

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
(GE C&C TYPE)

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：楊宗岳 電機工程師

派赴國家：美國

出國期間：113年08月12日至113年08月23日

報告日期：113年10月24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(GE C&C TYPE)

頁數 23 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

楊宗岳/台灣電力公司/興達發電廠/電機工程師/07-6912811#2298

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：113.08.12~113.08.23 出國地區：美國

報告日期：113年10月24日

分類號/目

關鍵詞：奇異公司、廢熱回收鍋爐、汽水循環、運轉維護

內容摘要：(二百至三百字)

興達電廠自1998年起運轉至今，為配合政府的非核家園政策及2025年的能源轉型目標，本廠進行了燃氣機組的延役與新建計畫，並於興達一期新建計畫中採用了GE公司7HA.03氣渦輪機及三壓貫流式廢熱回收鍋爐(HRSG)。為確保新設備的操作與維護的高效性，我參加了由美國奇異公司(GE)安排的廢熱回收鍋爐設計、製造、測試及運維研習訓練。

此次研習的主要目標是熟悉GE 7HA.03氣渦輪機及HRSG系統的運行及維護技術，確保機組的運轉穩定性與安全性。訓練過程中，我深入了解了氣渦輪機和HRSG系統的操作原則、故障排除方法及檢修要領，並對設備的維護注意事項有了系統性的掌握。此次研習不僅提升了我對設備維護的專業知識，也為日後進行興達電廠新機組的運轉及延壽工作奠定了良好的技術基礎。箇中經驗或可作為公司除役機組再利用方式參考與借鏡。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

摘要

興達電廠自 1998 年起運轉至今，為配合政府的非核家園政策及 2025 年的能源轉型目標，本廠進行了燃氣機組的延役與新建計畫，並於興達一期新建計畫中採用了 GE 公司 7HA.03 氣渦輪機及三壓貫流式廢熱回收鍋爐（HRSG）。為確保新設備的操作與維護的高效性，我參加了由美國奇異公司（GE）安排的廢熱回收鍋爐設計、製造、測試及運維研習訓練。

此次研習的主要目標是熟悉 GE 7HA.03 氣渦輪機及 HRSG 系統的運行及維護技術，確保機組的運轉穩定性與安全性。訓練過程中，我深入了解了氣渦輪機和 HRSG 系統的操作原則、故障排除方法及檢修要領，並對設備的維護注意事項有了系統性的掌握。此次研習不僅提升了我對設備維護的專業知識，也為日後進行興達電廠新機組的運轉及延壽工作奠定了良好的技術基礎。箇中經驗或可作為公司除役機組再利用方式參考與借鏡。

關鍵字：奇異（GE）、廢熱回收鍋爐(Heat Recovery Steam Generator)、汽水循環 (Balance Of Plant)、運轉維護(Operation & Maintenance)

目次

| | |
|--|------|
| 一、出國目的 | -3- |
| 二、研習行程 | -3- |
| 三、心得 | -4- |
| 1. 興達電廠新建複循環機組簡介 | -4- |
| 2. BOP (Balance of Plant) 介紹 | -5- |
| 2.1. 蒸汽系統 | -5- |
| 2.2. 冷凝水系統 | -11- |
| 2.3. 飼水系統 | -12- |
| 2.4. 真空系統 | -13- |
| 2.5. 天然氣系統 | -13- |
| 3. HRSG (Heat Recovery Steam Generator) 介紹 | -14- |
| 3.1. HRSG Operation | -9- |
| 3.2. 水處理 | -18- |
| 四、心得與建議 | -22- |
| 參考文獻 | -23- |

一、 出國目的

興達電廠複循環機組自 1998 年商轉迄今已逾 20 年，日常運轉情形尚屬穩定，但配合中央政府非核家園政策，除了電力能源配比需於 2025 年需達成燃氣:燃煤:再生能源 = 5 : 3 : 2 之比例外，地方政府對於電廠排放的氮氧化物也有更加嚴謹的規範；為達能源轉型之目標，同時滿足空氣品質與供電穩定的要求，除興建新燃氣機組外，既有燃氣機組之延役實屬必然；是以本廠已於今年初完成所有複循環機組的起動勵磁設備與控制系統之升級與更新，亦將於今年年底陸續更新各機組的氣渦輪機 (repowering)，並擬於明年度(2020 年)對既有複循環機組依序進行延壽工程，以達公司設定之延役年限(2037 年)。

