

出國報告（出國類別：實習）

# 興達計畫廢熱回收鍋爐(HRSG)之設計、 製造、測試、運維訓練報告

服務機關：台灣電力公司

單位	姓名	職稱
林口發電廠	陳信聰	機械工程師

派赴國家：美國

出國期間：112年09月30日至112年10月01日

報告日期：112年11月08日

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：興達計畫廢熱回收鍋爐(HRSG)之設計、製造、測試、運維訓練  
報告

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：

陳信聰	台灣電力公司	林口發電廠	主辦氣灰設備 專員	(02)26062221#5055
-----	--------	-------	--------------	-------------------

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：112 年 09 月 17 日至 112 年 10 月 01 日

出國地區：美國

報告日期：112 年 11 月 08 日

分類號/目：

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

興達計畫廢熱回收鍋爐設備係由美商奇異公司(GE)負責設計並與中鼎工程公司聯合團隊合作安裝，其主要設備包括壓力組件-汽鼓、集管器、加熱元件、連接管路、過熱器、安全閥等。

本次前往興達複循環新建機組製造廠商 GE 觀摩實習，進一步了解其設計理念、實際使用經驗，作為本公司日後複循環機組相關業務參考，期能提升本公司人員技術及維持設備可靠度。

實習課程內容著實相當豐富，授課講師上課方式輕鬆活潑，有任何疑難有問必答，經過本次的訓練確實對本公司人員在專業及溝通的素養上有莫大的提升。

# 目 次

壹、實習目的-----	3
貳、實習過程-----	3
參、實習內容-----	4
一、循環發電流程概述-----	4
二、HRSG 系統簡介-----	6
三、HRSG HIGH PRESSURE STEAM SYSTEM-----	10
四、HRSG INTERMEDIATE PRESSURE STEAM SYSTEM-----	12
五、HRSG HP/IP FEEDWATER SYSTEM-----	15
六、HRSG LOW PRESSURE STEAM SYSTEM-----	19
七、HRSG BLOWDOWN SYSTEM-----	21
八、HRSG SCR SYSTEM-----	22
九、HRSG WATER CHEMISTRY SYSTEM-----	26
肆、實習心得與建議-----	28
一、實習心得-----	28
二、實習建議-----	28

## 壹、實習目的：

隨著國際間環保意識訴求的逐年增強，近年來以天然氣為燃料的發電廠，尤其是高熱效率的燃氣複循環機組漸漸成為目前國內及國際上增建火力發電廠的主流，天然氣在全球能源轉型過程被視為重要的橋接能源，燃氣複循環機組具有低碳之優點，透過以天然氣替代煤、油，可以發揮兼顧穩供與環保的功能，且燃氣複循環機組除可配合再生能源發電快速升降載，穩定區域供電平衡，未來亦可以混燒、甚至專燒氫等無碳燃料，持續導入減碳技術，以「先低碳，後零碳」之方式邁向淨零排放。

為了跟上國際間發電機組的發展趨勢，臺灣亦啟動了能源轉型進程，規劃在民國 114 年達到天然氣發電占比 50%的目標，本公司為提升電廠整體營運績效及競爭力，降低二氧化碳與空污排放，爰推動「興達電廠燃氣機組更新改建計畫」，規劃設置總裝置容量 390 萬瓩之燃氣複循環機組，興達電廠燃氣複循環機組的穩定運行不論在穩定供電還是在降低我國總碳排、空污防制等都有相當重要的意義，這些高效環保的燃氣複循環機組自然會成為國內未來發電新主流！

為了使興達計畫發電機組安裝工程順利並將相關之設計、製造、安裝及運轉維護技術移轉，興達燃氣機組更新改建計畫中依合約規定統包廠家奇異公司（General Electric International, Inc. ,GE）必須提供本公司人員必要之訓練，且為符合政府節能減碳政策，確保採購高效率之機組，更需藉由正確運轉操作與維護以實現高機組效率之目標，故確有必要派遣公司人員前往實習，以充份瞭解廠商之設計規劃概念、製造流程、測試、運轉、維護程序理念及國際技術之進展，厚植本公司未來燃氣複循環機組開發規劃、工程採購、日後運轉維護之核心技術能力。

## 貳、實習過程：

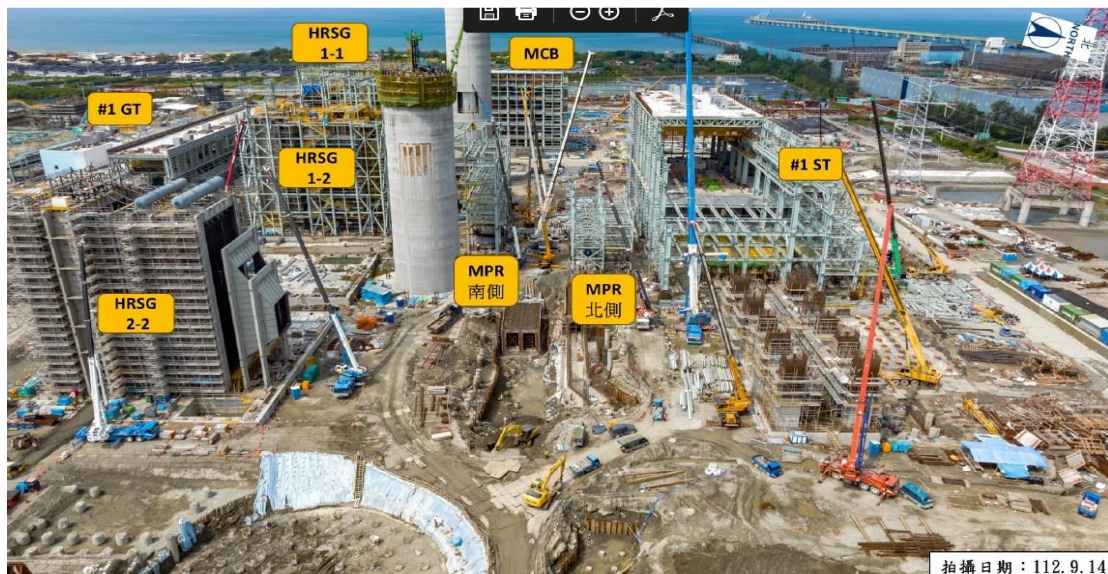
本次出國計畫為「興達計畫廢熱回收鍋爐(HRSG) 之設計、製造、測試、運轉訓練實習」，於美國奇異公司（General Electric International, Inc. ,GE）位於休士頓的訓練中心進行為期 10 天的訓練課程(不包含假日與路程)，相關行程及工

作紀要如下：

項次	起訖日	機構名稱及實習內容
1	112.09.17	赴美國休士頓
2	112.09.18~ 112.09.29	至休士頓訓練中心實習廢熱回收鍋爐之設計、製造、測試、運維訓練實習
3	112.09.30~ 112.10.01	返台灣台北

參、實習內容：

### 一、複循環發電流程概述

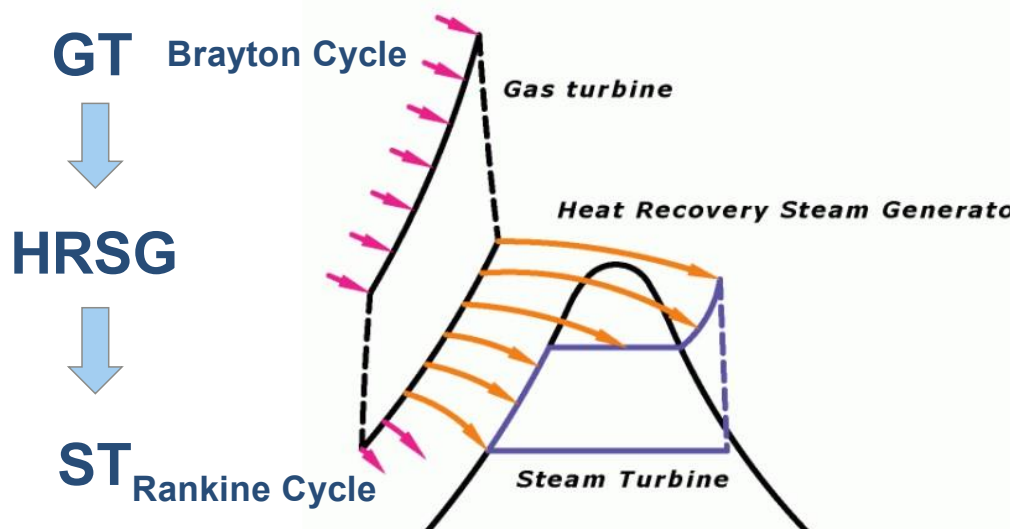


興達電廠更新擴建計畫主設備由美商奇異公司（General Electric International, Inc. ,GE）及中鼎工程股份有限公司聯合承攬，規畫新一機～新三機共三部複循環機組，每部出力 130 萬瓩。每部複循環採用 2GT+1ST 模式，每部複循環有 2 部廢熱回收鍋爐(Heat Recovery Steam Generator-HRSG)。

蒸汽輪機（Steam Turbine，ST）發電採用朗肯熱力循環（Rankine Cycle）原理，以煤炭、油或天然氣為燃料，透過燃燒反應加熱鍋爐內的水，產生高溫、高壓蒸汽推動汽機運轉，再帶動發電機發電。

