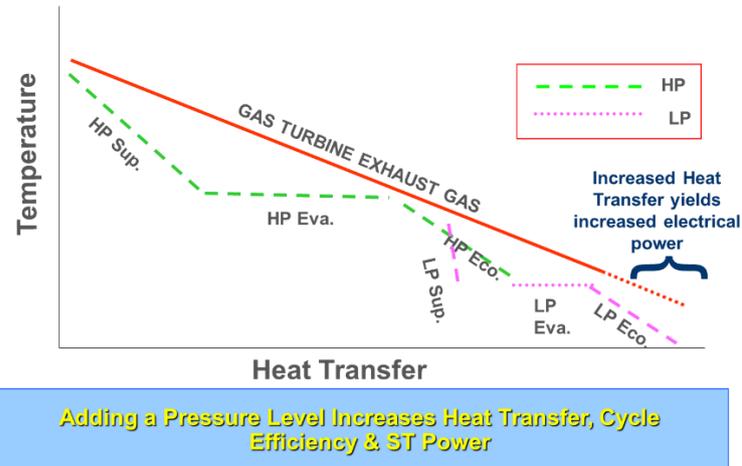


圖 10 雙壓系統相較單壓系統增加熱效率示意圖

(五).控制系統與安全性

1. 精確控制：熱回收鍋爐的控制系統需要能夠精確調節水、蒸汽和燃燒過程，以確保穩定運行並避免因溫度或壓力過高而導致的設備損壞。
2. 過熱保護：設計中需要考慮到過熱保護措施，以防止蒸汽溫度過高對系統元件造成損壞。

(六).水質管理

1. 水質處理：為了防止結垢和腐蝕，熱回收鍋爐設計需要考慮到適當的水質處理系統。水中的雜質可能會影響設備性能，縮短壽命甚至引發故障。
2. 水/蒸汽循環控制：確保水和蒸汽的流量控制得當，以防止因流速不均或氣泡形成而引發的熱應力。

(七). 維護與檢修設計

1. 可維護性設計：設計熱回收鍋爐時應考慮到維護和檢修的方便性，例如易於拆卸、更換元件和檢查關鍵部位，以縮短停機時間並降低維護成本。
2. 壽命評估：使用壽命設計考量，選擇材料和設計延長熱回收鍋爐的使用壽命，同時降低長期的維護和更換成本。

總結來說，熱回收鍋爐設計的重點在於最大化熱能回收效率、提升系統靈活性、選用合適的材料和佈局配置，以及保證系統的安全性和環保要求。這些設計因素需要綜合考量，以達到高效能、低成本和長壽命的運行目標。

陸、 貫流式三壓熱回收鍋爐概述

台中燃氣計畫採用的為貫流式三壓熱回收鍋爐（Once-Through Triple Pressure 熱回收鍋爐）設計中，高壓、中壓和低壓段採用了不同的設備配置，以最大化系統效率並適應不同的運行需求。以下是詳細介紹貫流式三壓熱回收鍋爐的各壓力段，包括高壓段使用分離器（Separator）以及中壓和低壓段使用汽鼓（Steam Drum）的設計，一般來說，三壓系統都會有省煤器（Economizer，又稱 Feedwater Heater）、蒸發器（Evaporator）和過熱器（Superheater），在水加熱為過熱蒸汽的過程中各有不同的功能，以下是它們之間的差異與功能介紹：

(一). 省煤器（Economizer）

1. 功能：省煤器的主要功能是回收鍋爐或蒸汽發生器排放的廢氣中的餘熱，以預熱進入鍋爐的給水。
2. 位置：省煤器通常位於汽鼓或蒸發器前端

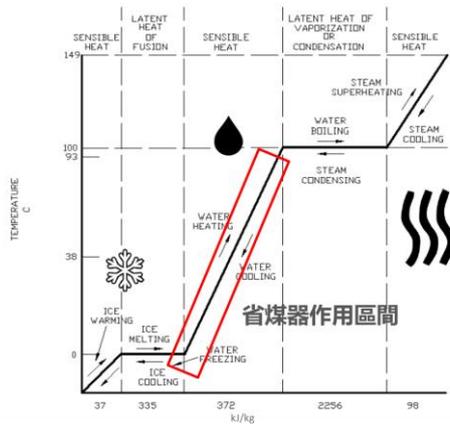


圖 11 省煤器於水相位圖中作用區間

(二).蒸發器 (Evaporator)

