

出國報告（出國類別：實習）

進行通霄計畫熱回收鍋爐之規劃設計、製造、測試、運轉及維護等實習訓練

服務機關：台灣電力股份有限公司

通霄發電廠

姓名職稱：李恒儀 鍋爐維護專員

派赴國家：日本

出國期間：105 年 08 月 21 日至

105 年 09 月 03 日

報告日期：105 年 09 月 26 日

摘要

通霄更新擴建計畫採用複循環火力機組，使用天然氣作為燃料，簡述其發電原理，發電機組的機械部分大致以氣機(Gas Turbine, GT)、熱回收鍋爐(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)、汽機(Steam Turbine, ST)組成，氣機是熱量的來源，藉燃燒天然氣，產生高溫高壓的燃氣推動葉片，進而轉動發電機發電，而這些作功後的熱燃氣，仍然帶有相當大的熱量，由熱回收鍋爐回收其熱量，爐水經過鍋爐內部熱交換器吸熱，加熱成過熱蒸汽供應汽機，推動葉片旋轉而發電。

在本次計畫中，購置三部機組，每部機組為二加一型式，即為兩部氣機、兩部熱回收鍋爐及一部汽機所組成，單部機的裝置容量為 892.6MW，總發電容量為 2677.8MW，硫氧化物 SO_x 的排放量可控制在 10ppm，NO_x 的排放量更可控制在 18ppm，不論是發電容量、發電效率、環保排放等均大幅優於通霄現有發電機組，預期可為國內電力系統提供優良、穩定的供電品質。

通霄新建機組由日本三菱得標，韓國斗山(Doosan)設計製造熱回收鍋爐，中鼎工程建廠營造。本次日本實習訓練地點，位於日本三菱與日立所合併之 Mitsubishi Hitachi Power System, MHPS 公司，設立在日本關西兵庫縣高砂市的生產設計工廠，進行實習訓練。

熱回收鍋爐的實習訓練安排時程共計兩周，第一周為共同課程，與同行之其他組別同仁合併一同於研討室訓練，內容為建廠規劃、發電機組概要等，由三菱原廠工程師及主管進行解說，過程提問解答互動十分熱絡，相互討論交換意見，除室內課程外，另有工廠見習，讓參訪同仁了解相關發電設備的設計、生產及測試流程及廠家生產技術。在每項課程主題結束後，原廠均會安排測驗，確認學員對內容是否清楚並解答釋疑。第二周的課程為各組別的核心項目，在本次熱回收鍋爐訓練中，是由韓國斗山公司先後安排鍋爐設計規劃主管、SCR 工程師、控制

工程師及計畫經理進行課程內容講解。

熱回收鍋爐課程包含製造廠家發展介紹、鍋爐各項主要及輔助設備、鍋爐設計概念、鍋爐飼水流程及控制系統、建廠規畫等，經過這次訓練對熱回收鍋爐的認識更深更廣也更加深刻。此外，與原廠工程師面對面研討議題，對於紙本描述無法清楚傳達的細節，有了清楚釐清，令人深感獲益良多。帶著這些心得內容回國與同仁分享、報告，盼本次出國實習的經驗能讓同仁對機組有深入的了解，在往後的運轉及維護上，能夠更加得心應手。

目次

一、目的	5
二、過程	5
1.實習行程	5
2.實習課程	5
三、心得與建議	6
1.心得	6
a.三菱高砂製作所工廠參訪	6
b.熱回收鍋爐及熱力循環	9
c.鍋爐飼水流程(高/中/低壓三級系統)	18
d.熱回收鍋爐設計參數	23
e.SCR 系統及對應之鍋爐設計	27
f.維護	33
g.建廠規畫	35
2.建議	35
四、參考文獻及圖片出處	36

一、目的：

本次通霄更新擴建計畫，由日本三菱公司得標，預計建造三部屋內式熱循環機組，單部機組高達 89.26 萬瓩，其設計較通霄電廠現有機組在效率、發電容量、設備生產及電腦控制技術等等均有相當程度的進展，故赴日本三菱原廠，進行通霄計畫主發電設備統包工程採購案熱回收鍋爐規劃設計、製造、測試及運轉維護等實習訓練。

二、過程：

1.實習行程

本次赴日實習訓練行程安排如下：

項次	起始日	迄止日	前往機構	國家	工作內容
1	105.08.21	105.08.21			大阪移動至高砂
2	105.08.22	105.08.26	三菱重工高砂製作所	日本高砂	一般共同課程
3	105.08.27	105.08.28			例假日
4	105.08.29	105.09.02	三菱重工高砂製作所	日本高砂	熱回收鍋爐之規劃設計、製造、測試及運轉維護
5	105.09.03	105.09.03			高砂—大阪關西機場—桃園機場

表(一) 實習訓練日程表

2.實習課程

本次訓練日本三菱廠家所安排的實習課程如下：

日期	課程安排	
105.08.22	Common Curriculum	Shop Tour
105.08.23		Heat Balance
		General Arrangement
105.08.24		P&I Diagram
105.08.25		P&I Diagram
105.08.26	Operation Procedure	
		Interlock

105.08.29	HRSG	Introduction Design Parameters
105.08.30		Description of Major Components
105.08.31		SCR HRSG System & Control
105.09.01		HRSG System & Control
105.09.02		HRSG Erection Test (Certification)

表(二) 實習課程課程安排表

三、心得及建議：

1.心得

a.三菱高砂製作所工廠參訪

日本高砂三菱製作所進行的訓練課程安排共兩周，分為兩部分，上部分是一般共通課程，為三菱發電機組概述，在熱回收鍋爐方面有熱平衡參數說明、簡介鍋爐飼水流程、鍋爐運轉程序等，下半部分由熱回收鍋爐廠家進一步詳解鍋爐設備、製造及設計等內容。

共同課程	工廠參觀	葉片工廠	1.成型	素材>研削>底部加工>冷卻孔加工	LPPS APS HVOF	銅電極四軸加工
			2.塗佈	清潔>PS(Plasma Spray)		Low Pressure Plasma Spray
			3.TBC	Thermal Barrier Coating		Atmospheric Plasma Spray
			4.尺寸確認	QC		High Velocity Oxygen Fuel
			轉子工廠	1.成型 2.安裝		兩端轉子焊接>NC外徑切削>葉片溝槽銑切 葉片安裝>高速旋測>震動測量
		空氣動力實驗室	Flow Anaysis <-雙向設計-> Component Test			
			CFD 無因次分析 小模型(壓力量測) Profiling Flat v.s. 3D			
		燃燒實驗室	目標	Thermal Nox Stable Combustion 降低燃燒震動現象		
			手法	雷射光學速度顯像儀(震動周期)		
			R&D	Concept > Air Flow Test >	HP Component Test Atomosphere Full Scale Test HP Full Scale Test >WorkShop 實機測試	
	加工工廠	製造	澆鑄>單晶			
	其他	小型發電廠	實驗及驗證性能			
		RMC	遠端數據監視中心(Remote Monitoring Center)			

表(三) 三菱高砂製作所工廠參訪內容整理表

第一周的訓練課程開始於日本三菱高砂製作所之工廠參訪，該工廠原為三菱重工，為造船機械廠，後來與日本日立公司合併成立三菱日立電力系統公司(Mitsubishi Hitachi Power Systems, MHPS)，製作所內有行政大樓、研發實驗室、生產工廠等。本次參觀以下站點：葉片工廠、轉子工廠、空氣動力實驗室、燃燒實驗室、機械加工工廠、小型發電廠及遠端數據監視中心。由於三菱公司技術保密之故，工廠內禁止攝影，故關鍵製程、詳細生產技術或與本次實習內容較不相關的實驗室或產線，便沒有被安排於參訪流程。特摘錄工廠參訪過程及各站點之工程師簡報重點，如表(三)所示，並說明如後。

葉片工廠－葉片在初步成型之後，完成底部鳩尾銑切、葉片空氣冷卻孔的放電加工、隔熱保護層電漿噴佈、外觀尺寸等品質確認。

轉子工廠－受限於大型轉子長度無法一體成型，故需將轉子拆成兩段各別進行加工，加工完成再行焊接。完成焊接後的轉子由 NC 切削外徑，接著以特殊刀具銑出安裝葉片的鳩尾槽，以接續進行葉片安裝。完成葉片安裝後的轉子仍須經過高速旋轉測試，確認震動情形並藉此調整配重。

空氣動力實驗室－以 CFD(Computational Fluid Dynamics)輔助設計葉片 3D 幾何形狀並建立無因次的縮小模型進行風洞實驗，經設計的葉片遍佈著連結至壓力傳送器的微小銅管，建立出葉片壓力分布，進而重現流經葉片之流線、流場等資訊，由於技術能力的研發提升，工程師針對壓縮機葉片提高壓縮比，渦輪機葉片最佳化，設計出更高效能的葉片，以建立發電機組中工作流體流動的理想流場。

燃燒實驗室－為滿足發電機組效率提升的需求，氣機不同負載對應的空燃比變化、燃燒溫度提高、壓縮比提升，因應而生的熱因性氮氧化物生成、燃燒脈衝震動、不穩定燃燒等課題，皆隸屬於燃燒研究的重要領域，三菱高砂製作所之燃燒實驗室對上述燃燒問題，進行燃燒分析、燃燒最佳化設計等工作。從該部門的工程師向我們所展示的介紹影片，可知在分析法上，三菱透過 CFD、視覺化雷射光學顯像儀及實體模型驗證，對燃燒現象分析及設計驗證。燃燒工程師設計燃燒器時，先整理需求條件，建立設計概念，完成設計後，通過 Air Flow Test，便可進行壓力元件測試，開始大氣壓力/高壓下的全尺寸模型驗證，最後是 Workshop 的實機測試。

小型發電廠－分別在設計及出廠驗證兩階段的氣機，將在三菱高砂製造所內部的小型發電廠試行運轉，分別測試其設計效能及性能驗證，以確保氣渦輪機功能、可靠耐用性。此處設立有具控制盤面控制室，實時狀態監控的顯示器，也配置有爐控人員，與一般電廠十分相近。除了研發實證的用途外，小型發電廠所發出的電力也併入關西地區電網售電，將效益最佳化。