氣渦輪機（Gas Turbine，GT）發電是運用布雷登熱力循環（Brayton Cycle）原理，將經過壓縮的空氣與天然氣混合燃燒，產生高溫高壓的燃氣推動氣渦輪機，最後帶動發電機發電。

複循環結合以上兩種機組，分成兩階段發電；其中氣渦輪機將天然氣燃燒做功約攝氏 706 度的餘熱，直接排入熱回收鍋爐（Heat Recovery Steam Generator，HRSG），將爐水加熱產生蒸汽來推動蒸汽輪機，再透過發電機將機械能轉換成為電能，進行第二次發電。由於結合兩個熱力循環，所以稱為複循環。複循環機組可以是一對一、二對一或三對一，以二對一為例，即二部氣渦輪機對應一部蒸汽輪機，共有三部發電機，因此一部複循環發電機組的裝置容量比單循環的燃煤機組高。



HRSG 主要利用 Gas Turbine 燃燒後之排氣熱量產生過熱飽和水蒸氣供 Steam Turbine 運轉及中壓飽和水蒸氣供 GT 冷卻之用。

GE 設計之 7HA.03 氣渦輪機之燃氣排氣溫度在 706°C 以上，此高溫熱燃氣經由廢熱回收鍋爐( Heat Recovery Steam Generator — 簡稱 HRSG )回收利用，可將發電效率提高至 64% (LHV, Net) 以上(註：慣常火力機組效率約為 37%)。

## 二、HRSG 系統簡介

廢熱回收鍋爐(HRSG)裝置於氣渦輪機排氣煙道的下游，承接並利用氣渦輪機做功發電後排放的熱值作為燃料，利用管排及蒸發器的熱交換效果，產生達到設計品質的過熱乾蒸汽，導入氣輪機轉動，產生機械軸功後帶動發電機運轉切割磁力線發電。HRSG 與傳統火力鍋爐功用相異之處在除了要供應 STEAM TURBINE(ST)所需過熱飽和蒸汽以外，尚須提供水及蒸氣滿足 GAS TURBINE(GT)冷卻需要。

廢熱回收鍋爐依其構造、介質循環方式及工作條件等，分類如下：

1. 依煙道流向：依煙道氣流向分為水平煙道氣流向型(horizontal gas flow)、垂直式煙道氣流向型(vertical gas flow)及頂部支撐(top support)共 3 大類。煙道氣流形式主要取決於配置大小、鍋爐製作、安裝、維修等成本考量亦是主要因素。垂直式煙道氣流向型因煙囪可安裝在鍋爐頂部，相對可以減少設備所需使用面積，故佔地較小。而興達新建燃氣機組 CCGP GE

HRSR 屬於水平煙道氣流向型(horizontal gas flow)，目前是國際上熱回收鍋爐設計的主流形式。



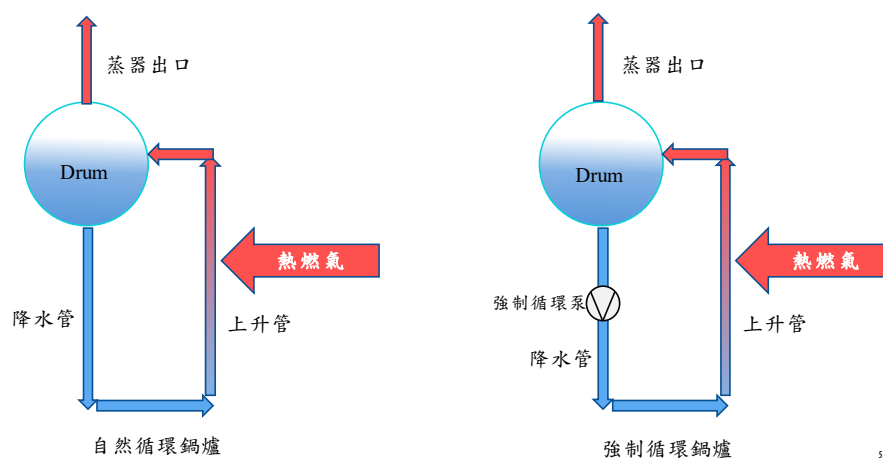
### 水平式與垂直式鍋爐比較(斗山公司評估)

	水平式	垂直式
循環方式	自然循環	強制/混合/自然循環
Circulation Ratio	較高	較低
建造區域(面積)	較大	較小
運轉成本	較低	較高
維護成本	較低	較高
維護評估	簡單	困難
Base load	相同	相同
輔機數目	較少	較多
熱傳面積	較大	較小
爐管更換	困難	容易
熱效率	較高	較低

2. 依循環方式：可分為自然循環、強制循環兩種。自然循環式鍋爐(Natural Circulation Boiler)原理為鍋爐水沿著下降管進入傳熱管群(蒸發器)，吸熱後形成汽水混合物沿上升管進入汽鼓，在汽鼓的蒸氣與水經過分離後，鍋爐水重新進入下降管，形成循環，當鍋爐系統壓力越高時，鍋爐水與汽水混合物之密度差越小，相對的為了要維持一定的水頭壓力，需要增加汽



鼓至下降管底部中心的高度。水之循環力量系依賴下降管(down comer)與上升管(riser)流體密度差所得之水壓。興達新建燃氣機組 CCGP GE HRSG 的中壓段及低壓段為 drum type low pressure (LP) and intermediate pressure (IP) Evaporators 設計，採用此自然循環型式，現今的複循環系統皆以自然循環廢熱回收鍋爐為主流。強制循環式鍋爐(forced circulation boiler)原理為鍋爐壓力增高時，水與飽和蒸汽之密度差漸小，其所得之水壓越小，於降水管加裝循環水泵，亦稱控制循環(controlled circulation)；因考量降水管(Down comer)爐水的高溫運轉，泵浦加壓系統易產生故障。



3. 依壓力段數：可分單壓(single)、雙壓(dual)及三壓(triple)三種。單壓型式一般常用低壓( $P < 1.6 \text{ Mpa}$ )系統，三壓則同時低壓( $P < 1.6 \text{ Mpa}$ )、中壓( $1.6 \leq P < 10 \text{ Mpa}$ )及高壓( $P \leq 10 \text{ Mpa}$ )系統，壓力段數的選用視蒸汽用途而定，有汽電共生的系統，均選用雙壓或三壓系統，慣常火力複循環發電廢熱回收鍋爐均採用三壓(低壓、中壓、高壓)型式設計。興達電廠擴建新一機~新三機之 HRSG 採用 TRIPLE 壓力設計，即 HIGH PRESSURE(HP)、INTERMEDIATE PRESSURE(IP) 及 LOW PRESSURE(LP)。高壓段為 once through type high pressure (HP) evaporator 設計，其特色是液態冷凝水在省煤器遇熱後直接進入爐膛之蒸發管及過熱管，加熱成為設計需要的過熱蒸汽(superheated steam)後直接輸出使用，經蒸發器後並無汽水分離及爐水再循環等過程直接進入過熱器(superheater)加熱乾燥使成設計點之過熱蒸汽。中壓段及低壓段為 drum type low pressure (LP) and intermediate pressure (IP)

Evaporators 設計，各階段壓力管路設計主要均採用三階段的升溫升壓方式，如 ECONOMIZER(省煤器)、EVAPORATOR(蒸發器)及 SUPERHEATER(過熱器)等。