為對此次發電機延壽方式有進一步瞭解，使日後興複一～五機之延壽工程進展能更流暢，同時一併精進本廠運維技術，故擬前往德國西門子公司(SIEMENS)汲取原廠經驗，並學習其發電機日常維護策略及技術，冀能利用此次出國實習機會，拓展個人視野並提升本身對該機組的日常維護及保養技術，以期於未來的延壽工程上能有具體貢獻。

二、 研習行程

| 日期 | 行程 | 工作摘要 |
|-----------|--------------|---------------------------------|
| 8/11~8/12 | 桃園 → 休士頓 | 啟程 |
| 8/12~8/16 | GE BOP 研習課程 | 1. GE BOP 介紹 2. BOP 維護流程參觀 |
| 8/19~8/23 | GE HRSG 研習課程 | 1. GE HRSG 介紹 2. HRSG 維護流程參觀 |
| 8/31~9/1 | 休士頓 → 桃園 | 賦歸 |

表 1: 休士頓研習行程

三、心得

1. 興達電廠復循環機組簡介

現今復循環機組設備主要包括氣渦輪機 (Gas Turbine, GT)、廢熱鍋爐 (Heat Recovery Steam Generator, HRSG) 及汽輪機 (Steam Turbine, ST)。其中 GT 使用天然氣為燃料，將其噴入燃燒筒與壓縮空氣混合燃燒後，產生高溫高壓的燃氣來推動 GT 帶動發電機產生電力，此為「布雷登循環(Brayton Cycle)」；爾後將 GT 做功後的排氣餘熱排放於熱回收鍋爐(HRSG)並加熱飼水產生蒸汽，再推動另一汽輪機帶動之發電機產生電力，此為「朗肯循環(Rankine Cycle)」；結合此兩種循環之發電機組便稱為「復循環發電機組(Combined Cycle Power Plant : CCGP)」。

本廠新建天然氣機組共有 3 部復循環發電機組，皆為美國奇異公司(GE)所製造，並預計於 2025 年後陸續商轉。單部機組容量為 128 萬瓩，總裝置容量共約 384 萬瓩，皆採 2 對 1 匹配方式(2GT+2HRSG+1ST)。其中氣渦輪機(GT)為 7HA.03 型，共計 6 台，每台容量為 430 MVA。；汽輪(ST)則為 DH640 型，共計 3 台，每台容量為 420 MVA；熱回收鍋爐(HRSG)則為韓國斗山(DOOSAN)製造的三壓式灌流鍋爐。此外為符合地方政府空氣品質的規範及達成空汙減量的規劃，7HA.03系列氣輪機(GT)採用了最新的燃燒技術 DLN2.6e，有效降低氮氧化物(NO_x)排放量。



圖 1:GE 7HA.03 GT 外觀



圖 2:興達新建天然氣機組

2. BOP (Balance of Plant) 介紹

Balance of Plant 在此指的是系統的熱循環，熱從 GT 排氣轉移到工質—水，從布雷登循環到朗肯循環，一步步將熱能轉變成機械能的一系列過程。整個架構由主系統冷凝水、飼水、蒸汽、循環水以及輔助系統真空、廠用水、潤滑油、燃氣等組成。以下將依序介紹各系統目的與主要設計。

2.1. 蒸汽系統

2.1.1. HP Steam

高壓蒸汽系統將來自兩個 HRSG (HRSG11 和 HRSG12) 的高壓蒸汽傳輸到高壓汽機 (HP ST)。蒸汽在高壓汽機中膨脹，並流入冷再熱 (CRH) 蒸汽系統。

在機組啟動、停機期間，系統可以將來自各自 HRSG 的高壓蒸汽通過各自的 HP By-Pass (每個 HRSG 分別為：HRSG11 的 G11MAN10 和 HRSG12 的 G12MAN10) 傳輸至冷再熱蒸汽系統。

在蒸汽輪機 (ST) 運行期間，來自 HRSG11 的高壓蒸汽通過 HRSG11 的高壓蒸汽管線 G11LBA11WP001/WP002/WP003 和高壓蒸汽總閥關斷閥 G11LBA11QM004 流入共同高壓蒸汽管線 C10LBA12WP001/WP002。來自 HRSG12 的高壓蒸汽則通過高壓蒸汽管線 G12LBA11WP001/WP002/WP003 和高壓蒸汽總閥關斷閥 G12LBA11QM004 流入共同高壓蒸汽管線。從共同高壓蒸汽管線 C10LBA12WP001/WP002，高壓蒸汽流入高壓汽機入口。