遠端數據中心(Remote Monitoring Center, RMC)－此為三菱在高砂製作所設立數據中心，負責收集三菱在各國發電設備機組運轉的各項數據，當機組發生故障時，可由資料庫分析回推發生原因，找出問題點分析破損的進展趨勢，進而以大數據(Big Data)的運作形式發展出預防診斷模型，協助客戶安排大修時程及異常時遠端處理，同時相關的數據也回饋到設計部門進行產品設計的改良。

b. 熱回收鍋爐及熱力循環

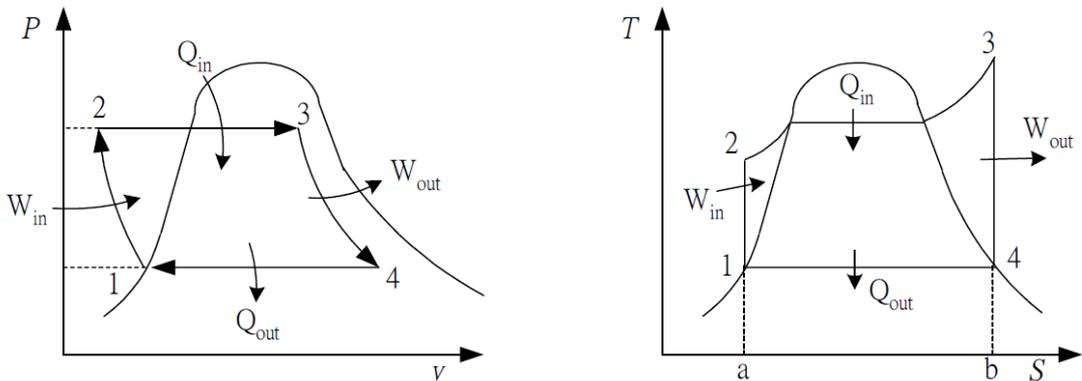
Rankine Cycle 是熱回收鍋爐運行的熱力循環，通常以水作為工作流體。理想的 Rankine Cycle 有四個過程，如圖(一)，實際的 Rankine Cycle 則因為不可逆性的增加，在 $1 \rightarrow 2$ 及 $3 \rightarrow 4$ 有向著熵增的方向傾斜，如圖(二)，此即為熵增原理：

$1 \rightarrow 2$ ：等熵壓縮

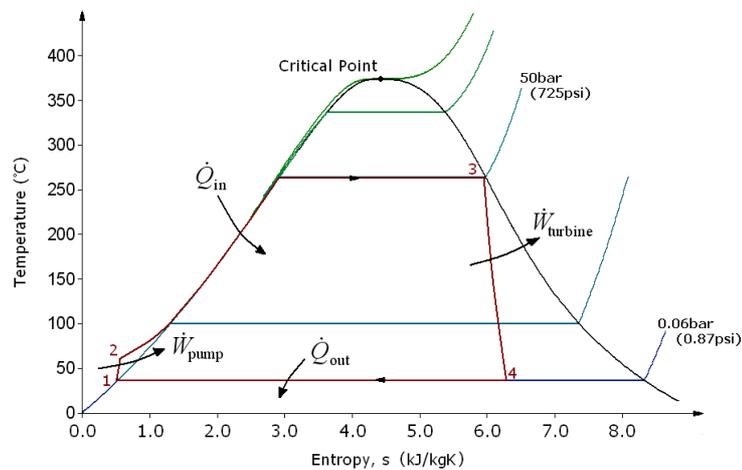
$2 \rightarrow 3$ ：等壓加熱

$3 \rightarrow 4$ ：等熵膨脹

$4 \rightarrow 1$ ：等壓排熱



圖(一) 理想 Rankine Cycle



圖(二) 實際 Rankine Cycle

以熱力學基礎並輔以溫-熵圖(T-S Diagram)來計算 Rankine Cycle 的運轉效率如下：

$$\eta = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$$

又

$$Q = \int T ds$$

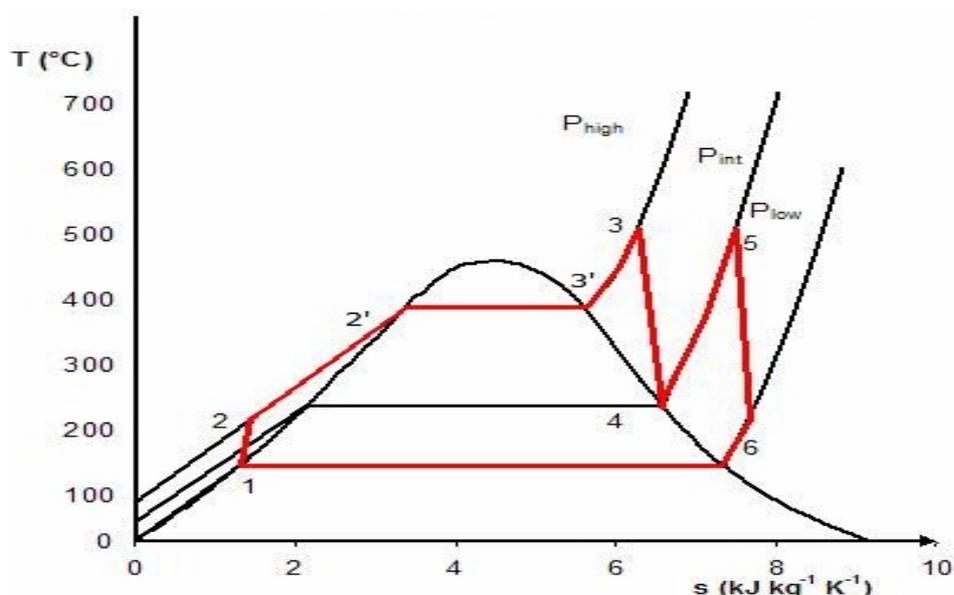
將上式改寫為：

$$\eta = \frac{\int_2^3 T ds - \int_4^1 T ds}{\int_2^3 T ds}$$

$$= \frac{(\text{面積 } a-1-2-3-4-b-a) - (\text{面積 } a-1-4-b-a)}{(\text{面積 } a-1-2-3-4-b-a)}$$

要增加熱效率可由增加(面積 $a-1-2-3-4-b-a$)及減小(面積 $a-1-2-3-4-b-a$)兩個方面著手，而減小(面積 $a-1-4-b-a$)因受限於冷凝器一定的真空度及低溫冷庫(Cold Sink)溫度為海水溫度，故增加(面積 $a-1-2-3-4-b-a$)，以再熱型式增加其面積是可行的辦法。

通霄新建機組的中壓段，設計即為再熱的 Rankine Cycle，由圖(三)說明此流程：飼水泵將水打入熱回收鍋爐(1→2)，爐水經過省煤器(Economize)的加熱(2→2')，在蒸發器(Evaporator)轉為將爐水加熱成蒸汽(2'→3')，經過熱器(Superheater)加熱蒸汽成為過熱蒸汽(3'→3)，接著通到汽機(Steam Turbine)作工(3→4)，接著通過再熱器(Reheater)使蒸汽再熱(4→5)，再次進到汽機作工輸出機械能(5→6)，推動發電機轉成電能併入電網，由該 T-S 圖來看，可以增加 Q_{in} 的面積增加，帶入更多熱量，並提升效率。



圖(三) 具再熱的 Rankine Cycle

通霄更新擴建計畫所規劃的熱回收鍋爐，具備高、中、低等三級壓力，所產生的蒸汽主要供應至汽機發電，一部份的蒸汽作為氣機的冷卻系統，另一部份作為加熱天然氣的熱源，以下分別簡述其流程：

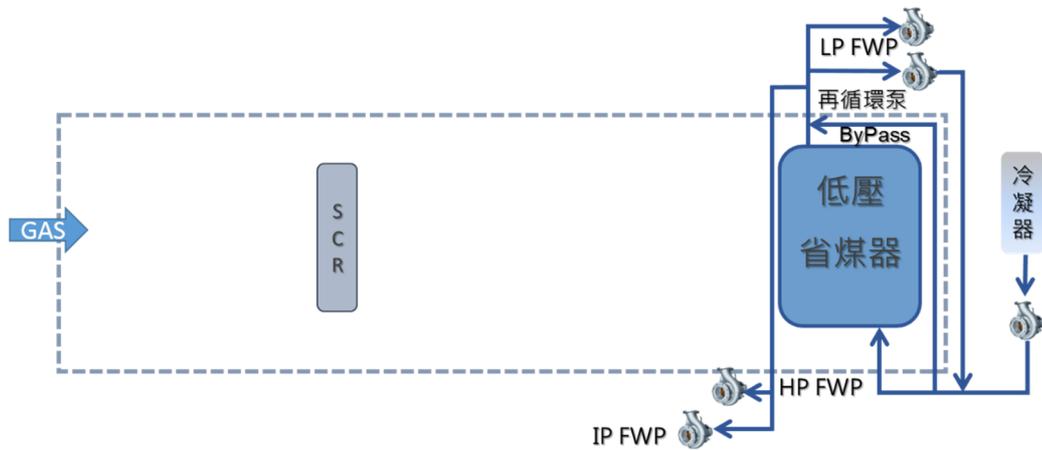
【供應發電】

在熱回收鍋爐的汽水流程中，冷凝水泵自熱井取水，經格蘭蒸汽冷凝器→充放洩水熱交換器→TCA，試運轉需要，飼水可全部、部分或旁通過低壓省煤器，進入飼水泵的共同取水口集管，分別由低壓、中壓及高壓飼水泵將飼水各泵送進其壓力之管線系統，詳圖(四)：

低壓：低壓系統在低壓飼水泵後進入低壓汽水鼓→低壓蒸發器→低壓過熱器，再與汽機中壓段已作完工的中壓蒸汽混合進入汽機低壓段作工，推動汽機低壓段後，進入冷凝器，完成低壓循環，如圖(五)。