## 亞臨界與超臨界鍋爐比較

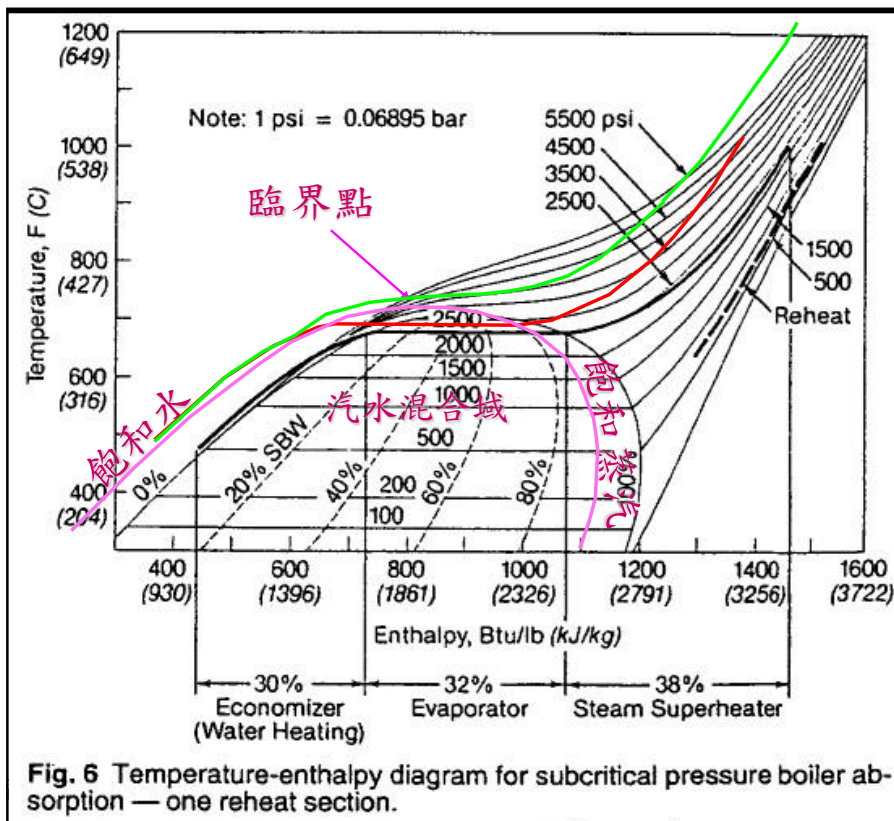
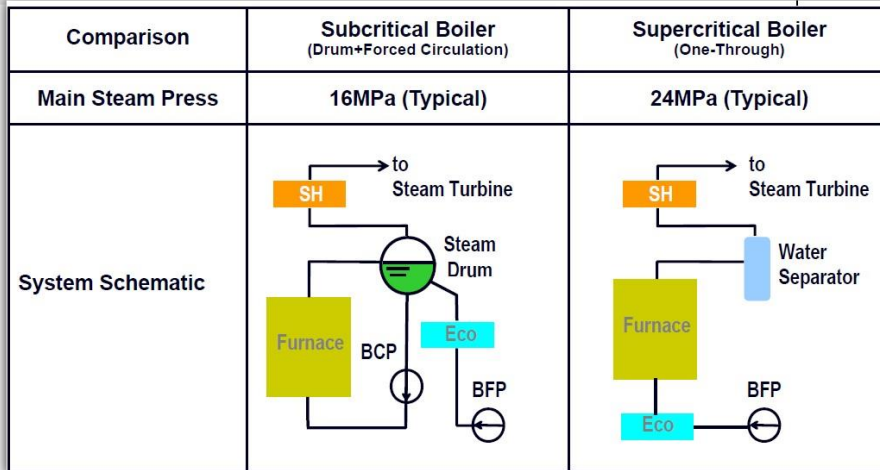
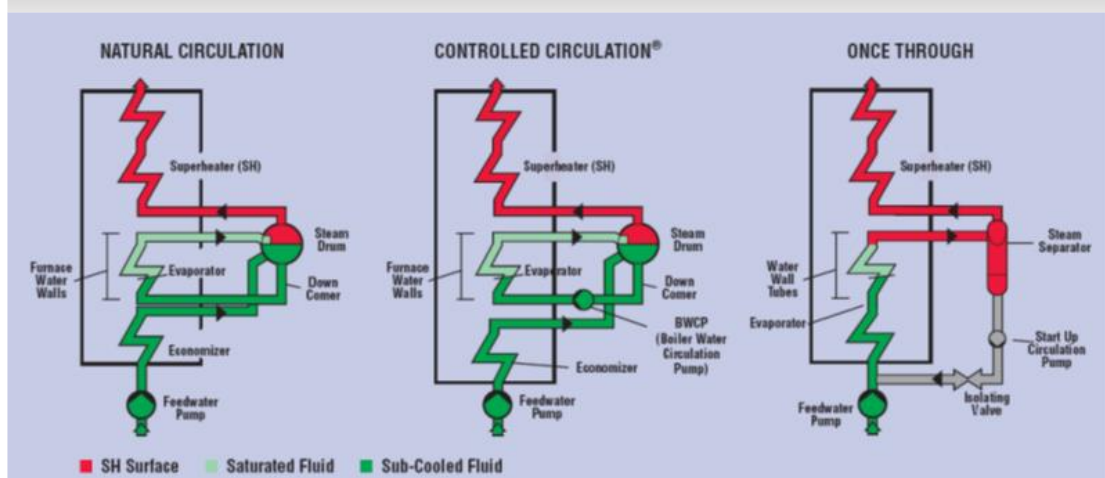


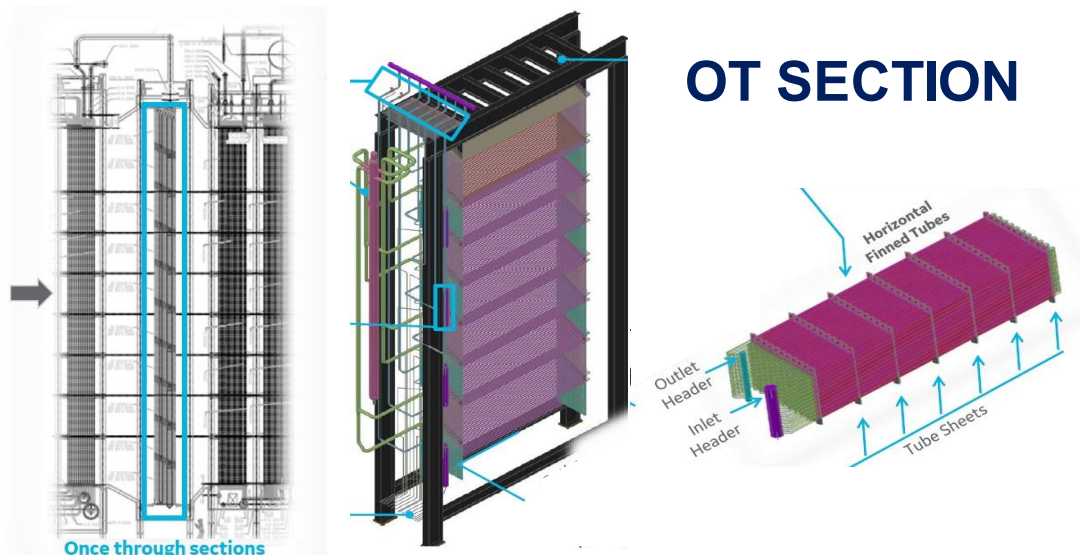
Fig. 6 Temperature-enthalpy diagram for subcritical pressure boiler absorption — one reheat section.

# BOILER CIRCULATION



## 三、HRSG HIGH PRESSURE STEAM SYSTEM

廢熱回收鍋爐高壓系統包括高壓省煤器(ECONOMIZERS)、高壓貫流式蒸發器(once through(OT) EVAPORATORS)、高壓過熱器(SUPER HEATER)等設備。高壓段為 once through(OT) type high pressure (HP) evaporator 設計，故無汽水鼓設置，鍋爐水牆管的水經加熱後全部在出口端即形成過熱蒸汽，不須經過循環及汽水鼓汽水分離，爐水循環比為 1：1。



與 Drum-type 相比，可以改變給水流量，從而提高 CAPP 效率，由於能夠在更高的蒸汽壓力下運行，提高效率，從低負載到基本負載的穩定運行，

與其他產品相比具與更高的靈活性，GE 公司設計的 OT 由於沒有傳統的 conventional blow down，所以有更低的能量損失。

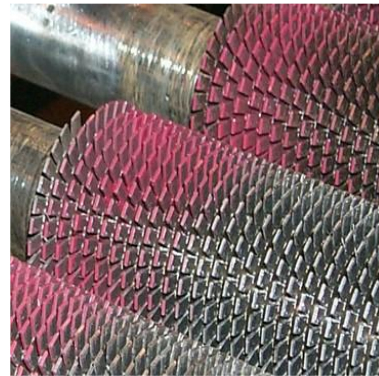
此系統供應 STEAM TURBINE 高壓段所需之高壓過熱飽和蒸汽及 GT 之 TURBINE 段外殼冷卻空氣冷卻器 (TURBINE COOLING AIR COOLER-TURBINE TCA)之冷卻用水。

高壓飼水經由電動進口關斷閥、進口逆止閥、飼水管進入省煤器。每一段省煤器係由附有鋸齒式(serrated fin)鰭片之無縫管子(tubes)所製成，以確保正常運轉情況下，飼水無「汽化」發生。

## Finned tubes

### To improve heat transfer, tubes are finned.

- Types:
  - Serrated:
    - Better heat transfer but more sensitive to fouling
  - Solid:
    - For fuel that are less clean
    - In case smaller heat pick up is desired
- Continuous welding for heat transfer



Serrated fin tube

Tubes to maximise heat transfer because of low heat flux and lower flue gas velocity

被加熱之飼水離開省煤器後經下降管路進入高壓蒸發器，加熱成為設計需要的過熱蒸氣(superheated steam)後直接輸出使用，經蒸發器後並無汽水分離及爐水再循環等過程直接進入過熱器(superheater)加熱乾燥使成設計點之過熱蒸汽。高壓蒸發器管子(tubes)係由附有鋸齒式(serrated fin)鰭片之無縫管子(tubes)所製成。

飽和蒸汽經過熱器後，在第 1 段與第 2 段過熱器間，藉由進入高壓降溫過熱器(DESUPERHEATER OR ATTEMPERATOR)噴灑飼水入高壓蒸汽系統，目的在控制過熱蒸汽在降溫過熱器出口溫度，避免溫度過高蒸汽進入

STEAM TURBINE，而造成損壞。減溫水進入減溫器以噴灑方式與高壓蒸氣混合，藉由汽化減溫水來降低高壓蒸氣之溫度。減溫器內部有設置一層 LINER，防止因噴灑溫水而產生 STRESS 現象。然後進入第 2 段過熱器加熱蒸氣溫度至所需蒸氣溫度然後注入主蒸管路，推動高壓汽機作功。