如果 ST 無法接收所有的高壓蒸汽，來自 HRSG11 的高壓蒸汽將通過高壓旁通管 G11MAN10 流入冷再熱 (CRH) 蒸汽系統，來自 HRSG12 的高壓蒸汽則通過高壓旁通管 G12MAN10 流入 CRH 蒸汽系統。

高壓蒸汽總閥關斷閥 G11LBA11QM004 和 G12LBA11QM004 允許蒸汽輪機在一個 HRSG 單元停運或啟動、關閉時，通過另一個 HRSG 單元運行。

在蒸汽輪機啟動之前以及在運行和預熱階段期間，少量的高壓蒸汽從靠近蒸汽輪機高壓入口處提取，通過高壓蒸汽流入高壓冷再熱預熱控制閥 C10LBA18QN001，降壓至高壓冷再熱蒸汽壓力，並流入 CRH 蒸汽系統。

高壓蒸汽管線配備了排水罐、排水管線和排水閥，確保冷凝水和蒸汽通過水蒸氣循環 (WSC) 排水管排出。在單元啟動或電廠啟動期間，當蒸汽管線因蒸汽冷凝而加熱時，或者在單元關閉或電廠關閉後，蒸汽在管線中凝結，從而產生冷凝水。這些冷

凝水和蒸汽通過 WSC 排水管排出，並被進一步轉移到乾淨排水系統中的排污回收系統（回收水系統）。

正常運行：

在電廠停機期間，如果燃氣輪機 11 (GT 11) 在燃氣輪機 12 (GT 12) 之前停機，則高壓蒸汽總管關斷閥 G11LBA11QM004 和其旁路 G11LBA11QM005 關閉，而高壓蒸汽總管關斷閥 G12LBA11QM004 和其旁路 G12LBA11QM005 打開。若燃氣輪機 12 在燃氣輪機 11 之前停機，則情況相反。

燃氣輪機 11 和燃氣輪機 12 的特定高壓蒸汽管線，以及公共高壓蒸汽管線，可能仍因之前的運行而保持加壓狀態，這取決於冷、溫、熱啟動的情況。

啟動 GT 11 和 GT 12，點火並負載至最低負載，以滿足溫度匹配的要求。當特定高壓蒸汽管線與公共高壓蒸汽管線的蒸汽壓力和溫度達到平衡時，相應的高壓蒸汽總管關斷閥及其旁路將打開。

當 HRSG 開始產生蒸汽時，高壓蒸汽壓力上升並開始流動。蒸汽管道通過蒸汽冷凝進行加熱，通常在冷啟動期間，管道內會有較多的蒸汽冷凝。只要蒸汽管道未達到最小過熱度，HRSG 和 WSC 的排水閥將保持開啟，將蒸汽和冷凝水排放至 HRSG 單元的排污罐中。

在正常運行中，如果蒸汽管道達到正常工作溫度，HRSG 和 WSC 通常不會有蒸汽和冷凝水排放到大氣中，也不會有冷凝水轉移到回收系統中。

當高壓蒸汽總管關斷閥尚未打開時，HRSG 單元 11 和單元 12 的高壓蒸汽壓力和流量由高壓汽輪機旁路 G11MAN10 和 G12MAN10 調節。如果高壓蒸汽總管關斷閥打開，則由 G11MAN10 和 G12MAN10 共同調節高壓蒸汽的壓力和流量。

在汽輪機 (ST) 啟動前和運行加熱階段，通過高壓至 HRH 預熱控制閥將少量高壓蒸汽提供給 HRH 蒸汽系統，以加快蒸汽管道的預熱。

當 ST 蒸汽密封系統運行、冷凝器抽真空並達到壓力要求時，ST 將進入運行狀態。ST 進口閥根據運行和負載程序開啟，隨著高壓蒸汽流量增加，高壓汽輪機旁路 G11MAN10 和 G12MAN10 將相應關閉。

在電廠停機時，GT 單元將卸載至最低電氣負載 (MECL)，然後關閉 ST，並相應關閉進口閥，同時開啟高壓汽輪機旁路 G11MAN10 和 G12MAN10。在 ST 停機後，GT 單元也關閉，最終 HRSG 的蒸汽生成停止，高壓汽輪機旁路 G11MAN10 和 G12MAN10 關閉，以保持 HRSG 單元和高壓蒸汽管道的壓力。