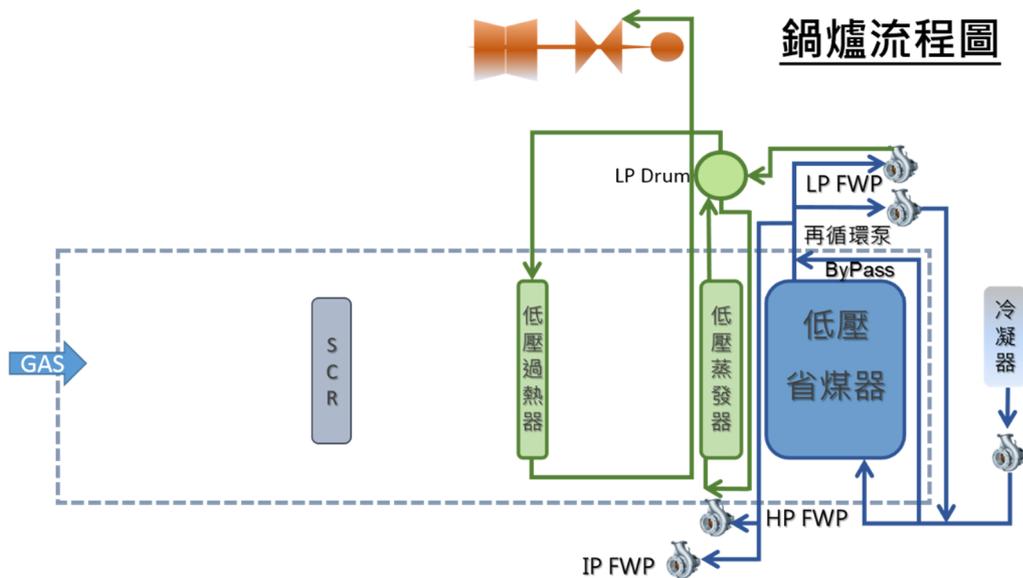
鍋爐流程圖



圖(四) 鍋爐流程圖－低壓省煤器段

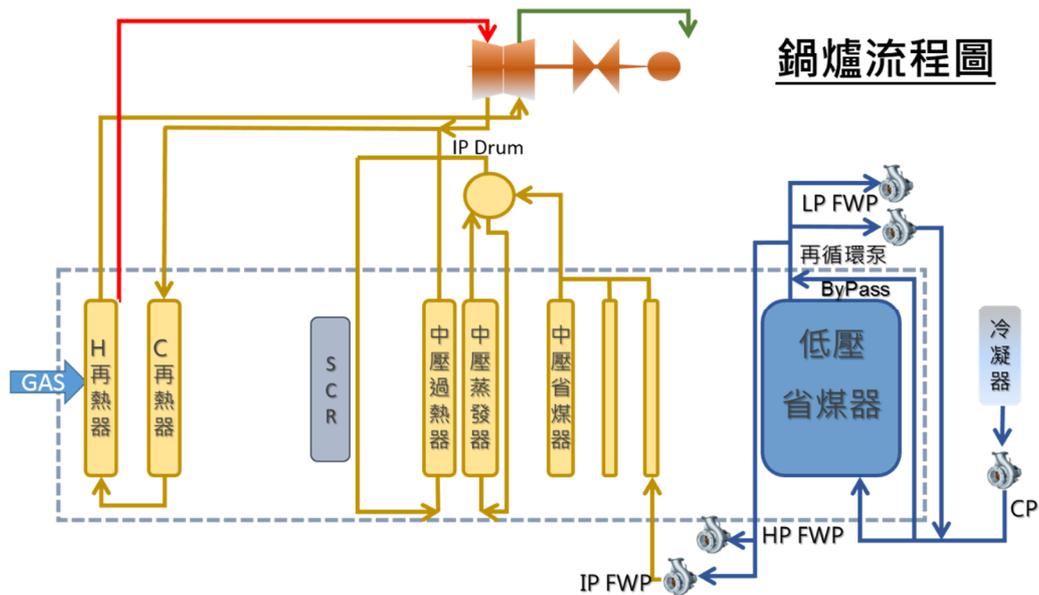


鍋爐流程圖



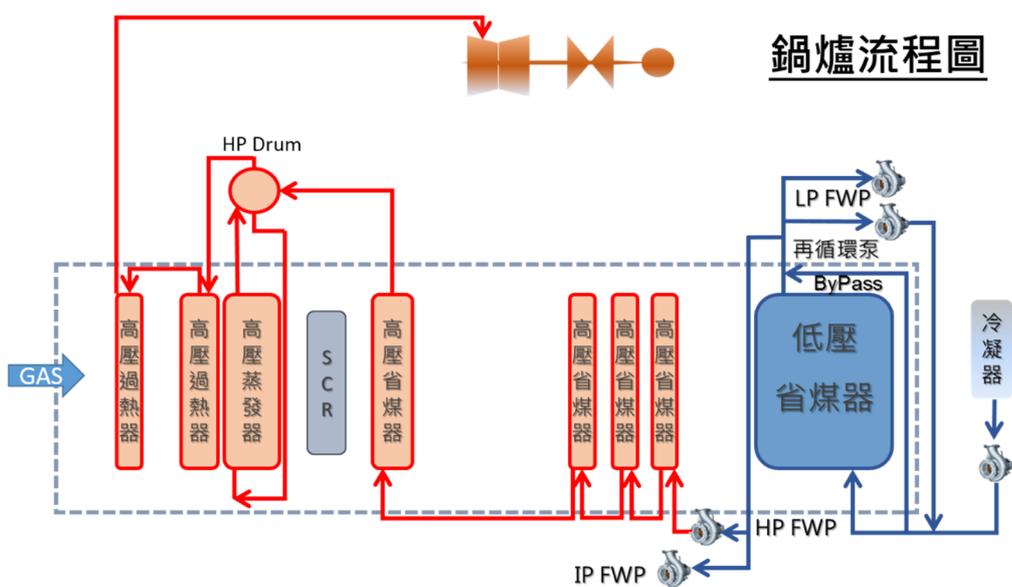
圖(五) 鍋爐流程圖－低壓段

中壓：中壓系統從中壓飼水泵開始，經過中壓省煤器→中壓汽水鼓→中壓蒸發器→中壓過熱器，再與汽機高壓段已做完工的高壓蒸汽混合，進入冷再熱器→熱再熱器，接著進入汽機中壓段作工，隨後併入低壓段。中壓段在冷再熱器及熱再熱器間具有噴水減溫，由中壓飼水泵而來，見圖(六)說明。

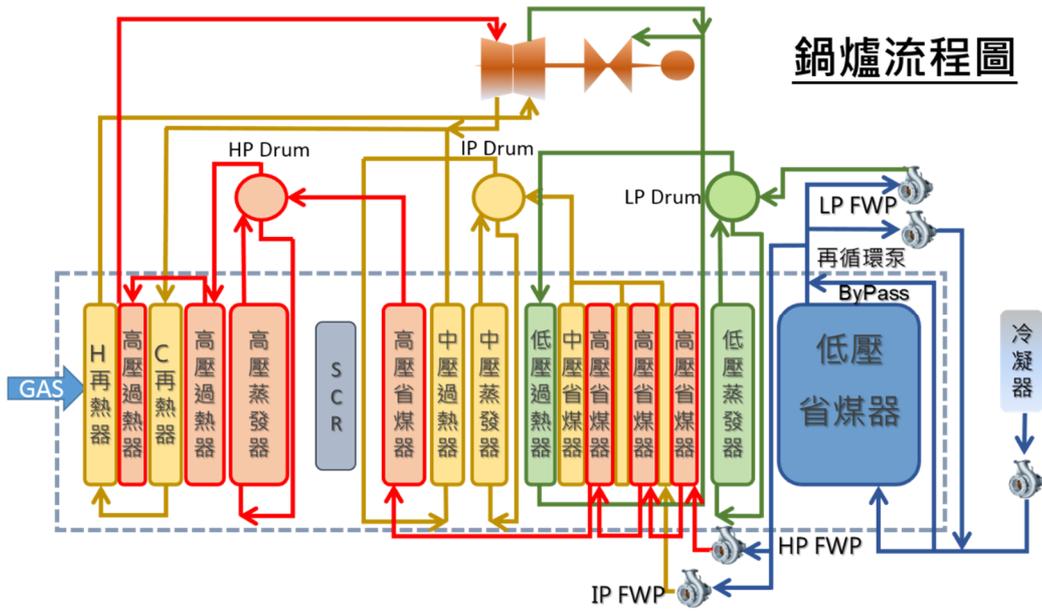


圖(六) 鍋爐流程圖－中壓段

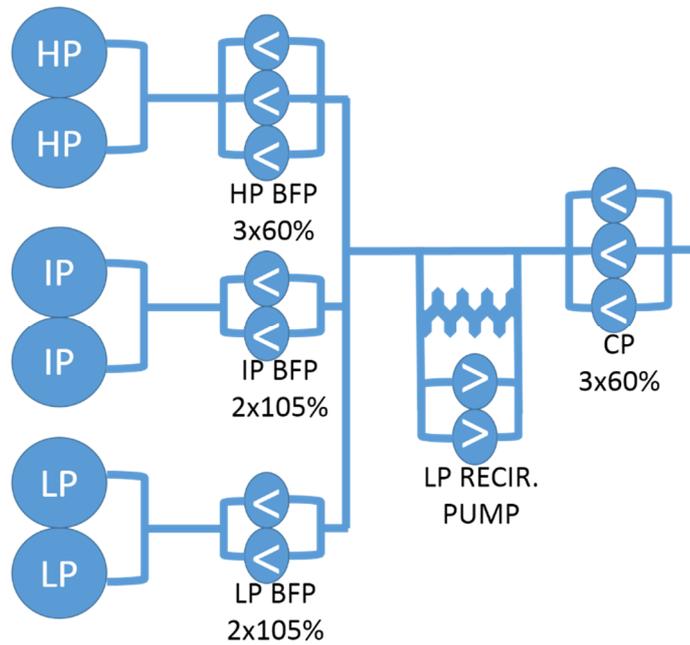
高壓：高壓系統則從高壓飼水泵開始，經過高壓省煤器→高壓汽水鼓→高壓蒸發器→高壓過熱器，然後進入汽機高壓段作工，之後併入中壓段。高壓段在過熱器間亦有噴水減溫的設計，該飼水來源為高壓飼水泵，如圖(七)所示。



圖(七) 鍋爐流程圖－高壓段



圖(八) 鍋爐流程圖



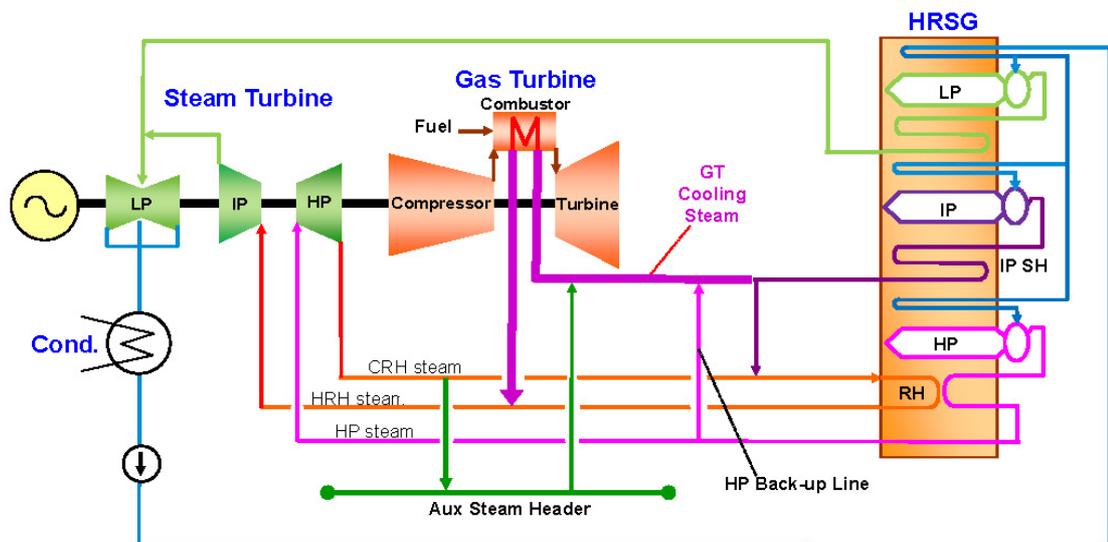
圖(九) 熱回收鍋爐迴轉機配置示意圖

圖(八)為合併高/中/低壓三級壓力段的熱回收鍋爐流程圖，綜觀鍋爐爐管排列，雖然交錯複雜，但若依個別的汽水流程脈絡，將有助於理解廠家規劃。圖(九)為統整熱回收鍋爐迴轉機之配置及容量示意圖。

【氣機冷卻】

冷卻蒸汽(Cooling Steam)