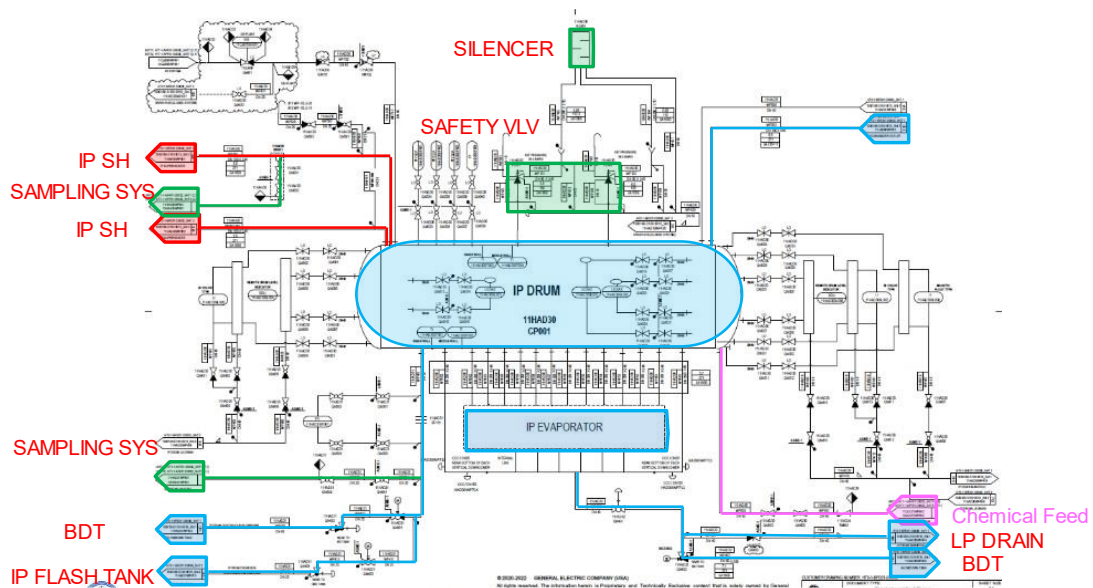
## Typical Desuperheater Configuration



### 四、HRSG INTERMEDIATE PRESSURE STEAM SYSTEM

熱回收鍋爐中壓系統包括中壓飼水系統、中壓省煤器(INTERMEDIATE PRESSURE ECONOMIZERS)、中壓汽鼓(INTERMEDIATE PRESSURE DRUM)、中壓蒸發器(INTERMEDIATE PRESSURE EVAPORATORS)、中壓過熱器(INTERMEDIATE PRESSURE SUPER HEATER)等設備。

原則上中壓段蒸氣與低壓段蒸氣的溫度大致相同，冷再熱蒸氣(cold reheat stream)與熱再熱蒸氣(hot reheat stream)的壓力以同級設計，而高壓段蒸氣與熱再熱蒸氣(hot reheat stream)的溫度約略相同。中壓段蒸氣產生量約為汽機排氣的 10%。



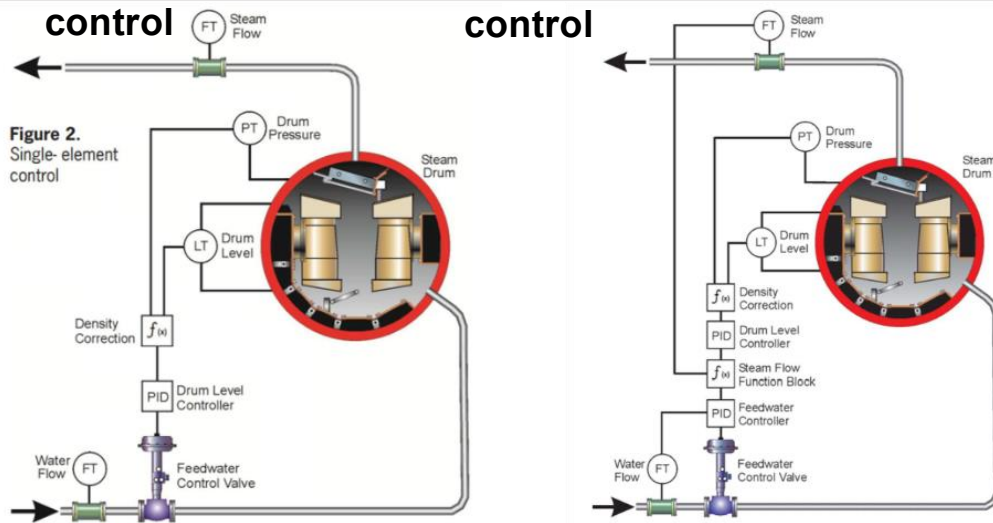
中壓過熱飽和蒸汽流程先經過中壓省煤器 (INTERMEDIATE PRESSURE ECONOMIZERS) 加溫，流入中壓汽鼓 (INTERMEDIATE PRESSURE DRUM) 後，經過中壓蒸發器 (INTERMEDIATE PRESSURE EVAPORATORS) 產生水與水蒸汽之混合流體，再度進入中壓汽鼓分離水與水蒸汽。水留在中壓汽鼓內繼續加熱。

省煤器附有鋸齒式 (serrated fin) 鰭片之電阻焊縫管子 (EWR tubes) 所製成，以確保正常運轉情況下，飼水無「汽化」發生。被加熱之飼水離開省煤器後經中壓水管進入中壓汽鼓。飼水控制閥則設於省煤器與中壓汽鼓之間，以控制飼水量。飼水由中壓汽鼓經下降管路進入蒸發器系統，部份循環水於蒸發器管子內蒸發成汽水混合，經上昇管路送回中壓汽鼓。

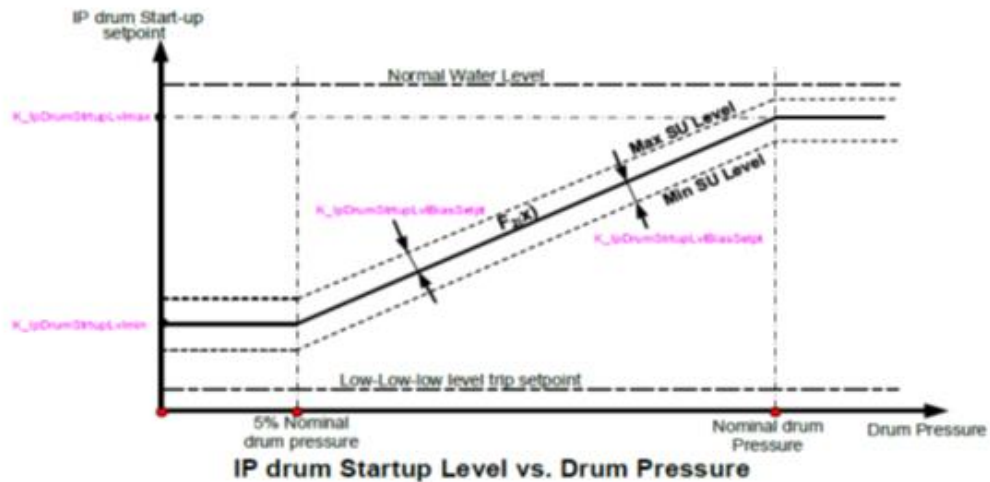
中壓汽鼓內水位之控制，在 25% load 以下時水位控制以汽鼓液位計回授之信號進行控制，稱為「single element control」。超過 25% load 後，須將汽鼓流出的蒸氣量、水量及流入之水量信號併入液位信號進行控制，稱為「three elements control」。為了防止過多的飼水流入中壓汽鼓，裝設限流器 (flow limiter) 用以限制最大的進入中壓汽鼓的飼水量。

## one – element

## three – element



## IP Drum Level Control Valve



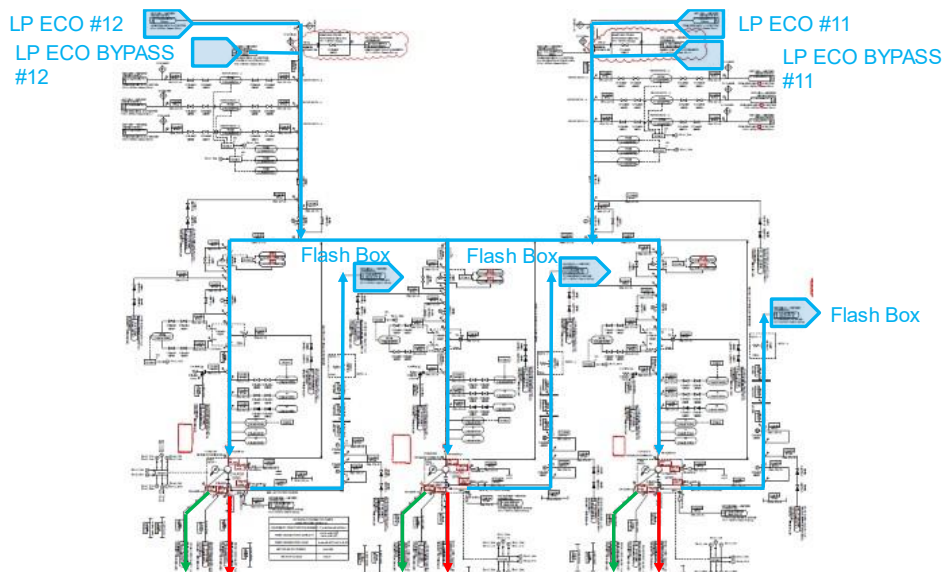
汽鼓內的膨脹現象(Swell)是指如果 drum 中的壓力由於蒸汽流量的增加而降低，則水溫會升高且高於該壓力的飽和溫度。這會導致一些水形成額外的蒸汽泡，上升管中的蒸汽泡會膨脹，液位升高或膨脹的量取決於 drum 內的蒸汽壓力，壓力降低得越多，drum 液位的上升就越大。