1. 功能：蒸發器的主要功能是將加熱的液態水轉化為蒸汽。
2. 位置：蒸發器位於鍋爐的核心部分，通常是在省煤器之後，直接接受來自省煤器的預熱水。

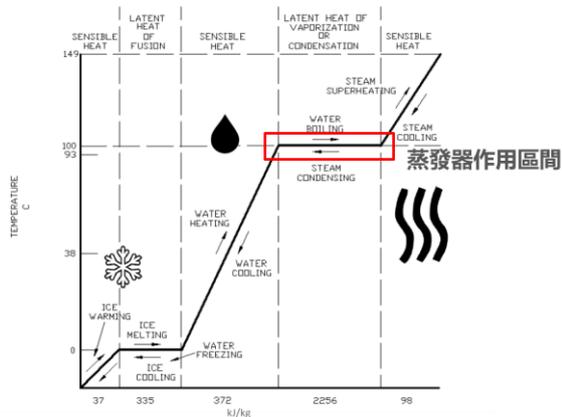


圖 12 蒸發器於水相位圖中作用區間

(三).過熱器 (Superheater)

1. 功能：過熱器的主要功能是將蒸汽進一步加熱，將其轉化為過熱蒸汽。過熱蒸汽的溫度高於其飽和點，在這個過程中，過熱器不會使蒸汽相變，只是提高其熱能，這樣可以提高蒸汽輪機的效率。
2. 位置：過熱器通常位於汽鼓或汽水分離器之後，直接接受來自蒸發器的蒸汽，並加熱至所需的過熱溫度。

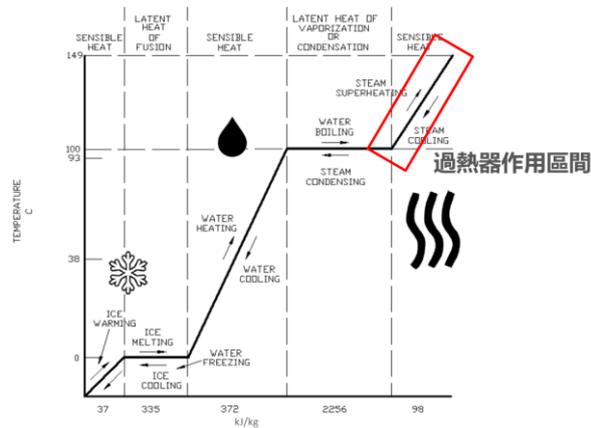


圖 13 過熱器於水相位圖中作用區間

省煤器、蒸發器和過熱器在熱回收系統中扮演著不同的角色，分別負責提高能效、產生蒸汽和增加蒸汽的熱能。這三者的協同運作使得熱回收鍋爐能夠以最佳效率運行，滿足工業和發電需求。

(一).高壓段 (High-Pressure, HP)

1. 設備組成:

- (1). 高壓省煤器 (HP Economizer)：將進入系統的飼水預熱到接近飽和溫度，以減少蒸發過程中的能量需求。
- (2). 貫流式蒸發器(Once Through Evaporator): 加熱後的飼水通過蒸發器的一次性加熱，轉化為蒸汽，避免水在設備內部反復循環，減少了熱能損失，並提高了整體效率
- (3). 汽水分離器 (Separator)：從蒸汽和水的混合物中有效地分離出乾燥的蒸汽
- (4). 高壓過熱器 (HP Superheater)：將飽和蒸汽進一步加熱到過熱蒸汽狀態，使其具有更高的溫度和壓力，適合用於驅動高壓汽輪機。
- (5). 高壓過熱器噴水減溫(HP Desuperheater):透過噴入從高壓省煤器引入的水控制過熱蒸汽的溫度，以避免爐管溫度過高造成損壞。