三菱 J-Type 氣機採用蒸汽對燃燒器冷卻，在正常運轉時，滿足條件的中壓蒸汽做為冷卻用蒸汽，從中壓過熱器分出，進入氣機使燃燒器導管(Combustor Liner)降溫，同時也因此吸收熱量，而提升溫度，由於溫度尚高，可加以回收，提高整體熱效率，於是廠家設計將該蒸汽與熱再熱器蒸汽混合，進入汽機作工。但若中壓蒸汽品質不良時，則改用備用蒸汽，備用蒸汽來源為高壓蒸汽或輔助蒸汽，如圖(十)所示。

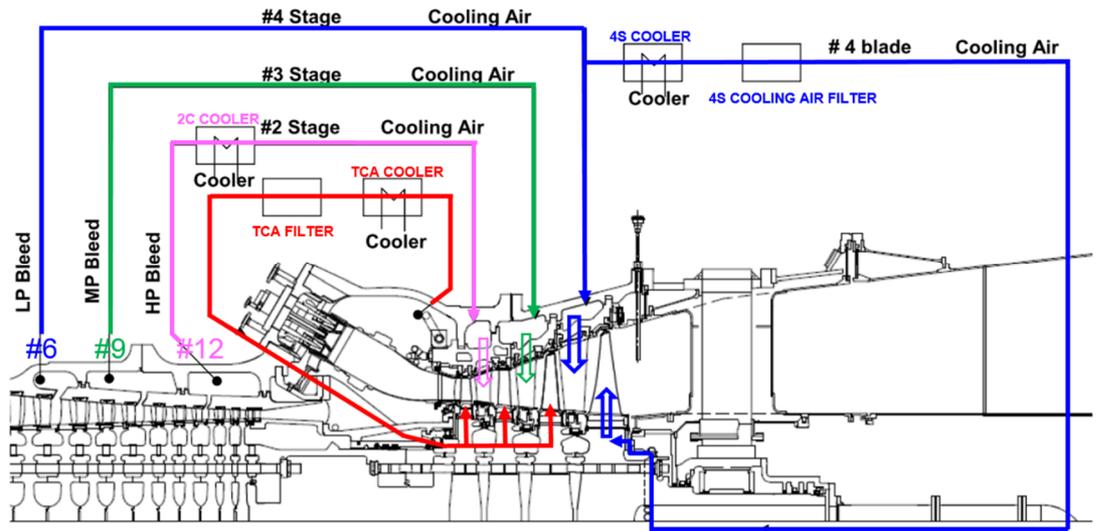


圖(十) 冷卻蒸汽流程示意圖

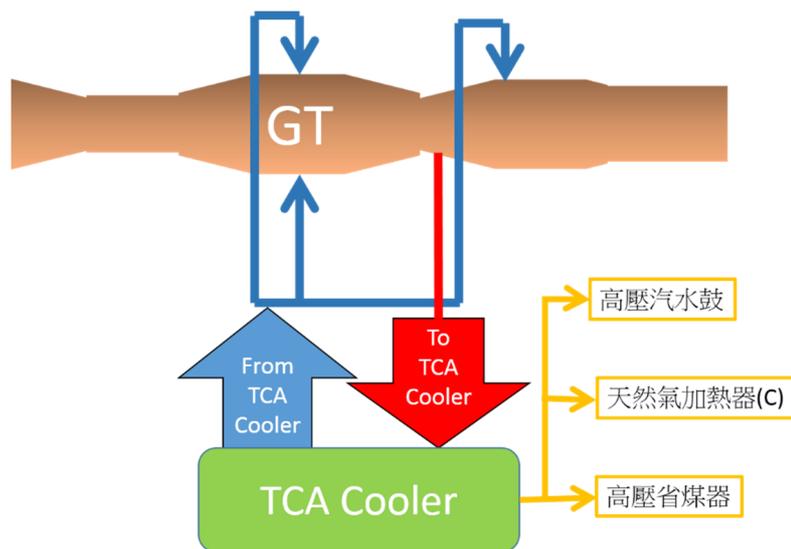
氣機冷卻空氣(Turbine Cooling Air, TCA)降溫

三菱 J-Type 氣機的葉片有冷卻設計，以空氣流動進行降溫，以防止葉片溫度過高。冷卻用的空氣從氣機空壓機燃燒器外缸引出，溫度約 487°C，需要先降溫至合適的溫度區間，設計有 TCA Cooler 裝置，以高壓飼水泵打出的

飼水，對壓縮過的熱空氣減溫至 210°C，做為冷卻用空氣，參見圖(十一)紅線所示。高壓飼水經 TCA Cooler 熱交換後，有三個走向，第一是流至高壓汽水鼓，第二是流向高壓省煤器的第五排爐管，第三是流向天然氣加熱器(C)，如圖(十二)。



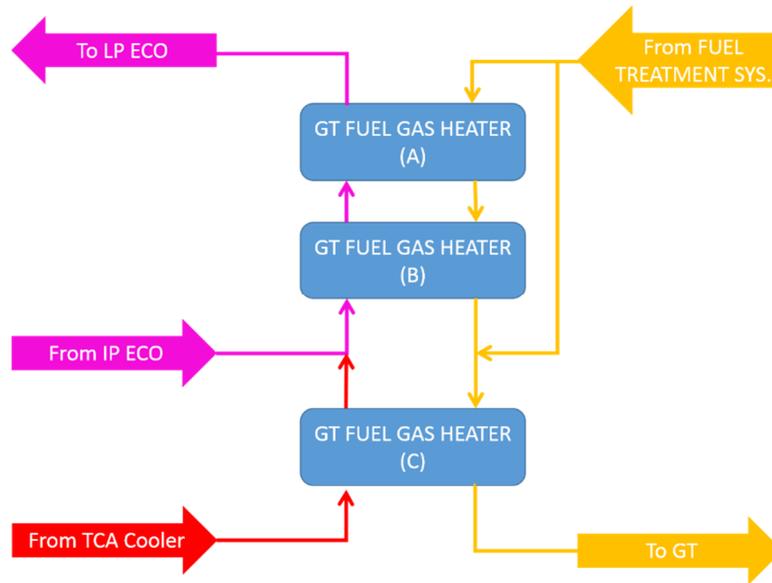
圖(十一) 氣機冷卻空氣流程圖



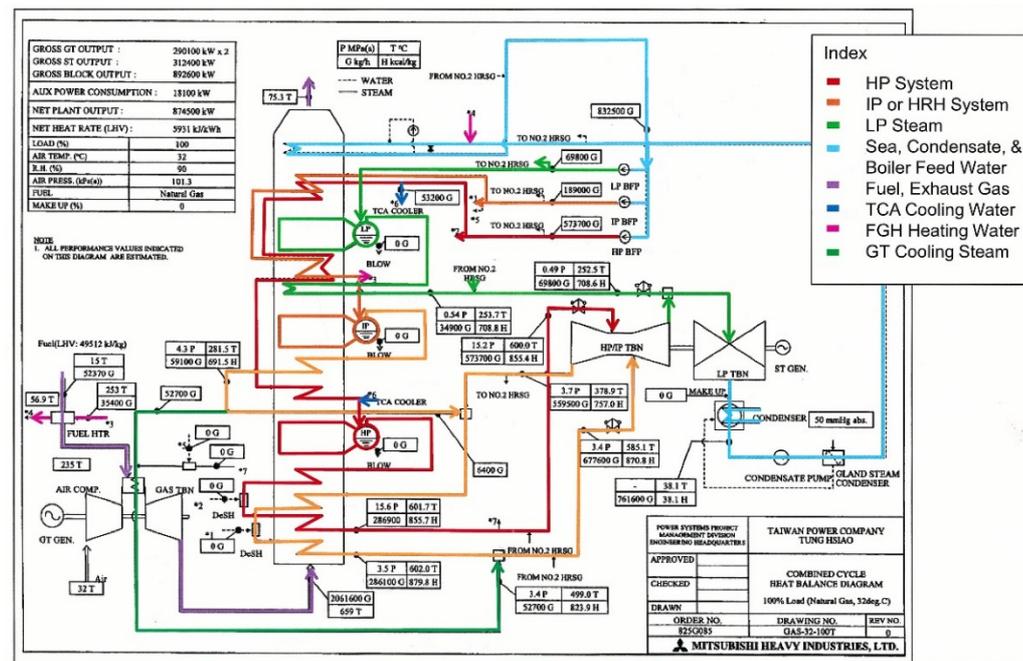
圖(十二) TCA Cooler 熱傳遞示意圖

【天然氣加熱】

為了提升氣機燃燒效率，三菱氣機在天然氣注入燃燒室前設計了預熱裝置，見圖(十三)，其天然氣加熱器共分為(A)(B)(C)三組，加熱器(C)接受來自於TCA Cooler 的蒸汽加熱天然氣，然後該蒸汽再與來自中壓省煤器的蒸汽混合進入加熱器(B)，接著再進入加熱器(A)，然後回到低壓省煤器，經過蒸汽的熱交換後，天然氣逐步加熱到設計規範的溫度範圍，送入氣機燃燒。



圖(十三) 天然氣加熱器



圖(十四) 熱回收鍋爐飼水流程圖

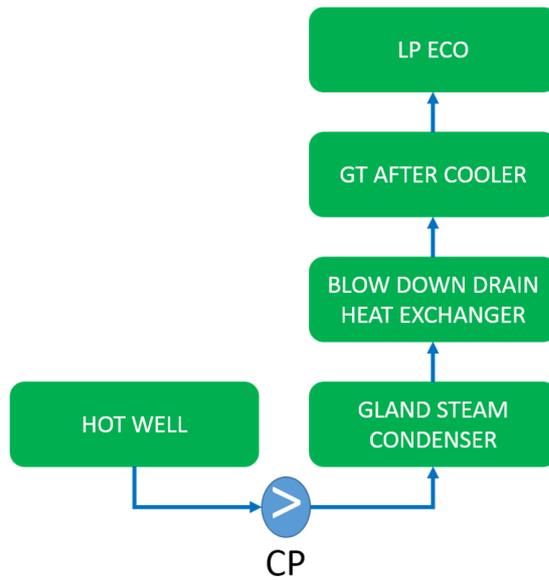
以上介紹了熱回收鍋爐的高/中/低三級壓力飼水系統、天然氣加熱系統、氣機空氣冷卻水之蒸汽冷卻系統、氣機冷卻蒸汽系統，可匯整如圖(十四)之總圖。

c.鍋爐飼水流程(高/中/低壓三級系統)

熱回收鍋爐的設置是為了將氣機排出之熱燃氣進行熱量回收，在其內部安裝有熱交換用的鰭片爐管，分別將爐水加熱，以完成 Rankine Cycle 吸熱階段的循環，從氣機熱燃氣排出口開始，經過熱回收鍋爐，到排氣煙囪所經過的爐管，依序為氣機→膨脹接頭→熱再熱器→高壓過熱器 4→高壓過熱器 3→冷再熱器→高壓過熱器 2→高壓過熱器 1→高壓蒸發器→AIG(Ammonia Injection Grid)→SCR(Selective Catalytic Reduction)→高壓省煤器 5→高壓省煤器 4→中壓過熱器→中壓蒸發器→低壓過熱器→中壓省煤器 3→高壓省煤器 3→中壓省煤器 2→高壓省煤器 2→中壓省煤器 1→高壓省煤器 1→低壓蒸發器→低壓省煤器 6→低壓省煤器 5→低壓省煤器 4→低壓省煤器 3→低壓省煤器 2→低壓省煤器 1→膨脹接頭→排氣煙囪。