汽鼓內的收縮現象(Shrink)是指由於蒸汽流量減少導致 drum 中的壓力增加，導致 drum 中的水下降到低於飽和度的溫度，一些蒸汽泡會凝結成水，而另一些會在增加的壓力下收縮，液位下降量取決於 drum 內的蒸汽

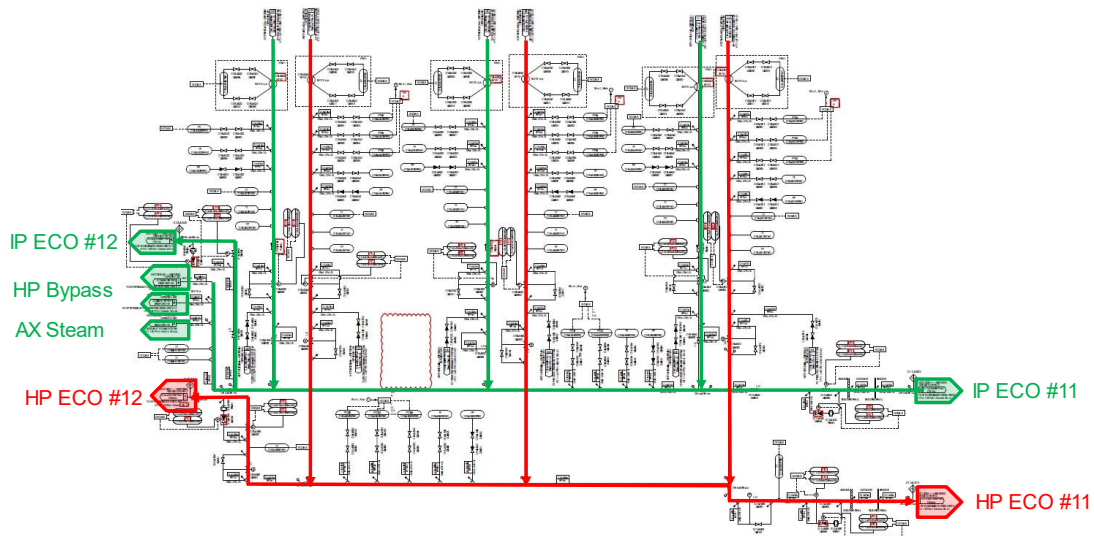
壓力，壓力上升得越大，水平下降得越多。

飽和蒸汽自中壓汽鼓流入過熱器進口集管器。過熱蒸汽經中壓蒸汽管至再熱系統。進入再熱系統(Reheat System)之過熱中壓蒸汽與來自汽機之冷再熱蒸汽被合併進入第1段再熱器進口集管器流至再熱器降溫過熱器(DESUPERHEATER OR ATTEMPERATOR)。降溫過熱器(DESUPERHEATER OR ATTEMPERATOR)之目的在於藉由在第1段與第2段再熱器間，噴注飼水進入過熱蒸汽管線以控制在出口處之過熱蒸汽溫度。此蒸汽然後流經第2段再熱器加熱至所需之主蒸汽溫度，且然後進到主蒸汽管。

## 五、HRSG HP/IP FEEDWATER SYSTEM







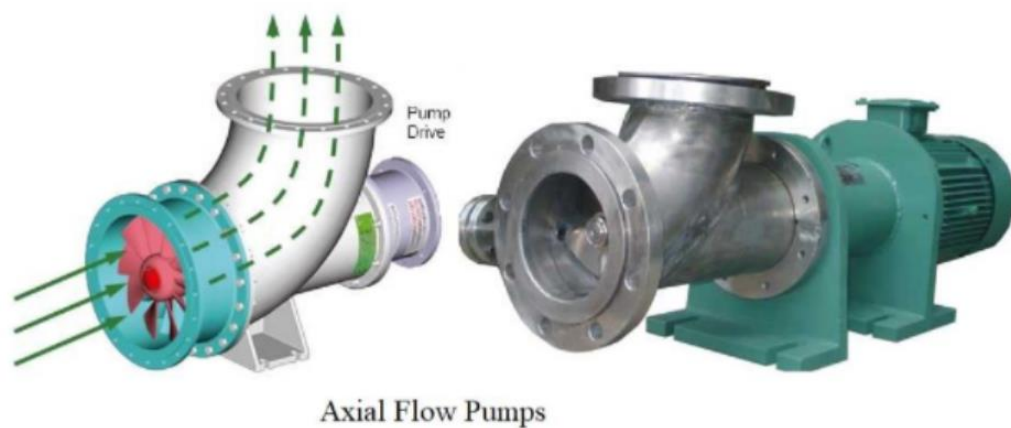
蒸氣-冷凝水循環系統下的另一項重要設備是加壓冷凝水送至鍋爐省煤器與高壓主蒸汽、再熱蒸汽等噴水降溫器(attemperator)的鍋爐飼水泵組(boiler feed pump)，鍋爐飼水泵的驅動力需求很大，通常設計成馬達驅動。

三段壓力式的複循環設計同時需要高、中、低三段飼水加壓，在高、中壓段的設計飼水壓力分別約為廢熱回收鍋爐高、中壓段蒸汽於 NRV 出口壓力的 1.3~1.5 倍，GE 僅設計一組鍋爐飼水泵，再利用中間某特定中間段出口的引出流(bleed flow)來供應中壓段所需鍋爐飼水(feedwater)，飼水泵全壓終端出口的全壓飼水則供應高壓段所需的飼水，應用此種設計可以直接節省並簡化飼水系統設備的投資。

各類飼水系統可能應用的泵類型式如下說明：

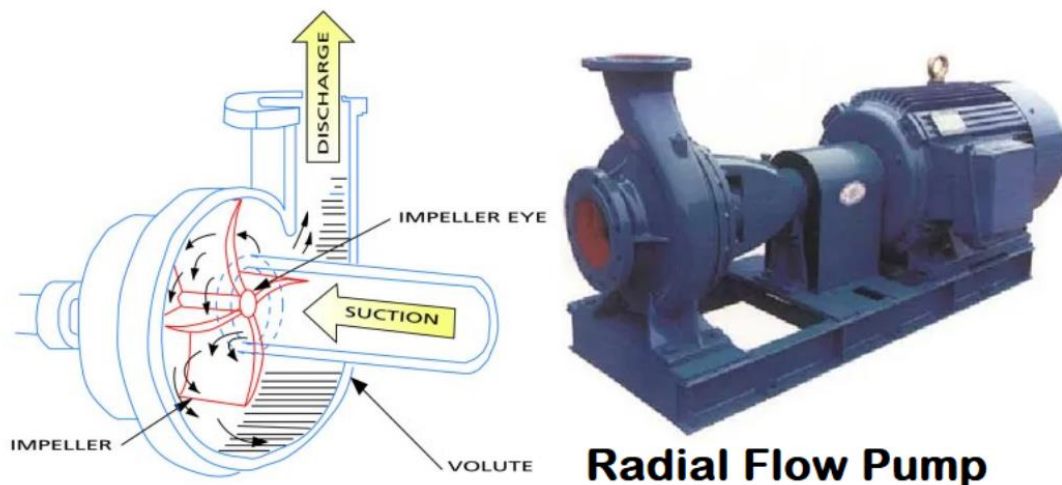
**Axial Flow Pump**：軸流泵是一種利用軸向推力原理來移動流體的流體泵。它們的特點是旋轉葉輪具有螺旋槳狀的葉片，這些葉片成一定角度並在流體流經泵時為流體提供動量。葉輪懸浮在液體中，當流體以一定速度流過時，葉面產生負壓，葉背產生正壓；正壓和負壓的大小與葉輪形狀、迎角（葉輪背部與液體流動方向的傾角）和流體速度有關，如果流體不動，葉輪在流體中以相同的速度運動，則葉輪背部和葉輪表面受到與之前相同

的正壓和負壓，即葉輪表面（葉輪上方）為負壓壓力和葉背是正壓力，在這種壓力下，葉輪將獲得升力，如果將葉形葉片固定在轉軸上形成螺旋槳，使其不能沿軸向運動，當轉軸高速旋轉時，葉面（螺旋槳下側）具有吸力作用由於負壓，而葉背由於正壓而具有排出的作用，這種吸入和排放導致液體（或氣體）流動，這就是軸流泵的工作原理。軸流泵作用是使流體的動能通過旋轉的葉輪轉化為壓力能，從泵的吸入端至排出端由旋轉運動轉變為軸向運動自壓排出，最常見的分為立式和臥式，與離心泵比較，軸流泵的構造更為簡單，但產生的液體壓頭較低，而排量可以很大，並可取得較高的效率。