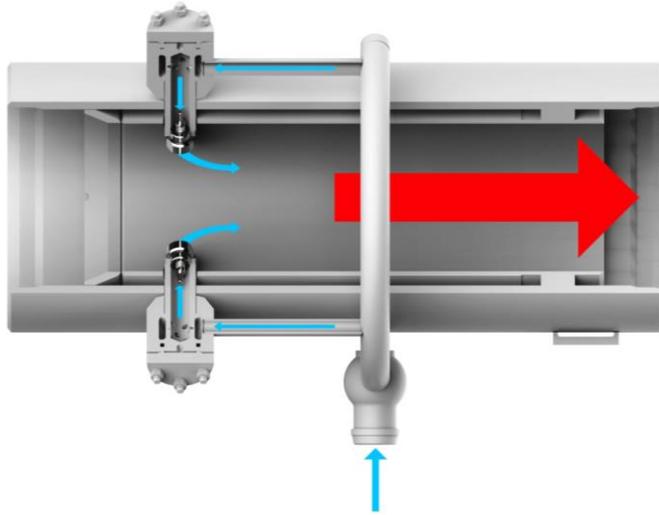


圖 14 高壓噴水減溫示意圖

2. 功能與設計特點：

- (6). 高壓段是三壓熱回收鍋爐中的主要熱回收區域，用於產生高溫高壓的過熱蒸汽。
- (7). 在貫流式熱回收鍋爐中，高壓段採用分離器（Separator），而不是傳統的汽鼓。分離器的作用是有效地將蒸汽與水分離，確保生成高質量的過熱蒸汽。

3. 使用貫流式的優點：

- (1). 快速響應與動態運行需求：高壓段的設計需要在負載變化時快速反應。分離器結構更為簡單，能夠減少系統啟動和調整時間，適應快速變化的運行條件。
- (2). 結構緊湊：相較於汽鼓，分離器的設計更緊湊，占地面積小，適合高壓操作條件，減少了運行中的滯留水量，有助於提高整體效率。
- (3). 降低維護需求：分離器不需像汽鼓那樣頻繁的維護檢查，這在高壓運行環境下尤為重要。

4. 壓力和溫度範圍：

高壓段的蒸汽壓力通常在 80 到 160 bar 之間，蒸汽溫度可達 500-600°C，這需要選用耐高溫和高压的材料，如合金鋼或耐熱不銹鋼。

(二). 中壓段 (Intermediate-Pressure, IP)

1. 設備組成:

- (1). 中壓省煤器 (IP Economizer) :將給水預熱到中壓蒸發器所需的溫度，以準備進行蒸發過程。
- (2). 中壓汽鼓(IP Steam Drum)及中壓蒸發器 (IP Evaporator) :在此過程中，預熱水被進一步加熱並轉化為中壓飽和蒸汽。
- (3). 中壓過熱器 (IP Superheater) :將飽和蒸汽加熱成中壓過熱蒸汽。
- (4). 再熱器(Reheater) :中壓過熱蒸汽與經過汽輪機作功的高壓蒸汽混合後再送入中壓過熱器加熱，提高熱能，增加熱回收效率。
- (5). 再熱器噴文減溫(Reheater Desuperheater):與高壓噴水減溫一樣，為了防止再熱過熱蒸汽溫度過高，引入中壓省煤器的水噴入再熱器中降低溫度，構造和圖 14 相同。

2. 功能與設計特點：

- (1). 中壓段用於進一步回收廢氣中的熱量，生成中壓蒸汽。
- (2). 中壓段通常使用汽鼓 (Steam Drum)，用以穩定水和蒸汽的循環，確保未完全蒸發的水能夠回到蒸發器，進一步進行加熱。

3. 壓力和溫度範圍：

中壓段的蒸汽壓力通常在 20 到 40 bar 之間，蒸汽溫度約為 350-450°C，適合選用耐熱合金鋼製造。

(三). 低壓段 (Low-Pressure, LP)

1. 設備組成:

- (1). 飼水加熱器 (Feedwater Heater) :在此階段，給水被加熱到低壓蒸發器所需的溫度。
- (2). 低壓再循環泵(LP Recirculation Pump):因飼水加熱器位於煙氣尾端，爐管表面溫度如低於在此溫度、壓力下的露點溫度，會造成水結露於表面造成腐蝕(即為露點腐蝕)，於是將從飼水加熱器中間或尾端(取決於煙氣硫份，硫份越高，露點越高)的水與低壓省煤器入口的水混合以增加溫度。