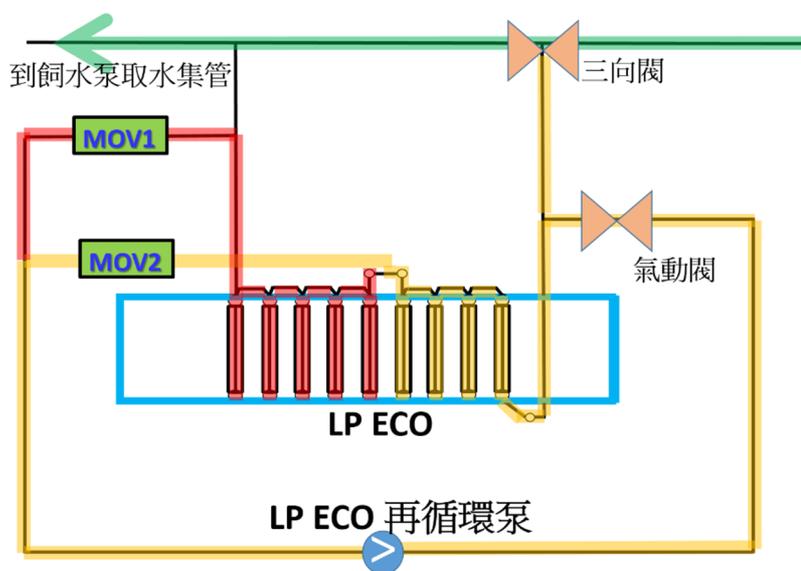
低壓飼水系統

Rankine Cycle 的源頭，自冷凝器之熱井開始，冷凝水由冷凝水泵打到格蘭蒸汽冷凝器，進入熱回收鍋爐沖放洩水熱交換器，接著是天然氣加熱器加熱後熱交換器，再與天然氣加熱器之冷卻水汽混合，見圖(十五)，到此節點處，冷凝水已有效地將格蘭蒸汽、熱回收鍋爐沖放洩水、加熱天然氣後的蒸汽餘熱加以回收，可提升整體效率。接著開始低壓省煤器部分，低壓省煤器的用途為：控制低壓省煤器的進出口溫度、供應預熱後的爐水、控制送往高中低三級壓力飼水泵取水集管的溫度、控制低壓段爐管避免低溫腐蝕。



圖(十五) 低壓省煤器前端飼水流程

已初步加熱的冷凝水，流進低壓省煤器的三向閥，三向閥可以允許飼水全部或部分通過低壓省煤器，也可以旁通而不經過低壓省煤器，可依控制需求調整經省煤器加熱之熱水流量混入飼水以調整溫度。舉例來說，若出口至高/中/低壓的飼水泵取水集管之溫度太高時，DCDAS 透過出口端溫度感應器的回傳數值，送出控制訊號驅動三向閥，將來自省煤器的流量關小，增加其旁通流量。



圖(十六) 低壓省煤器再循環示意圖

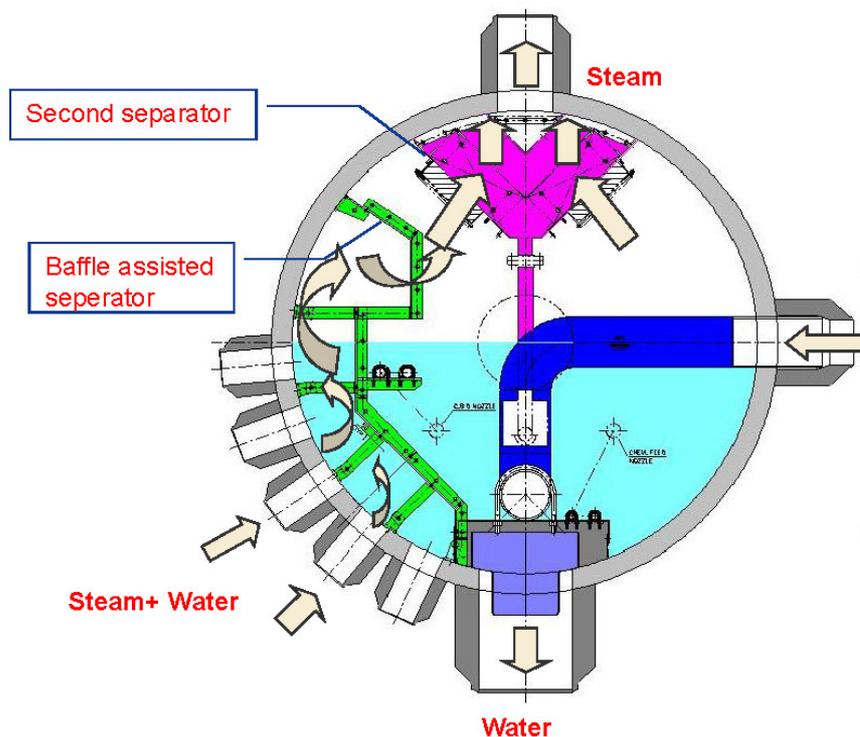
此外，低壓省煤器系統另具備一個系統，做為防止低壓爐管低溫腐蝕之用，雖然通霄更新擴建計畫採天然氣作為燃料，其中硫含量不高，硫份不容易因低溫造成凝結酸蝕，但據韓國斗山廠家解釋，考量低壓爐管段處的熱燃氣溫度及壓力，分析其中水份分壓，並對應其露點溫度，則有可能高於排氣溫度，因而形成微小水滴凝結於爐管之上，所以廠家仍有防止低溫腐蝕的設計。

在此低溫腐蝕的防護設計上，具有兩台低壓省煤器再循環泵，使經過低壓省煤器加熱後的爐水，循環導回混和入低壓省煤器的進水口，以提高流經低壓省煤器爐管的溫度。控制系統依據燃料中的硫份高低，分別由省煤器第 6 段或第 3 段開啟其對應的電動閥引出熱水，分別為圖(十六)中 MOV1 導通的紅線及 MOV2 導通的黃線，根據廠家提供之熱平衡資料，第 6 段溫度為 155.7°C，第 3 段溫度為 100.5°C。控制系統根據燃料種類，切換高/低硫模式，對應省煤器進口溫度需求作為控制目標，再根據低壓省煤器再循環泵出口流量，改變氣動閥開度以調整再循環熱水回流量。

前文曾描述低壓省煤器進口端的飼水流程，已回收包含 TCA、沖放洩水及格蘭蒸汽之熱量，故水溫可獲提升，若溫度已滿足或過熱於三級壓力飼水泵取水口的溫度要求，便不須再經由低壓省煤器的加熱，飼水可以完全旁通，此為第三種控制操作模式。

第四種控制模式，可以維持排氣煙道在 102°C 的排氣溫度，控制系統會限制流過低壓省煤器在最低流量，降低熱燃氣交換至爐水的熱傳量，同時，也控制了熱燃氣經過低壓省煤器的溫降，使熱燃氣可維持高溫從排氣煙囪排出。完成加熱後的飼水進入飼水泵共用取水集管，再分別由三級壓力飼水泵進入三級循環。

低壓飼水泵將爐水送入低壓汽水鼓內部，飽和狀態的爐水經降水管(Downcomer)向下流動，受低壓蒸發器加熱蒸發，汽/水混和狀態爐水，因自然循環回到汽水鼓，汽水鼓內部有兩層汽水分離器，使液態爐水落下，再進入降水管循環，分離出的蒸汽受壓力推進至低壓過熱器逐漸升溫為過熱蒸汽，汽水鼓內部構造如圖(十七)所示。



圖(十七) 汽水鼓內部構造圖

經過熱器的蒸汽，若符合運轉模式的蒸汽品質要求，則導入汽機作工。然而，在啟動初期、跳機等特殊模式及狀況下，為保護後方的汽機，不通入蒸汽而需使其旁通，旁通蒸汽先行降溫，混合冷凝水泵打出的冷凝水，進入冷凝器，由海水帶走爐水熱量。

汽水鼓尚有其他附屬設備，敘述如後，根據壓力容器相關規範，汽水鼓應有 100%及 103%設定壓力之安全閥，第三組安裝於過熱器出口集管，當壓

力異常上升時，先由第三組安全閥洩放壓力，管內留存的蒸汽可以吸收熱量保護爐管。在低壓汽水鼓的兩側各設有一組液位計、汽水鼓進口端及低壓過熱器出口各一組經壓力及溫度補償之流量計，這些數據回傳至 DCDAS，控制系統便能根據汽水鼓液位、流入水量、流出汽水量進行控制，此即為三元控制(若在低載時簡化為汽水鼓液位之單元控制)，控制系統藉調整注入及流出電動控制閥開度調整汽水鼓水位。

舉例來說：

若流出汽水鼓淨值大於流入汽水鼓水量

則汽水鼓液位下降

其中，

流出汽水鼓淨值 = 低壓蒸汽流 + 低壓汽水鼓連續沖放流

另外，低壓汽水鼓壁內外側各裝有溫度感應器傳送回 DCDAS，但僅為監視作用，確認內外壁溫度差異，未進行控制之訊號回授。為了確保汽水鼓內及飼水系統的循環水質，必須沖放汽水鼓底部的化學沉積不溶物，在正常運轉下，配置於高/中/低壓汽水鼓的連續沖放閥會開啟 30%開度，以連續沖放出不溶物質。而當汽水鼓液位異常高時，間歇沖放則能快速釋放汽水鼓內多餘爐水，在液位受到控制回到正常範圍後，關閉間歇沖放閥。

中壓飼水系統

中壓系統從中壓飼水泵開始，中壓省煤器、蒸發器及汽水鼓之控制同於低壓系統，然而，中壓過熱器出口之過熱蒸汽不同於低壓及高壓段的設計，不直接送往汽機中壓段作工，需先混合從汽機高壓段作工完後的蒸汽，以熱再熱器及冷再熱器加熱，獲得再熱過程吸收額外的熱量，熱再熱器及冷在熱器間設置有噴水減溫器，水源來自於高壓飼水泵所引出的爐水，熱/冷再熱器出口溫度傳送回控制系統，在一般運轉及低載時，由系統限制再熱器的蒸