**Radial Flow Pump：**離心泵(centrifugal pump，centrifugal pumps)是通過旋轉泵的葉輪產生的離心力帶動流體的轉動來完成流體的輸送，主要由葉輪、泵殼和軸封裝置構成，通常離心泵一組含有三至六片葉片的葉輪(impeller)，置於一扁圓形的外殼(casing)內，離心泵的葉輪與馬達連接作高速旋轉，液體自葉輪的中心處吸入泵內，隨葉輪轉動而獲得動能後，因離心力被葉片掃入渦形室，渦形室是葉輪與外殼間的空隙，其空隙愈近出口處愈大，使液體的流速愈小，但是壓力則愈大。一般型式的離心泵稱為渦形泵(volute pump)，其能量的轉換是由動能轉變成壓力，依流體力學的原理歸類為動力式泵(kinetic pump)。離心式泵浦具有用途廣泛、轉速高、流量大、多段式葉輪組合時壓力增減容易、構造成本低廉、拆裝維護容易等許多優點。雖然起步較晚，但能取代大部分其他種類泵浦的地位，而在泵

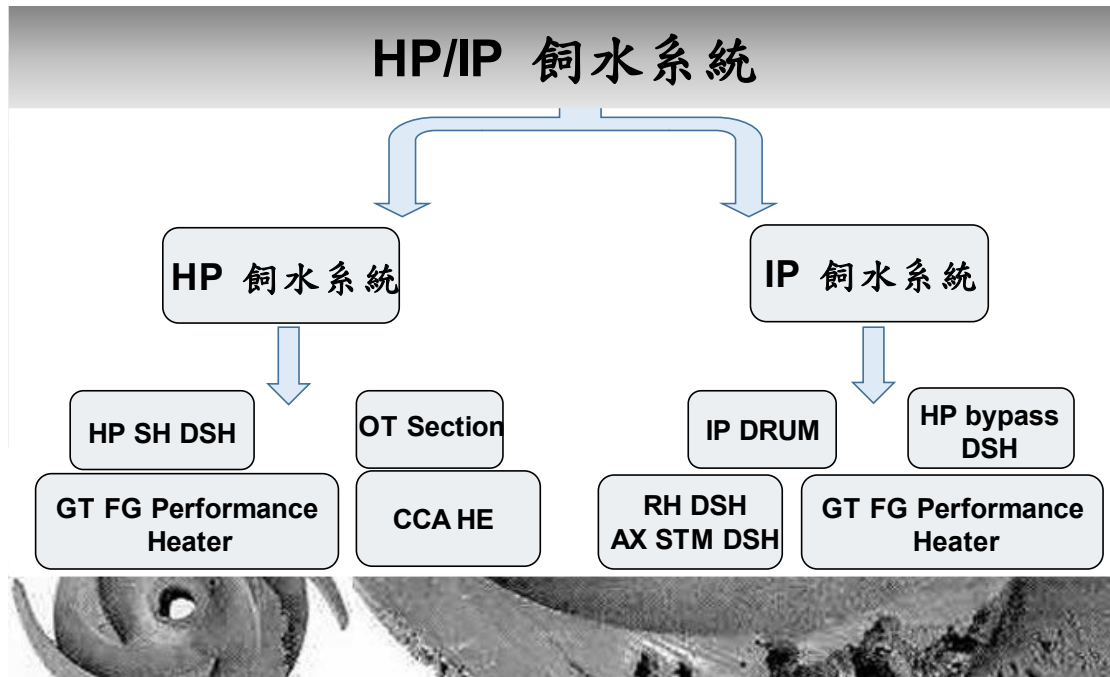
浦市場擁有 70-80%的佔有率，成為現今工業上的寵兒。其主要應用範圍有：液體輸送、冷卻系統、工業清洗系統、水產養殖場、施肥系統、計量系統、工業設備…等。



**NPSH(a)：**淨正吸水頭 NPSHa (Net Positive Suction Head Available)指的是流體進入泵浦吸入端時實際壓力狀態，NPSHa 代表泵浦入口處所能獲得的絕對壓力，確保流體能夠穩定地進入泵浦。NPSH(a)的值表示在泵吸入口附近液體的壓力頭超過液體的飽和壓力，以防止汽泡形成。

**NPSH(r)：**必要的淨正吸水頭 NPSHr (Net Positive Suction Head Required)指泵在特定工作條件下所需的最低吸入正壓頭，以防止汽泡形成並保持正常運行。

**孔蝕現象：**給水泵浦運轉時，吸入處因流動液體局部靜水壓力低於蒸發壓力，使液體蒸發為氣泡，當流速加快因而氣泡破裂，會造成噪音、振動及侵蝕管路或葉片等問題，稱之為孔蝕現象。受影響最大的區域是泵的流體和固體表面（葉輪和外殼）之間的接觸區域，或者流體與流體內部的懸浮顆粒接觸的區域，這些顆粒本身會出現明顯的裂紋和振動。



### 六、HRSG LOW PRESSURE STEAM SYSTEM

熱回收鍋爐低壓系統包括低壓飼水系統(LOW PRESSURE FEEDWATER SYSTEM)、低壓汽鼓(LOW PRESSURE DRUM)、低壓蒸發器(LOW PRESSURE EVAPORATORS)、低壓省煤器(LOW PRESSURE ECONOMIZERS)、低壓過熱器(LOW PRESSURE SUPER HEATER)等設備。

低壓過熱飽和蒸汽流程由低壓鍋爐飼水泵(LP BOILER FEED PUMP)輸送之水頭開始，先流入低壓汽鼓後，自然循環經過低壓蒸發器產生水與水蒸汽之混合流體，再度進入低壓汽鼓分離水與水蒸汽，飼水控制閥則設於低壓飼水泵與低壓汽鼓之間，以控制飼水量，水留在低壓汽鼓及低壓蒸發器內繼續加熱，水蒸氣離開低壓汽鼓後，再經低壓過熱器加熱，在進入低壓汽機前與從中壓汽機排放之蒸汽混合。

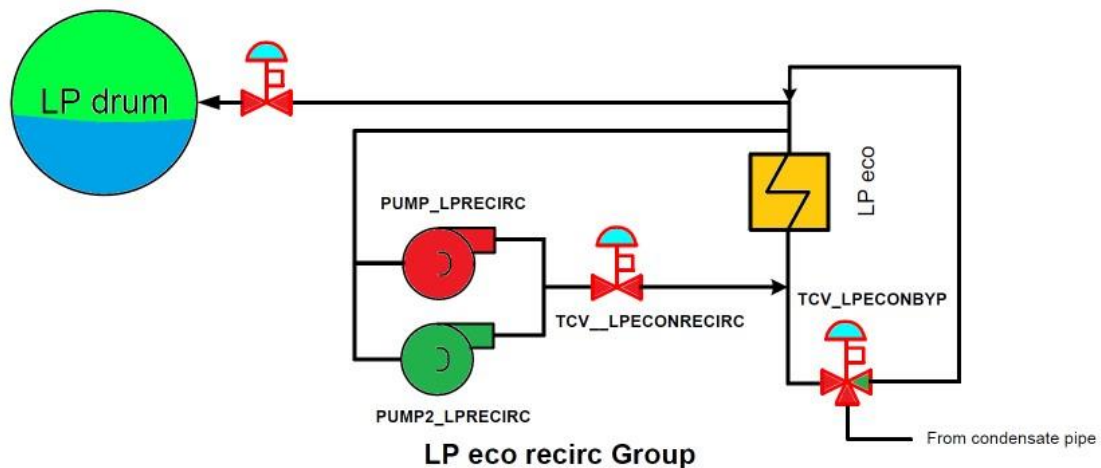
低壓 ECONOMIZER 系統流程與功能，有不同於高、中壓蒸氣系統。LP 省煤器冷凝水再循環入口溫度控制與 LP 省煤器旁通控制結合使用，可達成以下目的：

1. 控制低壓 ECONOMIZER 冷凝水再循環入口溫度：具有提高進入低壓省煤器的冷凝水溫度的功能，以避免使用氣體燃料時煙氣側腐蝕。以再循環控制閥調節低壓省煤器再循環泵的排出流量，將熱水從低壓省煤器出

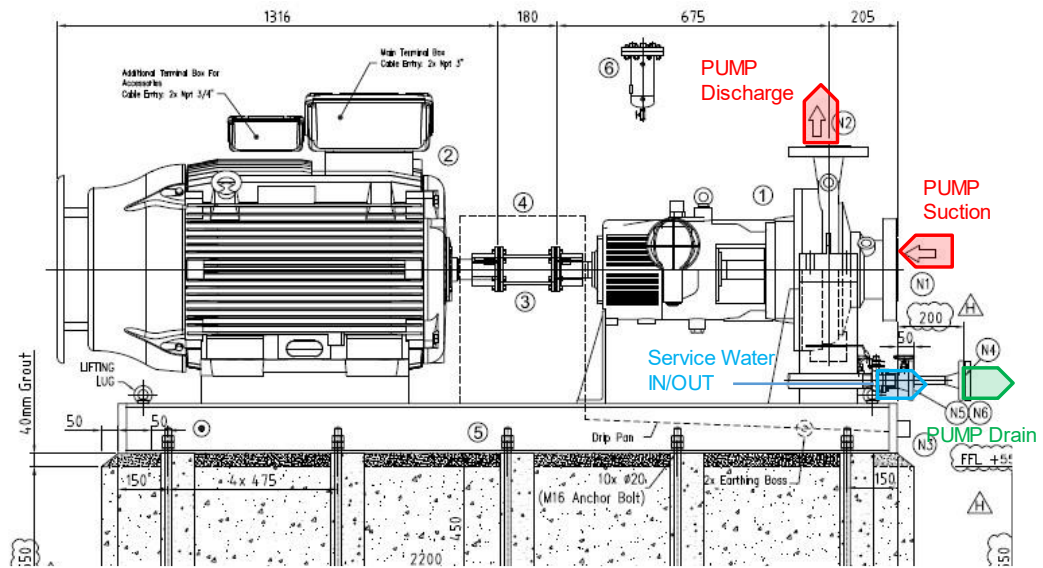
口再循環到低壓省煤器入口，在入口處與冷的冷凝水混合。

2. LP 省煤器再循環最大流量：透過限制低壓省煤器再循環控制閥的開度，防止泵浦產生過多流量。此控制需要在瞬態期間或每當低壓省煤器入口溫度接近或低於低壓省煤器入口溫度設定點時限制泵流量。啟動過程中會出現省煤器入口溫度低的情況。如果測量的流量超出高流量設定點，則會向控制器發送降低命令，以幫助閥門關閉更多並防止流量增加。