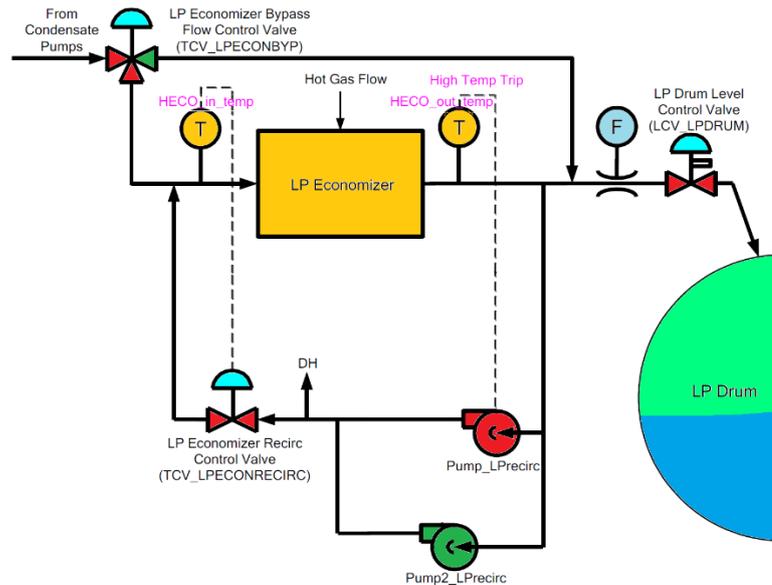


圖 15 低壓再循環系統示意圖

- (3). 低壓汽鼓(LP Steam Drum)及低壓蒸發器 (LP Evaporator)：將低壓省煤器加熱過的水進一步加熱並轉化為低壓飽和蒸汽。
- (4). 低壓過熱器 (LP Superheater)：將飽和蒸汽加熱成低壓過熱蒸汽，用於驅動低壓蒸汽輪機或其他低壓應用。

2. 功能與設計特點：

- (1). 低壓段負責回收廢氣中的最後一部分低溫熱能，用於生成低壓蒸汽。
- (2). 同樣地，低壓段也使用汽鼓 (Steam Drum)，同樣用以穩定水和蒸汽的循環，確保低壓蒸汽生成過程的穩定性。

3. 壓力和溫度範圍：

低壓段的蒸汽壓力通常在 5 到 10 bar 之間，蒸汽溫度約為 200-250°C。材料多採用較低成本的碳鋼。

總結來說，在貫流式三壓熱回收鍋爐設計中，高壓段使用分離器，而中壓和低壓段使用汽鼓的組合設計，能夠充分利用每個壓力段的特性，以達到最高的系統效率和靈活性。這種配置能讓高壓段快速產生蒸汽，中壓和低壓段則提供穩定的蒸汽生產和循環能力，適應不同的運行需求和狀況變化。這樣的設計不僅提高了整體系統的熱效率，還能保證設備的穩定運行和長期可靠性，

是現代複循環發電廠的理想選擇。

柒、 SCR 系統

選擇性催化還原系統（Selective Catalytic Reduction, SCR）是常見的降低氮氧化物（NO_x）排放的技術之一。廣泛應用於燃煤電廠、燃氣輪機、汽車排氣處理以及其他工業排放源。SCR 系統透過化學反應將 NO_x 轉化為氮氣（N₂）和水（H₂O），從而顯著減少對環境的污染。