汽溫度，並控制於對應的設計值。

蒸汽經冷/熱再熱器再熱後，送入汽機中壓段作工。同樣的，若遇蒸汽品質不佳、汽機跳機等狀況，則蒸汽走旁通系統，混入冷凝水泵傳送之冷凝水降溫，然後進入冷凝器。

高壓飼水系統

高壓系統由高壓飼水泵開始，相同地具備省煤器、蒸發器、過熱器。在省煤器 4 及省煤器 5 間接收來自於作為氣機空氣冷卻的蒸汽回收餘熱。過熱器 3 及過熱器 4 間安排噴水減溫，減溫水源由高壓飼水泵送出，其設計原理同中壓飼水系統之噴水減溫設計，然而，因為高壓系統的噴水減溫回授的出口流量計位於噴水減溫裝置之後端，已包含噴水的流量，故計算流出汽水鼓必須另行扣除：

$$\text{流出汽水鼓淨值} = \text{低壓蒸汽流} + \text{低壓汽水鼓連續沖放流} - \text{高壓噴水減溫流量}$$

離開高壓過熱器的蒸汽，流向汽機高壓段作工。若需走旁通系統，不同於中/低壓飼水系統，高壓蒸汽不直接進入冷凝器，而是先旁通到中壓的再熱管路，經冷/熱再熱器，再混入中壓蒸汽，進入中壓系統，與中壓蒸汽一起旁通到冷凝器。

d.熱回收鍋爐設計參數

通霄現有機組熱回收鍋爐均採用兩級強制循環鍋爐，由高/低壓循環泵將高/低壓汽水鼓內爐水強制循環至蒸發器蒸發，而新機組的熱回收鍋爐採用自然循環式，汽水鼓中的爐水經由降水管(Downcomer)，向下流到底部集

管，藉由熱燃氣流過蒸發器熱交換鰭片，使熱量傳遞到爐水，爐水蒸發向上推動，蒸汽由上升管(Riser)回到汽水鼓中，完成循環。在此過程中，爐水是自然地循環，不需透過循環泵推動爐水，故在建廠時可以省去循環水泵的成本，自然也不受循環水泵進口端溫度的限制，可以提高爐水循環的溫度進行鍋爐設計，提升熱效率。在後期運轉上，自然循環鍋爐則可省去循環水泵的電力消耗，亦不再因循環泵的檢修、故障等因素而降載、停機，故大大提升了鍋爐運轉可靠性。

降水管中爐水與蒸發器、上升管內水/蒸汽混合爐水之密度差異，是鍋爐發生自然循環的動力，這股動力要克服管內摩擦損失並驅動流體，需滿足：上升管出口的壓力要與降水管的進口處相同，且每個節點(Junction)的壓力相同。另外，在蒸發器及上升管中二相流摩擦力較降水管高上許多，故設計時，也需考量壓降及質量分布的計算。自然循環率(Natural Circulation Ratio, NCR)是自然循環重要的設計指標，定義為：

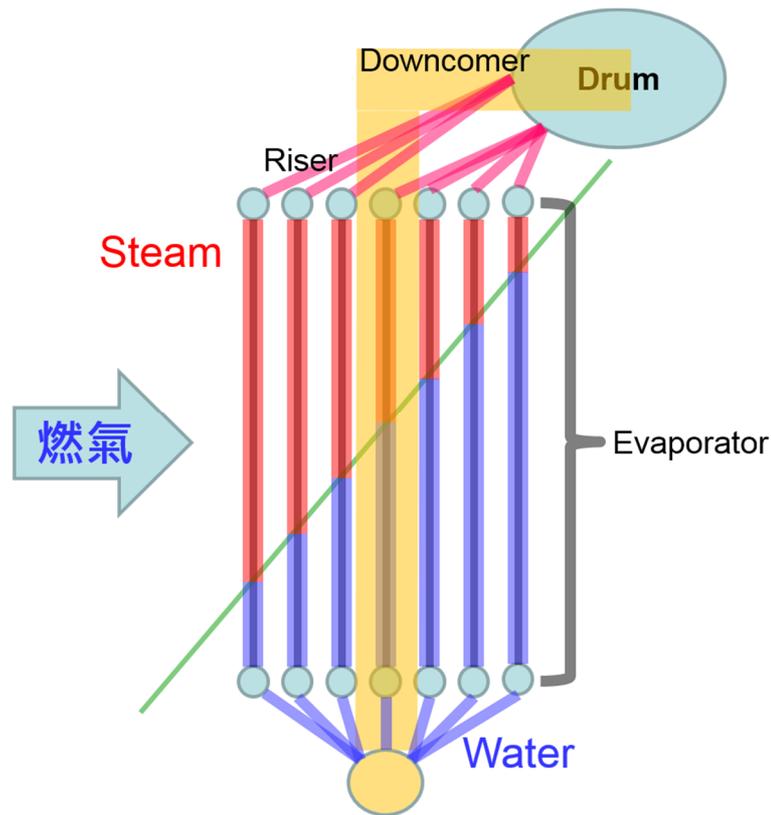
$$\begin{aligned} \text{NCR} &= \frac{1}{\text{Mass Steam Content in Riser}} \\ &= \frac{\text{Mass of Water}}{\text{Mass of Steam}} \\ &= \frac{\text{Mass Flow Downcomer}}{\text{Steam Mass Flow Out of Drum}} > 4 \end{aligned}$$

廠家 NCR 設計建議值約 4~5 間

即：

$$\text{Steam : Water} = 1 : 3$$

蒸發器內部構造如圖(十八)所示。



圖(十八) 蒸發器構造

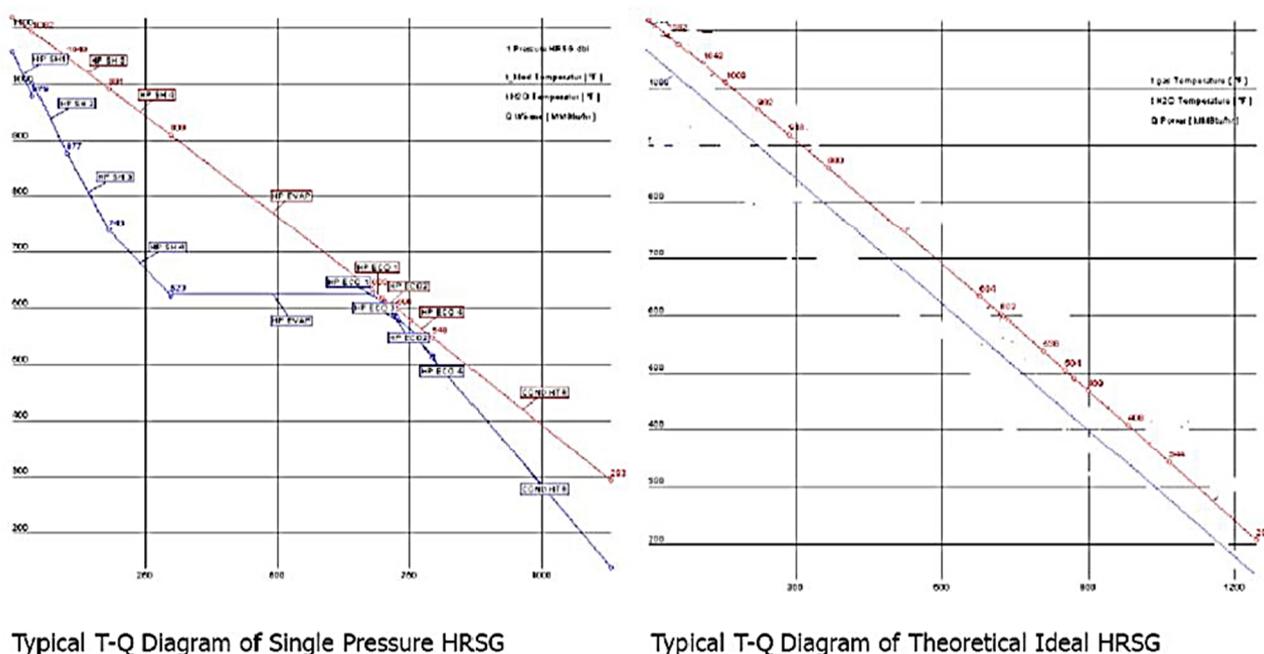
HP		IP		LP	
P(Bar)	Density(kg/m ³)	P(Bar)	Density(kg/m ³)	P(Bar)	Density(kg/m ³)
160	584.95	50	777.36	10	887.13
162	581.11	52	773.38	12	878.35
ΔD	3.84	ΔD	3.98	ΔD	8.78

表(四) 三級壓力汽水鼓性質表

根據廠家的設計參數，爐水流經爐管(Harp)的壓降約為 2Bar、另高/中/低壓力汽水鼓的壓力如表(四)表列，可分別得到其密度，進而算出循環爐水的密度差。很明顯地，低壓段的密度差最大，故在三級壓力段中，低壓的循環優於中/低壓。

複循環機組廢熱回收鍋爐係回收氣渦輪機所排出的熱燃氣熱量，為達到較高的效率，就應針對鍋爐最佳化熱傳設計。圖(十九)為熱燃氣排氣及鍋爐

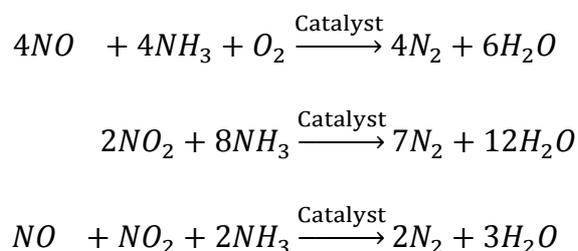
各過程爐水升溫的溫度-熱傳量圖，橫坐標為熱傳量，縱座標為溫度，紅線代表熱燃氣排出經熱交換溫度曲線，深藍色代表鍋爐爐水吸收熱量後的溫度。這兩條線間的面積愈小代表熱回收鍋爐可以吸收更多熱量，達到較高的效率。圖(十八)中，右端為理想的鍋爐熱傳，熱量均勻經過鍋爐回收，然而實際進行 Rankine Cycle 時，須考量爐水的性質狀態(Properties)：以左端的單壓式鍋爐說明，爐水經過省煤器加熱至沸點，並由蒸發器加熱使液態爐水轉成汽態蒸汽，再經過熱器提升至過熱蒸汽，相較於右端理想鍋爐，中央面積區域顯得較大，效率較差。若設計雙級壓力鍋爐並加入再熱(Reheat)，如圖(二十)右側所示，可縮小面積，提升熱回收效率。同理，圖(二十)左端圖示為三級壓力鍋爐，可擁有更多的熱回收量，更佳效率。通霄現有之#1~#6 機組均為雙級壓力鍋爐(即高、低壓)，而本次通霄更新擴建計畫中採用中壓再熱的三級壓力鍋爐，如圖(二十一)，大大提升鍋爐熱回收能力。



圖(十九) 鍋爐溫度-熱傳量圖

其是呼吸系統上的傷害，故環境保護相關規範，對於氮氧化物的排放量日趨嚴格。

一般氣渦輪機排放之氮氧化物分為：燃料性氮氧化物(Fuel NOx)及熱因性氮氧化物(Thermal NOx)，前者肇因於石化燃料中含有機氮成分，經過燃燒氧化反應而成，通霄更新擴建計畫採用天然氣為燃料，其含氮量相當低，絕大部分的氮氧化物為熱因性氮氧化物，該氮氧化物是由空氣中氮氣於高溫燃燒時與氧結合而生。熱因性氮氧化物通常於 1600°C 以上的溫度產生，為了降低氮氧化物的排放，可以從燃燒器中燃燒的形式、燃燒溫度控制、吸附氮氧化物等方向著手。本次更新擴建計畫採三菱 J-Type 之氣渦輪機，燃燒溫度即達 1600°C，除氣渦輪機特殊的燃燒室設計外，在熱回收鍋爐的設計上，採用了 SCR(Selective Catalytic Reduction)系統，用以吸附氣機排出之熱燃氣中的氮氧化物。SCR 透過觸媒催化將氮氧化物與注入的氨(NH₃)反應為氮氣(N₂)及水(H₂O)，反應方程式如下：