## LP Economizer Recirculation Diagram



低壓 ECONOMIZER 系統設計兩組再循環水泵(RECIRCULATING PUMP)，運轉模式為 1 台 RUNNING/1 台 STANDBY，其功用是在停機期間保持 LP ECONOMIZER 水重複循環，確保 LP ECONOMIZER 溫度保持在露點之上，避免產生含有酸性物質之凝結水，腐蝕管排。



## 七、HRSG BLOWDOWN SYSTEM

BLOWDOWN SYSTEM 由 3 個主要的儲槽，連接至高、中、低壓系統各管排(路)之排放管路所組成。blowdown tank 於啟動期間接收來自 LP flash tank、HRSG 及附近的蒸汽管路的排放水。各管路收集之不同溫度水蒸氣混合，在經過噴水降溫後，經由 BLOWDOWN PUMP 傳送到汽機房冷凝器冷卻，再循環使用。

## 八、HRSG SCR SYSTEM

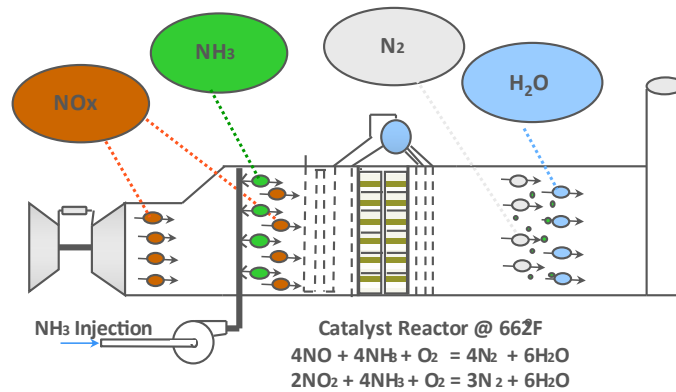
選擇性觸媒還原脫硝 (SCR) 用於轉化燃燒過程中產生的特定污染物 (NO<sub>x</sub>)，由於系統設計的性質，SCR 設施放置在管道的燃燒後區域。

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的生成方式可分為二類：

1. 燃燒式的氮氧化物(Thermal NO<sub>x</sub>)係因空氣中的氮氣受高溫氧化而形成，包含一種瞬間式的氮氧化物(Prompt NO<sub>x</sub>)，係 N 自由基與碳氮化合物作用再氧化生成。
2. 燃料式的氮氧化物(Fuel NO<sub>x</sub>)係來自燃料中的含氮化合物轉化生成。

## SCR Catalyst

### Selective Catalytic Reduction (SCR)



SCR Can Achieve Very High (>90%) NO<sub>x</sub> reduction, BUT . . .

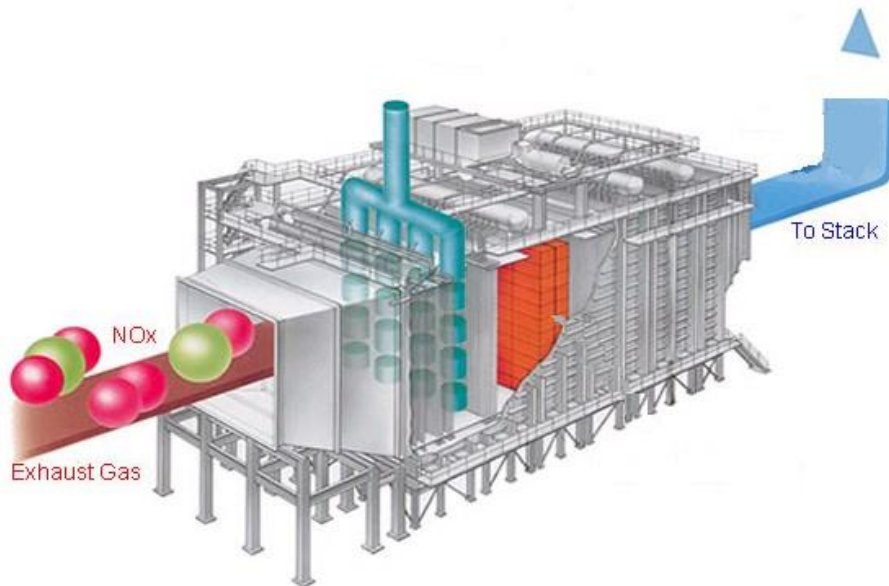
Costs are high ---- catalyst and NH<sub>3</sub>

Performance lower--- higher pressure loss

Additional environmental impact

- NH<sub>3</sub> Emissions
- Spent catalyst disposal

## SCR Catalyst



SCR 需要一種還原劑來將 NOx 轉化為惰性物質，最純形式的氨 (NH<sub>3</sub>) 是首選的還原劑，氨 (NH<sub>3</sub>) 會優先選擇與 NOx 反應時分解成水蒸氣 (H<sub>2</sub>O) 和氮氣 (N<sub>2</sub>) 分子，而不與 O<sub>2</sub> 反應，以達淨化煙氣之目的。

SCR 脫硝系統的最佳溫度範圍是 320-400°C，所以設置位置選擇在高壓蒸發器 (HP EVAPORATOR) 與高壓省煤器 (HP ECONOMIZER) 之間，若溫度太低則反應效率太低，則 NH<sub>3</sub> 會與 SO<sub>x</sub> 反應生成 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 等微粒產生沉澱，而造成腐蝕現象，嚴重影響設備的運轉與維護。此最低操作溫度依煙道氣內 SO<sub>x</sub> 之濃度來決定，SO<sub>x</sub> 濃度越高則最低操作溫度須越高。理論上來說溫度越高其脫硝效率會越高，但燃氣超過 371°C 以上時的脫氮效率隨溫度之增加非常有限，且高溫亦會造成觸媒床之燒結而降低觸媒壽命，而且氨除了與氮氧化物作用外，在高溫下有氧氣的存在下，氨本身亦會被氧化成氮氧化物或氮氣，不但增加了氨的消耗量，同時亦製造多餘的污染物。

AFCU 為 SCR 系統最主要之控制核心，其目的為依據各項設計參數計算所需之氨氣注入量，便能達到所需之脫硝效率及氨氣逸出量，其所需參數計有煙道氣流量、反應器入口 NOx 濃度、負載量、反應器出口 NOx 濃度、氨氣逸出量。AFCU 主要之目的為確使氨氣/空氣之混合比不高於 8%，其可



控制之情形有以下 2 種：

1. 正常操作時為一台稀釋風扇運作，另一台備用(standby)，當操作之風扇故障時，緊急切換至備用風扇運轉。風扇出口風門(damper)一般只做全開或全關動作，出口亦有裝設逆止閥防止空氣逆流。

2. 隨時將所偵測之風量數據送至控制中心，以做為將氨氣/空氣比值過高時關閉氨氣流量控制之參數。

AIG 為一固定設備，目的為使氨氣能與煙道氣均勻混合，其作用有將經過混合後之氨氣/空氣，藉由注入格柵使氨氣均勻分布於煙道氣內，以利 NOx 與 NH<sub>3</sub> 充份接觸進而提高脫硝效率。當煙道氣發生偏流或氨氣分布不均勻，致使反應器出口之 NOx 濃度各點不一致時，可經由調整每一注入格柵上之噴嘴，使其儘可能達到均勻，如此才能達到最高脫硝效率並降低氨氣逸出量。

SCR Catalyst Reactor 主要的功能是保護觸媒及 SCR 系統操作之安全，其保護機制有以下 3 種：反應器入口溫度太低；反應器入口溫度太高；當觸媒床壓差超過設定時，發出警告訊號，以提醒操作人員檢查是否有異常狀況發生，並考慮是否停止 SCR 系統，以免因抽力不足造成煙道氣無法排放。

Fogging System：每個 AFCU 都有一個水霧系統，目的在抑制氨蒸氣洩漏，每個水霧系統由一個手動閥、一個過濾器、一個氣動閥和一系列噴嘴組成，水霧系統由 DCDAS 使用氨偵測器自動控制，水霧系統也可藉由現場控制盤面打開/關閉，當任何氨偵測器達到 HH Level (50 ppm) 時，DCDAS 將打開驅動球閥將水送至霧化噴嘴，驅動球閥設計為 FO。

影響 SCR 系統效率因素：

1. 氧氣的影響：許多文獻中有關氧氣對 SCR 脫硝反應的影響，均認為氧氣有加速氮氧化物被氨還原的速率。氧氣可以加速系統化學反應的速率。當氧氣的濃度在 0.5% 以下時，NO 的轉化率會隨之降至零，但隨氧氣濃度再度增加而上升，在氧氣濃度達到 1% 以上之後，不管何種觸媒其都達到最高活性且呈穩定狀態，由前面所提到，我們可以了解氧氣的主要功能