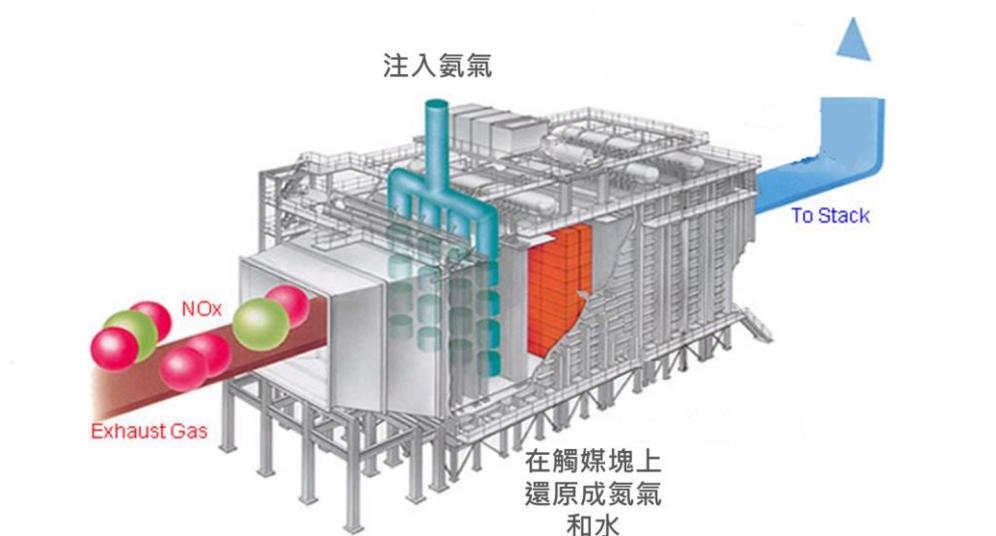


圖 16 SCR 系統示意圖

(一). 工作原理

SCR 系統的工作原理是利用還原劑（氨氣或尿素）在催化劑(Catalyst)的幫助下，將氮氧化物（NO_x）轉化為無污染的氮氣（N₂）和水（H₂O），即為脫硝反應。其化學反應方程式如下：

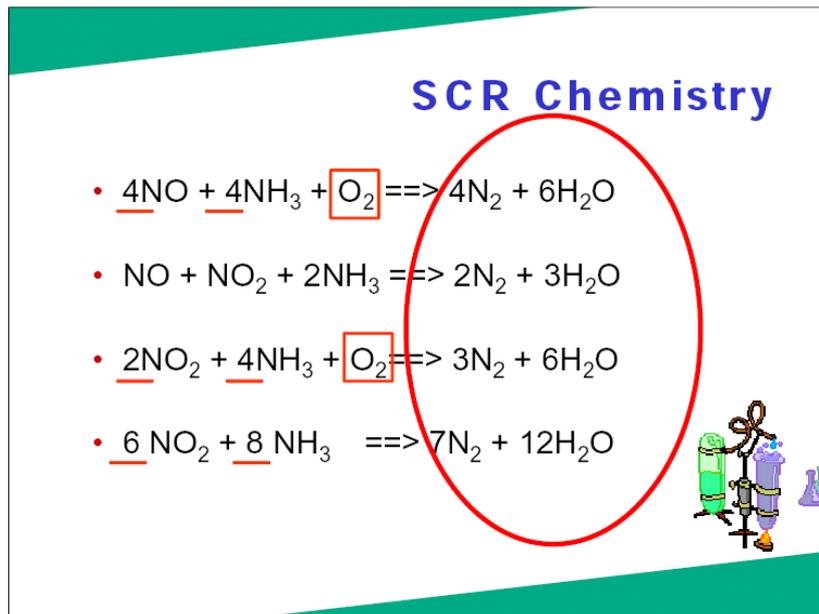


圖 17 脫硝反應化學反應式

(二).系統組成

SCR 系統通常由以下幾個主要部分組成：

1. 氨氣供應系統：

儲存氨氣 (NH₃) 的區域，一般會以液氨形式儲存於桶槽內，這些還原劑會被注入到廢氣中，與 NO_x 進行化學反應。

2. 氨氣注入控制設備(Ammonia Flow Control Unit, AFCU)：

AFCU 會依據廢氣中 NO_x 的濃度，調整氨氣的注入量，確保氨氣的用量足夠降低 NO_x 的濃度至法規或環評要求，從而達到最佳的還原效果，以下注入的控制重點:

(1) 氨氣注入過多

如果氨氣注入量過多，未參與反應的氨氣可能會從系統中泄漏，造成環境問題，稱為氨氣泄漏 (Ammonia Slip)。這不僅會增加運行成本，還會對環境造成污染。另外為了防止氨氣引發的爆炸風險，必須透過空氣將濃度控制在 15% 到 28% 的爆炸範圍之外。