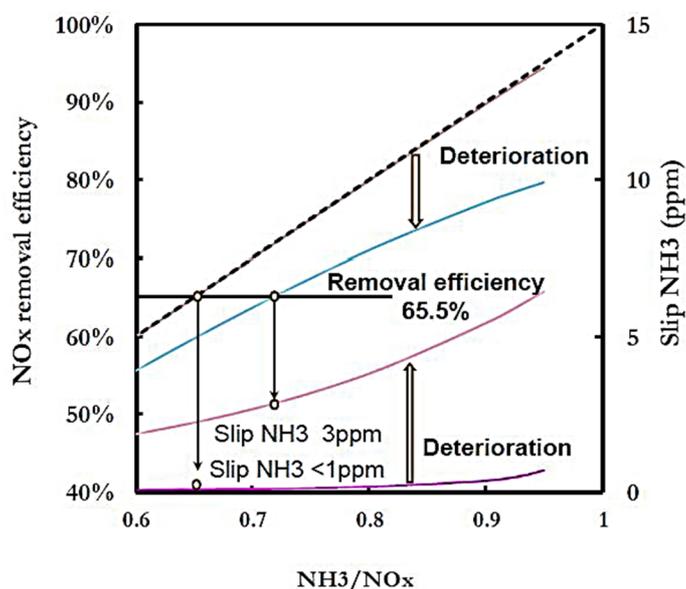


該觸媒反應需高於 300°C，若溫度低於 280°C 則反應停止，為達較佳的反應速率需評估熱回收鍋爐各段熱燃氣溫度，選擇合適區間放置 SCR 系統，在此次的計畫中，SCR 置於高壓省煤器及高壓蒸發器間。由上述反應方程式知：氮氧化物要進行完整的化學反應，需要有足夠的氨，若供應氨量不足將影響氮氧化物反應。在此我們將投入的氨量相較於氮氧化物以比例表示，如圖(二十二)，橫坐標為氨與氮氧化物莫耳數比，縱座標為反應效率，該圖中

黑色虛線為初始的理想反應效能線，當氨與氮氧化物莫耳數比例為 1 時，即代表氮氧化物與充分的氨進行反應，為 100%的效能。在此理想反應效能線上，若氨較氮氧化物少，如比例為 0.6 時，其反應效能降為 60%。

隨著 SCR 的運轉造成設備劣化、老化使得反應效能下降。圖中右端坐標為氨洩漏量(NH₃ Slip)，意指未參與反應的餘氨量，紅色粗線為初始的餘氨濃度，不論氨與氮氧化物莫耳數比多少，氨洩漏量均約略在 1ppm 以下，但隨著反應效能退化至 65.5%時，該線向上移動，為紅色細線，最大氨洩漏量達到 6ppm 左右。表示劣化後 SCR 因反應效能降低，未反應的氨增加，氨洩漏量上升。

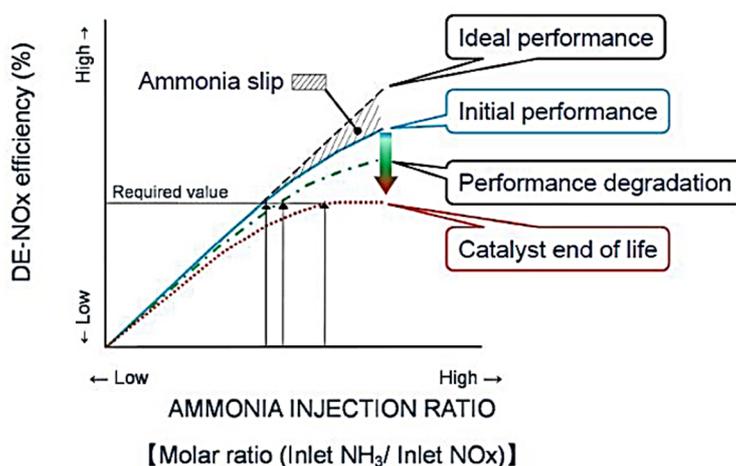
圖中藍線顯示劣化後的 SCR，即便是提供足夠的氨亦無法達到原有的初始理想反應效能，以該圖為例，即為 80%。



圖(二十二) SCR 反應效率衰退圖

SCR 的劣化原因如下：二氧化鈦的燒結(Sintering)，在高溫環境中，二氧化鈦顆粒會燒結於 SCR 的表面，造成反應面積減少。鹼土金屬(如硫化鈣)等硫化鹽類，附著於反應表面。重金屬(如砷)覆蓋 SCR 活性區域使反應效能降低。SCR 催化反應結構上的氫(H)會抓取氨(NH₃)的氫鍵，但若此結構的氫遭到鹼性金屬(如鈉)的置換，原有的反應結構即遭到破壞，同樣造成反應面積下降。上述金屬元素據原廠家說明，來自於氣渦輪機，可能是葉片中或是金屬殼蓋的微量金屬而來。

針對 SCR 壽命，我們需訂定維護備料周期，廠家亦提供校能評估方法：參考電腦儀控系統所記錄之 SCR 運轉時間、進氣及排氣之氮氧化物濃度、注入之氨量等數據進行評估：在固定的氮氧化物排放濃度設定下，控制系統自動調整注入氨量，隨著氨的消耗增加，表示氨洩漏量上升，如圖(二十三)所示，黑色虛線代表理想效能曲線，藍線表初始效能曲線，隨著 SCR 逐漸劣化向紅色的觸媒壽命終止線接近，降至設定的反應效能下限時，無論如何增加氨的注入也無法提升效能，此即為壽命終止曲線。吾人根據上述數據建立趨勢後，便可作為維護更換之依據；除了上述指標外，等溫條件下進出之氮氧化物增減關係、SCR 反應溫度與排氣氮氧化物濃度關係、經過 SCR 壓降是否增加等皆可輔以判斷 SCR 壽命。



圖(二十三) SCR 壽命衰減

SCR 模組臨近之人孔檢修道處有 SCR 快速拆卸模塊，可拆下該模塊送供應商或原廠家實驗室進行效能分析。此外，根據廠家解釋，SCR 的耐用性已經過設計，除非整體的反應效能低下，不然個別區塊的效能下降或注氨孔阻塞及故障，不需要立即更換 SCR 模組或檢修注氨孔。

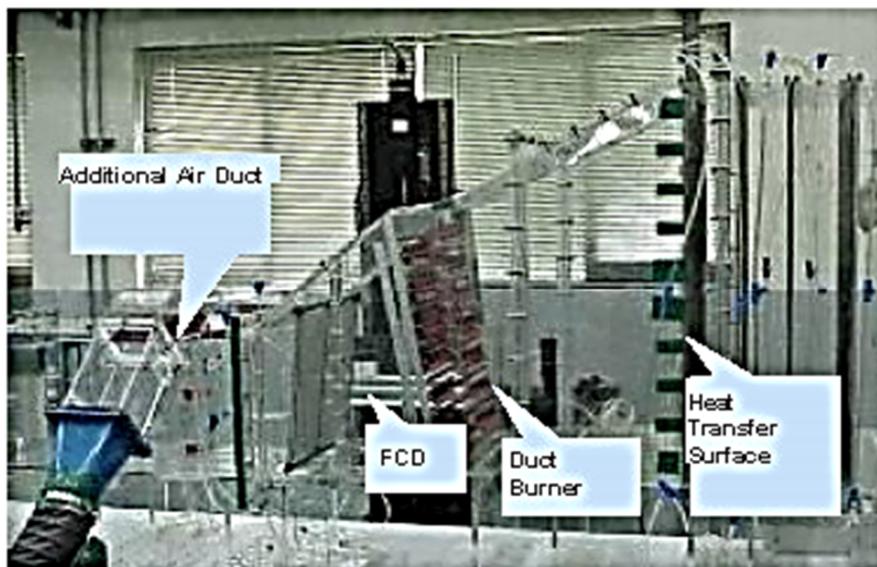
在熱回收鍋爐中，注氨網格均勻噴灑氨氣與氣機排出的熱燃氣混合，再流過 SCR，利用該處的高溫環境，透過 SCR 之觸媒使氮氧化物進行化學反應，廠家需進行流道的設計以確保燃氣充分混合氨，並在 SCR 處反應。前文曾提及 SCR 反應溫度需 300 度以上，在本計畫設計的 SCR 觸媒反應溫度在 370°C ~400°C，對應於熱回收鍋爐，位於高壓省煤器與高壓蒸發器間。

熱回收鍋爐內的燃氣流道設計，從接收氣渦輪機熱燃氣開始，三菱工程師於課程中展示了 Alstom, GE 及三菱 J-Type 的排氣流場，因設計的不同，熱燃氣的排氣流場的形式也有所差異，而據設計熱回收鍋爐的韓國斗山公司說明，三菱並不直接提供氣渦輪機熱燃氣的排氣流場資訊，而是提供無因次數值 Swirl Number 由斗山公司進行設計，數值如下：

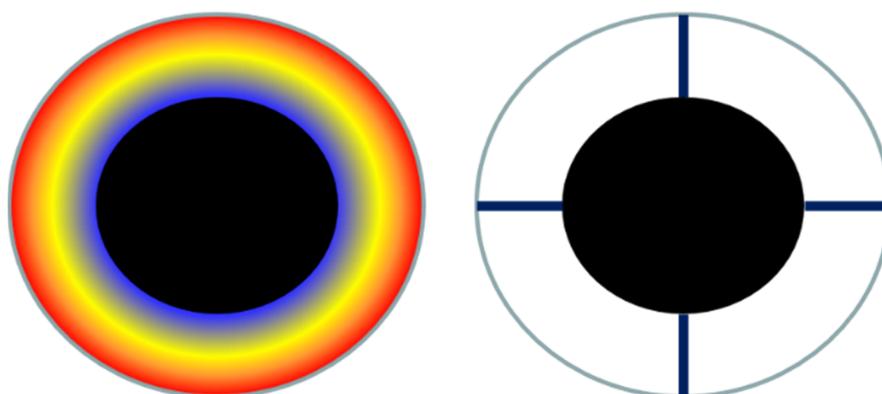
$$S = \frac{\int r\omega\vec{v} \cdot d\vec{A}}{R \int u\vec{v} \cdot d\vec{A}} = 0.1$$

斗山公司以此建立縮小模型，輔以 CFD 模擬流場，進行熱回收鍋爐的設計，如圖(二十四)，首先是重現氣渦輪機熱燃氣排出口的流場，建立圓形的流場流通口，並改變導翼的數量與分布角度以接近三菱提供的 Swirl Number，如圖(二十五)所示，左側是熱燃氣流場示意圖，右側則是建立的圓形通道模型：四片導翼各相鄰 90 度的實驗組。經反覆實驗，於眾多的組合中，最後廠家選用其中一種導翼數量及配置，達到了 S=0.9 的圓形通道流通口，用以