在於氧化被還原的活性物質，使其活性再生，若在缺氧的情況下，觸媒的活性會逐漸下降，直到完全失去活性。

2. 氨氣的影響：氨在 SCR 反應中，除了當作還原劑外還會進行其它的氧化反應。氨除了會與氮氧化物作用外，在溫度高於 350 °C 時，氨氣會被氧化成 N<sub>2</sub>O，而當溫度達到 400°C 時氨氣會進一步氧化成 NO；所以過量的氨不但會造成氨洩漏、增加氨消耗量，降低 NH<sub>3</sub>/NO 的莫耳比，同時亦製造出多餘的污染物。觸媒對 NO 的轉化效率隨著 NH<sub>3</sub>/NO 的莫耳比升高而增加，當達其反應化學當量，即 NH<sub>3</sub>/NO 注入比為 1 時，轉化率為最高，更多的氨量並不會使 NO 的轉化率更好，反使多餘的氨隨廢氣排出造成氨洩漏量(NH<sub>3</sub> Slip)。脫硝的反應式為 4NO + 4NH<sub>3</sub> + O<sub>2</sub> → 4N<sub>2</sub> + 6H<sub>2</sub>O，因此一莫耳的 NO 對一莫耳的 NH<sub>3</sub> 之當量比是有必要的。一般操作上，都將氨氣的注入量控制在 NH<sub>3</sub>/NO 莫耳比在 0.85~1.0 之間，以確保觸媒的轉化效率 (>90%)及最低的氨洩漏量。

## SCR Catalyst

**SCR Chemistry**

- $\underline{4NO} + \underline{4NH_3} + \underline{O_2} \Rightarrow 4N_2 + 6H_2O$
- $NO + NO_2 + 2NH_3 \Rightarrow 2N_2 + 3H_2O$
- $\underline{2NO_2} + \underline{4NH_3} + \underline{O_2} \Rightarrow 3N_2 + 6H_2O$
- $\underline{6NO_2} + \underline{8NH_3} \Rightarrow 7N_2 + 12H_2O$



3. 觸媒孔隙度對去除效率的影響：從文獻資料中得知，以相同的體積空間速度(volumetric space velocity)比較不同孔隙度對 NO 轉化的影響。由其研究可得知，NO 的轉化率隨著孔隙度越密而提高。因為質傳(mass

transfer)和孔隙擴散速率(Pore diffusion)，均與幾何表面積成正比。因此高孔隙度觸媒的單位體積具有較大的表面積，單位體積對 SCR 脫硝速率亦較大。

4. 溫度的影響：任何反應皆有其最佳反應溫度，溫度影響整個反應的能量平衡和動力；一般 SCR 的最佳反應溫度範圍為 320°C 至 400°C，隨不同觸媒的選用而有不同的最操作溫度。雖然理論上當溫度越高脫硝效率越高，但過高或過低的溫度除了不利觸媒轉換外，也會導致其他副產品生成，如硝酸氣及硫酸氣等鹽類，以及 NO 之再形成等。前者將會腐蝕觸媒床，而後者則反而降低去除效率，也會造成後下游空間預熱器的堵塞及加速腐蝕。另外，當溫度過高時，脫硝效率的增加隨溫度升高非常有限，在反應溫度也容易造成觸媒床燒結(Sintering)現象，導致觸媒表面積的減少，使表面活性基減少而降低觸媒壽命。

## 九、HRSG WATER CHEMISTRY SYSTEM

廢熱回收鍋爐運轉時必須設計化學加藥(chemical feeding system)來控制鍋爐水值，原則上加藥是為了除氧和調整飼水的 pH 值，所加入的藥劑多採用聯胺及磷酸鹽。氨水用來控制飼水 pH 值，聯胺作為除氧劑，用以去除飼水中溶氧並且可輔助提高 pH 值。磷酸鹽用來控制鍋爐水 pH 值及去除鍋爐水中的硬度及使矽土產生軟泥沉澱於爐底中，藉由間歇排放操作將軟泥排出爐外。

在飼水和冷凝水系統運轉循環時，透過連續加入氨水進行鹼化，控制 pH 值，飼水 pH 值太低易造成管材腐蝕，飼水 pH 值太高則易與鋼材作用產生氫，氫再擴散進入鋼材結構空隙造成氫脆化。

在飼水和冷凝水系統運轉循環時，通過加入聯胺來降低溶氧的濃度，磷酸鹽加藥至低壓與中壓汽鼓，用來控制鍋爐水 pH 值。

## 飼水水質

Parameter	Unit	N	A1	A2	S	An
Specific conductivity	μS/cm	3-11	-	-	-	c
Conductivity after cation exch.:	μS/cm	< 0.30	0.3-0.5	0.5-1.3	> 1.3	c
Degassed cation conductivity	μS/cm	< 0.20	0.2-0.5	0.5-1.0	> 1.0	c <sup>o)</sup>
pH-value		9.0-9.6	<9.0, >9.6	<8.8, >10	≤7, ≥11	c
Sodium as Na	ppb	< 5	5-10	10-20	≥ 20	c <sup>b)</sup>
Silica as SiO <sub>2</sub>	ppb	< 20	20-50	-	-	m
Iron as Fe	ppb	< 20	-	-	-	m
Oxygen	ppb	< 10	≥ 50 <sup>a)</sup>	-	-	c
Hydrazine	ppb					c <sup>d)</sup>

## 汽鼓水質

Parameter	Unit	N	A1	A2	S	An
Specific Conductivity	μS/cm	<30				c
pH		9.0 – 9.8	<9 / >9.8-		<8	c
Silica as SiO <sub>2</sub>	mg/kg	< 2				c <sup>a)</sup>
Phosphate	mg/kg	1-4				m
Turbidity	NTU					c

## 蒸汽品質

Parameter	Unit	N	A1	A2	S	An
Specific conductivity	μS/cm	3-11	-	-	-	m
Conductivity after cation exch <sup>a)</sup> :	μS/cm	< 0.30	0.3-0.5	0.5-1.3	> 1.3	c
Degassed cation conductivity	μS/cm	< 0.20	0.2-0.5	0.5-1	> 1	c
pH-value		9.0-9.6	-	-	-	c
Sodium as Na	ppb	< 5	5-10	10-20	> 20	c
Silica as SiO <sub>2</sub>	ppb	< 20	20-50	-	-	c <sup>b)</sup>
Iron as Fe	ppb	< 20	-	-	-	m
Copper as Cu	ppb	< 3	-	-	-	m

## 肆、實習心得與建議：

### 一、實習心得

本次奉派 GE 公司出國實習是一個難能可貴的機會與經驗，除了藉此機會與原廠家工程人員交流，加強本職學能，了解國際上發電設備技術的發展和提升專業素養外，更能與廠家建立良好的合作關係，對廠家所屬國家的人文、地理、及民情風俗亦有更進一步的體驗，這些經驗都對日後和廠家代表溝通上有非常大地助益，同時對公司於國際間的形象、能見度與發展亦有積極正面的意義存在，海外訓練計畫確實對公司人員素養在有形或無形上有顯著且正面地提昇，誠摯建議公司能繼續推行甚至拓擴大海外訓練。

職本次赴製造廠家實習，接受廢熱回收鍋爐設計、安裝、運轉控制、維護保養等基礎訓練，雖與林口電廠燃煤電廠為不同類型之火力發電機組，但隨著國際間環保意識的抬頭，以天然氣為燃料的發電廠，尤其是高效率的複循環發電機組，勢必成為未來台電公司發電機主的主流，藉由此機會不但可以多方比較各廠家優缺點，更是可以了解國際上發電設備的發展趨勢，如未來實習能同時安排不同廠家的參訪，更能開拓公司的國際視野。

### 二、實習建議

在實習期間觀摩 GE 公司訓練中心，其工安推行與環境整理確實做得徹底，包括工廠環境的整潔、材料的整理整頓，甚至是維護工具收納處及使用動線均早已納入廠區整體設計中，方便取用、不易出錯，整體感受上井然有序，未來職於大修或年度維護工作中也會與同仁分享 GE 公司訓練中心的訓練經驗，參考其做法規劃現場維護工具收納處及使用動線。

本次廢熱回收鍋爐設計、安裝、運轉控制、維護保養的課程僅一人參加，並不太符合經濟效益，據 GE 公司訓練中心說明，訓練課程均以一班 15 人進行規劃，而其他國家派遣至 GE 公司訓練中心的訓練人員亦多數為 10 人以上於同一課程進行訓練，如公司能同時派遣多人參加課程，不但能在團體討論中激起更多火花，對課程的了解能更深入也更符合經濟效益。

GE 公司訓練中心設置許多大型設備用以教學與訓練，台電雖於全台各地設有大大小小之訓練中心，但僅限於小型設備及基礎量測與檢修等訓練，對於大型設備如大型風扇、泵類、汽輪機、大型閥件等訓練均相當缺乏，而現場實際上最需要且最為重視的就是大型設備的維護技術與訓練，若日後訓練中心能補足大型設備的訓練規劃，必能對現場的維護工作和台電公司供電能力及穩定性有莫大的幫助。