(2) 氨氣注入過少

若氨氣注入量過少，則無法完全還原廢氣中的 NO_x，降低 SCR 系統的去除效率，導致 NO_x 排放超標。因此，保持適當的氨氣注入量對於有效去除 NO_x 十分重要。

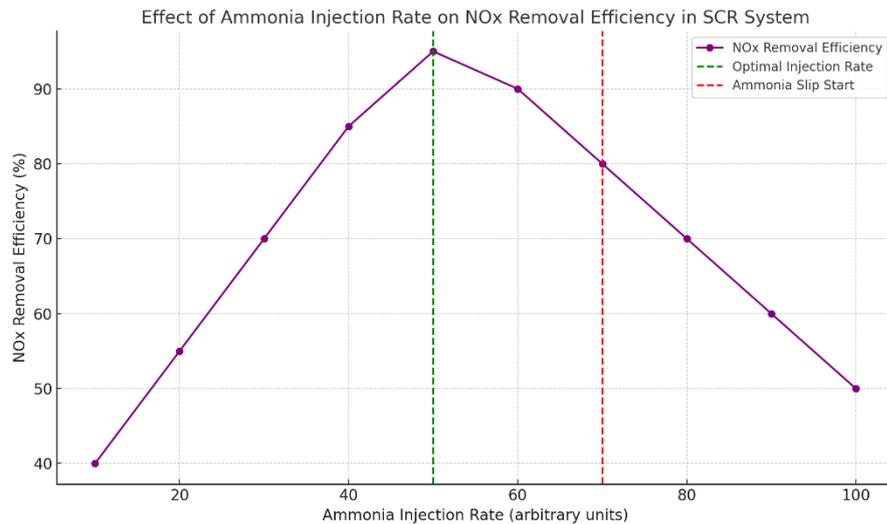


圖 18 SCR 系統注氨量對於 NO_x 去除效率的影響圖

(3) 氨氣注入格柵(Ammonia Injection Grid, AIG)

由於需注入爐內的範圍很大且廢氣中 NO_x 並非均勻分布，故利用控制閥或手閥調整各注入口的流量。

(4) 觸媒塊(Catalyst)：

廢氣和還原劑的混合物進入催化劑層，在催化劑的作用下，NO_x 被還原為無害的氨氣和水。常見的催化劑材料包括釩五氧化物 (V₂O₅)、二氧化鈦 (TiO₂) 和鎢氧化物 (WO₃) 等。



圖 19 SCR 系統組成設備

(三).優點

1. 高效的 NO_x 去除效率：

SCR 系統的 NO_x 去除效率可以達到 80% 或更高(依據控制的需求，以通霄電廠 1~3 號為例，NO_x 排放濃度可控制至 8 ppm 以下)，這使其成為最有效的 NO_x 控制技術之一。

2. 適應性強：

SCR 系統可以應用於多種燃料類型和不同工業過程，包括燃煤、燃油、燃氣鍋爐以及內燃機等。

3. 穩定運行：

在正常運行條件下，SCR 系統能夠長期保持穩定和高效的 NO_x 去除效果。

溫度限制

SCR 系統最佳反應溫度為 300°C~400°C。在這個溫度範圍內，氨氣 (NH₃) 和氮氧化物 (NO_x) 的還原反應能夠高效進行，當溫度低於 300°C 時，催化劑的活性會顯著降低，NO_x 的還原效率下降。當溫度超過 400°C，氨氣可能會發生熱分解，生成氮氣 (N₂) 和氫氣 (H₂)，而不是與 NO_x 反應，這會降低 SCR 系統的去除效率。此外，長時間暴露在過高溫度下，可能會導致催化劑的結構受損，縮短催化劑的使用壽命，一般壽命為 5 年，但實務上會依據觸媒塊的活性來判斷是否需更換。