產生近似的熱燃氣出口流場給縮小模型使用。



圖(二十四) 縮小模型

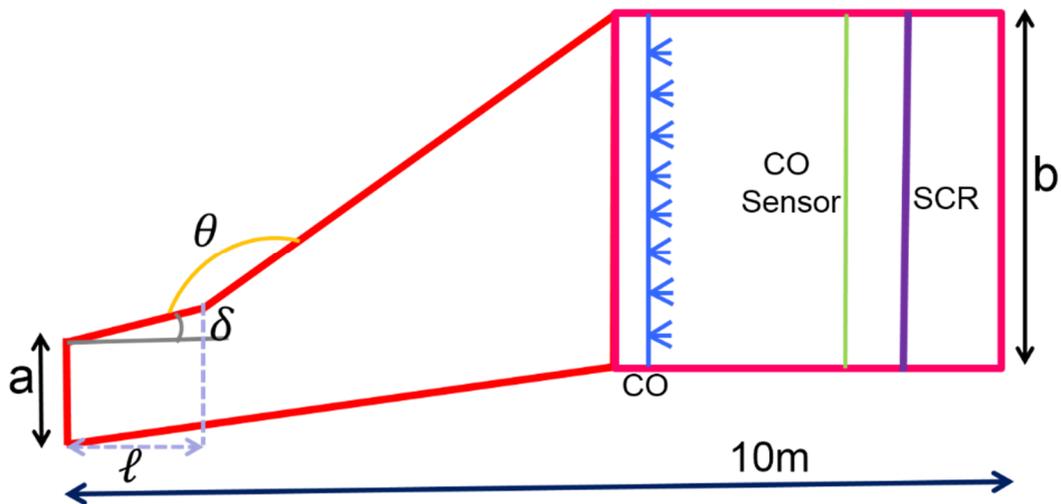


圖(二十五) 模擬氣機排氣流場

接著是關係著氨氣擴散混和程度的熱回收鍋爐彎道仰角設計，由於斗山公司的縮小模型為 1:17，注氨孔依照比例縮小後，噴嘴尺寸將變為 60.33 μm ，此尺寸無法加工，且高濃度的氨在實驗過程有安全疑慮，故改用擴散速度相近的一氧化碳取代進行實驗，以一氧化碳噴嘴網格代替注氨網格，在對應 SCR 的位置之前端，放置一氧化碳感測器，用來感應一氧化碳噴出後能否均

勻擴散分布。

以下說明該實驗中邊界及限制條件：實際的熱回收鍋爐進口端以膨脹接頭連接氣渦輪機出口排氣端，熱回收鍋爐進口的高度 a 約等同於氣渦輪機出口直徑，而實際的熱回收鍋爐出口通往排氣煙囪，所連接的膨脹接頭高亦為定值 b ，熱回收鍋爐總長度為 10m 。實驗中 θ 、 δ 、 ℓ 是待設計的參數，廠家透過不同數值建立模型，經過反覆實驗，最後選定一組參數，使得一氧化碳感測器所感測的一氧化碳分布最為均勻，再等比例還原回原尺寸，便為熱回收鍋爐的大致幾何尺寸，之後再以電腦流場 CFD 軟體模擬驗證及調整。



圖(二十六) 鍋爐設計參數

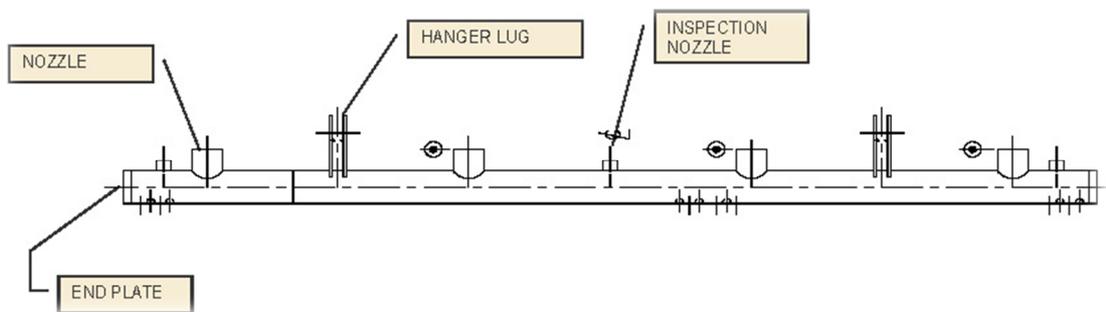
f. 維護

爐管檢修

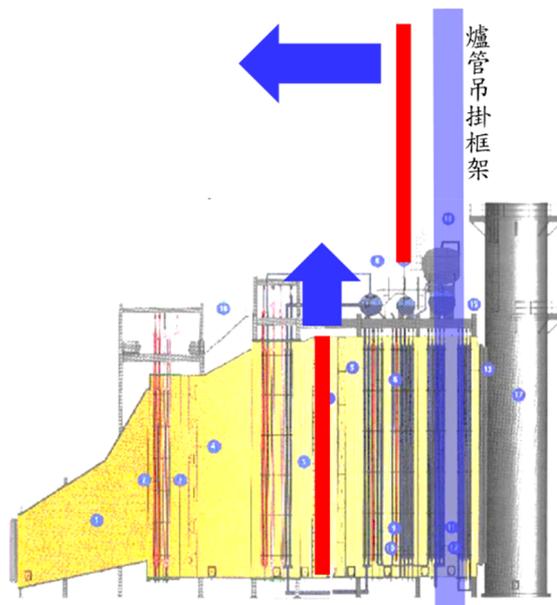
熱回收鍋爐爐管破管查修、更換是鍋爐維護工作中重要項目之一，有別於現有機組之垂直式鍋爐，新建機組採水平式鍋爐，且爐管排列更加緊密，在破漏查修的手法上，自然有所差異。據廠家表示，依其設計運轉維修經驗，大部份的破漏發生於熱交換管兩端裸管焊接於集管處，受焊接熱影響等因素

破漏。

查漏時，於每組管排(Harp)之集管設計之探視孔(Inspection Nozzle)，切割開口，置入內視鏡確認破管處，再行處理，集管構造如圖(二十七)。惟熱交換處之鰭管，因密集排列，不易查修，廠家解釋該處破漏機會較少，且設計壽命長，可於一定運轉周期後的大修一併更新爐管。廠家建議到達爐管壽命欲進行更新時，於鍋爐外設置高於兩倍爐管高度的爐管吊掛框架，依序將爐管向上吊，再向外移除，其框架設置費用雖高，但仍低於全新鍋爐建置之成本，可再沿用原有機組。



圖(二十七) 集管構造



圖(二十八) 爐管更新

g. 建廠規劃

通霄更新擴建機組採用水平式熱回收鍋爐，斗山公司在水平式鍋爐的生產運送組裝有四種模式，分別為管排(Harp)、模組(Module)、框架式(C-Frame)、全組裝(Full Assembly)，視建廠計畫而定，依工廠安裝完成度依序分為：

管排式

工廠端製造從管件組裝到管排為止，然後運送到現場進行組裝，在四種模式中運送上是最為輕便的，也是最小程度的工廠組裝，故大部分的加工會在現場完成。

模組式

將數管排組成一個模組，安裝壓力元件，以模組為單位運送，在建廠處將數個模組裝於框架中。

C 型框架

將模組組立後，安裝於 C 型框架 (C-Frame, 為一組完整框架的半側)，以框架運送，抵達現場後，以相對稱的框架合併，再完成後續工作。本次通霄更新計畫即採用此興建模式。

全組裝

全部的生產品製造及組裝都在工廠端完成，最後將完整的鍋爐運送至現場，此為最大的工廠組裝，而最小的現場施工，但因全組裝體積及重量相當大，運送不易，故通常是在生產工廠附近的電廠才會採用此一模式。

通霄計畫的建廠流程是：生產熱交換所需的熱交換管，依照材料要求製造的爐管，以高週波電焊法，在外圍旋繞鰭片，再依設計數量，將熱交換鰭管焊接於集管。重複此過程，形成管排。熱傳管排在其兩端焊接連接管後，即為模組。模組化的爐管依序固定於 C 型外蓋框架，此框架是運送的基本單位。框架經由海運送抵通霄並卸載，吊車升吊掛起兩組 C 型的框架，彼此缺口相對安裝，接著完成煙囪及汽水鼓的裝設，大致的鍋爐架設即告完成。

2. 建議

本次出國實習訓練，於日本三菱廠家的安排下，同行的受訓同仁在各自的機組系統領域中，獲得第一手資料，深入了解原廠在建廠規劃的設計概念，全覽發電機組各項系統，實在獲益匪淺。

電廠維護保養工作，仰賴公司同仁的齊心協力，及同仁對於各項設備之

功能、運作原理掌握，這是影響著機組維修、效率改善、問題排除等工作能否有效進行的關鍵。藉由返國心得分享座談會、技術彙整報告等，將廠家的資料及知識與同仁研討共享，相信對未來必定有相當助益。

加工製造的產線參觀，各部品的生產製造關鍵，部品備料購置時程安排、舊品修護的再生運用、採購規範須擬定的品質要求等專業知能皆有所提升，以熱回收鍋爐為例，爐管的製作流程、材質的使用與加工調質、採購運送模式等寶貴資料，將助於爐管破管時，焊接材料選用與熱處理之維護標準的制定，以及新購爐管備品採購的機械性質規範等。而熱回收鍋爐的循環系統中，每個爐管模組皆有其設計用途，各司其職，若詳加了解原廠的設計，透析其物理現象、控制系統的道理，便能有效且正確掌握機組設備。

三菱遠端數據資料中心是相當具前瞻性的工程分析工具，近幾年在大數據的領域，各國紛紛投入資料庫的建置、演算法設計及運算成果的應用，在交通運輸、商業分析決策種種領域，皆已收成效。在發電機組的運用上，透過網路零時差地收集全球各機組營運的大量資訊加以分析，預期能在破壞分析、評估運轉壽命等有所貢獻，若分析得到特定模式的破壞趨勢，甚至能在故障前預先示警，這提供營運端維護及操作者充裕的時間進行準備，降低備品的採購及庫存成本，減少非計畫性的緊急停機檢修，並將稼動效率最大化。

本次實習訓練中，因熱回收鍋爐系統由韓國斗山公司規畫製造，此行實習以日本三菱高砂製作所為主，無法親自到韓國工廠見習。且日本三菱公司在發電機組之部門編組與台電編制不同，單位權責內容略有差異，在電廠端鍋爐維護範圍涵蓋的部分系統，如飼水系統、飼水泵拆修、TCA 熱交換器等設備，因日本三菱將其歸屬於汽機系統，相關內容係安排在汽機組別的訓練內容中，故在此次的出國計畫鍋爐組未能參與該課程，覺得有些遺憾。

四、參考文獻及圖片出處

- 三菱實習訓練教材 (圖十、十一、十四、十七、十九~二十四、二十七)
- 通霄發電廠#6 機設備說明書 (圖一)
- 維基百科 (圖二、三)