2.1.2. Hot Reheat Steam

在汽輪機 (ST) 運行期間，來自 HRSG 單元 11 的再熱蒸汽 (HRH) 通過專屬管線 G11LBB31WP001/WP002/WP003 和 HRH 總管關斷閥 G11LBB31QM004 流入公共 HRH 蒸汽管線 C10LBB31WP001/WP002。來自 HRSG 單元 12 的 HRH 蒸汽則通過專屬管線 G12LBB31WP001/WP002/WP003 和 HRH 總管關斷閥 G12LBB31QM004 流入同樣的公共 HRH 蒸汽管線，然後從該公共管線 C10LBB61WP002 流向中壓汽輪機 (IP ST) 的入口。

如果 ST 無法接收所有 HRH 蒸汽，來自 HRSG 單元 11 的 HRH 蒸汽將通過中壓渦輪旁路 G11MAN30 流向主冷凝器 C10MAG10/20EP001，而來自 HRSG 單元 12 的 HRH 蒸汽則通過旁路 G12MAN30 流向同一主冷凝器。

HRH 總管關斷閥 G11LBB31QM004 和 G12LBB31QM004 允許 ST 在只有一個 HRSG 單元運行時正常運行，無論另一個 HRSG 單元是在停機、啟動或關閉的過程中。

在 ST 啟動前及其運行和預熱階段，通過 HRH 預熱管線 C10LBB38WP001/C10LBB32WP001/C10LBB33WP001，少量減壓的高壓蒸汽被引入 HRH 蒸汽系統，用於加速中壓汽輪機 (ST IP) 入口的預熱。

HRH 蒸汽管線配備排水罐、排水管和排水閥，以確保通過 WSC 排水系統將冷凝水和蒸汽排出。這些冷凝水通常是在機組啟動或停機過程中，蒸汽管道因蒸汽冷凝加熱或冷卻而產生。這些冷凝水和蒸汽被視為污染物，經 WSC 排水系統進一步傳輸至排污回收系統 (回收水系統)。

正常運行：

在電廠停機期間，如果燃氣輪機 11 (GT 11) 在燃氣輪機 12 (GT 12) 之前停機，則 HRH 蒸汽總管關斷閥 G11LBB31QM004 和其旁路 G11LBB31QM005 關閉，而 HRH 蒸汽總管關斷閥 G12LBB31QM004 和其旁路 G12LBB31QM005 打開。若燃氣輪機 12 在燃氣輪機 11 之前停機，則情況相反。

GT 11 和 GT 12 的特定 HRH 蒸汽管線及公共 HRH 蒸汽管線可能仍保持加壓狀態，這取決於電廠是冷啟動、溫啟動還是熱啟動。

啟動 GT 11 和 GT 12，點火並負載至最低負載，以滿足溫度匹配要求。當特定 HRH 蒸汽管線與公共 HRH 蒸汽管線的蒸汽壓力和溫度達到平衡時，相應的 HRH 蒸汽總管關斷閥及其旁路將打開。

當 HRSG 開始產生蒸汽時，HRH 蒸汽壓力上升並開始流動。蒸汽管道通過蒸汽冷凝進行加熱，通常在冷啟動期間，管道內會有較多的蒸汽冷凝。只要蒸汽管道未達到最小過熱度，HRSG 和 WSC 的排水閥將保持開啟，將蒸汽和冷凝水排放至 HRSG 單元的排污罐中。

在正常運行中，如果蒸汽管道達到正常工作溫度，HRSG 和 WSC 通常不會有蒸汽和冷凝水排放到大氣中，也不會有冷凝水轉移到回收系統中。

當 HRH 蒸汽總管關斷閥尚未打開時，HRSG 單元 11 和單元 12 的 HRH 蒸汽壓力和流量由中壓汽輪機旁路 G11MAN30 和 G12MAN30 調節。如果 HRH 蒸汽總管關斷閥打開，則由 G11MAN30 和 G12MAN30 共同調節 HRH 蒸汽的壓力和流量。

在汽輪機 (ST) 啟動前和運行加熱階段，通過 HRH 預熱管路提供少量減壓的高壓蒸汽，以加快 HRH 蒸汽管道的預熱。

當 ST 蒸汽密封系統運行、冷凝器抽真空並達到壓力要求時，ST 將進入運行狀態。ST 進口閥根據運行和負載程序開啟，隨著中壓蒸汽流量增加，中壓汽輪機旁路 G11MAN30 和 G12MAN30 將相應關閉。