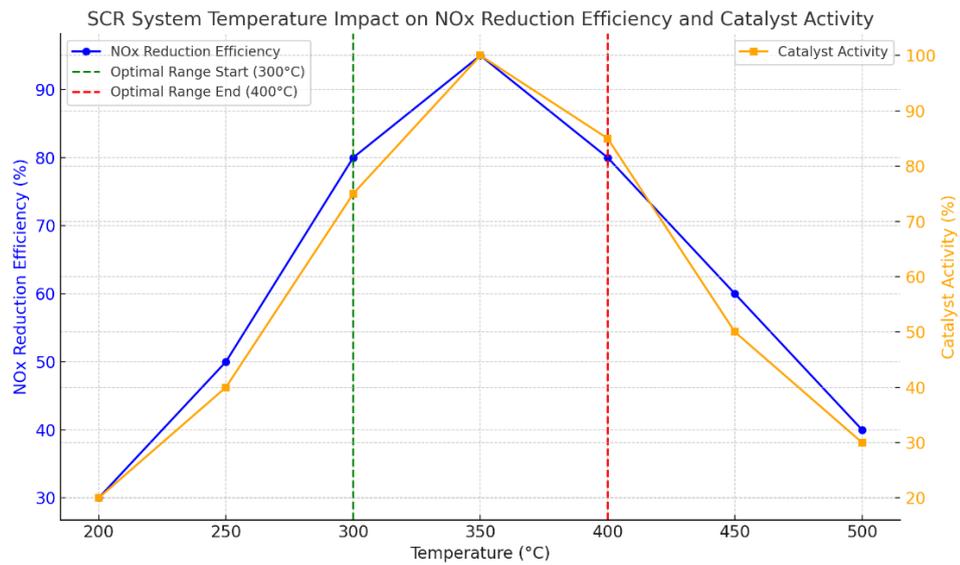


圖 20 SCR 系統溫度對 NO_x 還原效率和催化劑活性的影響

捌、 實習心得及建議

(一).實習心得:

本次有幸受派前往休士頓的 GE 訓練中心進行實習，能夠與經驗豐富的講師面對面交流，深入探討機組的設計及運轉經驗，實在是難能可貴的機會。以往對於熱回收鍋爐的認識大多為施工方面的技術，無法完整了解各項設備的設計原理以及運維的重點，在此次實習的過程中，對熱回收鍋爐的設計、相關設備的功能以及運維的重點有了全面的認識。

最令我印象深刻的是講師 Jeff 的豐富經歷，他擁有 30 年燃煤電廠及 10 年複循環機組的運轉經驗，不僅精通熱回收鍋爐，還對 GT、ST 的運轉與設計，以及控制系統都有深入了解。當我表達對他的多面向專業能力的驚訝時，他回應說，在美國這其實很常見，因為當地的電廠有 98% 以上為民營電廠，為了控制人力成本，操作員必須精通每個系統。這讓我深感自愧不如，回想進公司六年以來，我似乎只在熱回收鍋爐領域有較深入的理解，對於 GT 或 ST 卻僅是一知半解。不過，我認為這都是經驗的累積，而這次實習也為我未來的學習方向指引了目標。

最後感謝中部施工處及核火工處各級長官的賞識，讓我可以到自小嚮往的美國實習，德州當地的人文風情、食物，還有美國職棒的球場體驗都是很棒的體驗，也要向這次實習計畫中提供協助的其它同仁致謝，並感謝奇異公司協助安排這次的實習機會。



與 GE 講師合影(由左至右為職、熱回收鍋爐講師 Jeff、GE 訓練中心經理 Jim、核火工處張烜華、電氣講師 Zarekri)

(二). 實習建議

這次的實習對於奇異公司的資訊系統印象非常深刻，訓練資料非常有系統化，講師在講授完基礎的概念後，可以在奇異公司的系統中得到相當多的資料，透過許多設計實例來印證上課的內容。本人深感對於本公司在取得資料這部份並不容易，幾乎手頭上的資料都是在訓練所上課或是包商提供的課程取得，其實本公司已有多年的歷史，也有相當多的電廠建廠及運維經驗，建議可以創建一個資訊系統讓全公司的同仁分享各自的檔案並系統化分類供全公司同仁學習，尤其近年公司召用許多新人，相信在經驗的傳承能更有成效。