在電廠停機時，GT 單元將卸載至最低電氣負載 (MECL)，然後關閉 ST，並相應關閉進口閥，同時開啟中壓汽輪機旁路 G11MAN30 和 G12MAN30。在 ST 停機後，GT 單元也關閉，最終 HRSG 的蒸汽生成停止，中壓汽輪機旁路 G11MAN30 和 G12MAN30 關閉，以保持 HRSG 單元和 HRH 蒸汽管道的壓力。

2.1.3. Cold Reheat Steam

在汽輪機 (ST) 運行期間，來自高壓汽輪機出口的再熱蒸汽 (CRH) 通過公共 CRH 蒸汽管線 C10LBC30WP001/WP002/WP003，並分流至各 HRSG 單元的專用 CRH 蒸汽管線。

- HRSG 單元 11 的 CRH 蒸汽通過 CRH 蒸汽總管關斷閥 G11LBC32QM001、CRH 蒸汽平衡控制閥 G11LBC32QN001 和單元專用 CRH 蒸汽管線 G11LBC32WP001/WP002，進入 HRSG 單元 11 的再熱區。
- HRSG 單元 12 的 CRH 蒸汽則通過 CRH 蒸汽總管關斷閥 G12LBC32QM001、CRH 蒸汽平衡控制閥 G12LBC32QN001 和單元專用 CRH 蒸汽管線 G12LBC32WP001/WP002，進入 HRSG 單元 12 的再熱區。

如果 ST 無法接收所有來自 HRSG 的高壓蒸汽，HRSG 單元 11 的高壓蒸汽會通過高壓渦輪旁路 G11MAN10，進入 HRSG 單元 11 的再熱區；HRSG 單元 12 的高壓蒸汽則通過 G12MAN10 進入 HRSG 單元 12 的再熱區。

在 ST 的運行和預熱階段，來自高壓汽輪機出口的蒸汽會通過 CRH 蒸汽管線 C10LBC30WP001 和高壓汽輪機排汽控制閥 S10LBH30QN001，進入主冷凝器 C10MAG10/20EP001。這一過程中，蒸汽經過膨脹冷卻，並在高壓汽輪機排汽控制閥 S10LBH30QN001 內通過水噴射去過熱。噴射水來自主冷凝水系統，通過一系列控制閥進行調節，最終進入高壓汽輪機排汽控制閥。

CRH 蒸汽總管關斷閥 G11LBC32QM001 和 G12LBC32QM001 允許在單個 HRSG 單元運行時，保持汽輪機正常運行，無論另一個 HRSG 單元是在停機、啟動或關閉過程中。

高壓汽輪機出口的 CRH 蒸汽管線設有輔助止回閥 S10LBC30RM001，以防止在汽輪機運行或預熱階段時 CRH 蒸汽回流至高壓汽輪機。

CRH 蒸汽管線配備排水罐、排水管和排水閥，用於排放冷凝水和蒸汽。冷凝水通常在機組啟動或停機時產生，這些冷凝水和蒸汽經 WSC 排水系統排放，並通過乾淨排水系統進一步轉移至排污回收系統。

正常運行：

在電廠停機期間，如果 GT 單元 11 在 GT 單元 12 之前停機，則 CRH 蒸汽平衡控制閥 G11LBC32QN001、CRH 蒸汽總管關斷閥 G11LBC32QM001 和其旁路 G11LBC32QM003 關閉，而 CRH 蒸汽平衡控制閥 G12LBC32QN001、CRH 蒸汽總管關斷閥 G12LBC32QM001 和其旁路 G12LBC32QM003 打開。如果 GT 單元 12 在 GT 單元 11 之前停機，則相應的閥門開關狀態相反。

GT 11 和 GT 12 的特定 CRH 蒸汽管線及公共 CRH 蒸汽管線可能仍保持加壓狀態，這取決於電廠是冷啟動、溫啟動還是熱啟動。

在電廠啟動前，冷凝水提取泵啟動運行，為高壓蒸汽抽出水注射提供水源。主冷凝器在電廠啟動前被抽空以達到釋放壓力，允許蒸汽進入。

啟動 GT 11 和 GT 12，點火並負載至最低負載，以滿足溫度匹配要求。當 HRSG 單元開始產生蒸汽時，高壓蒸汽壓力上升並開始流動，高壓汽輪機旁路 G11MAN10 和 G12MAN10 打開，以建立 CRH 蒸汽系統與高壓蒸汽系統中的最低壓力。

當 HRSG 單元 11 的高壓蒸汽壓力和溫度與公共高壓蒸汽管線相等時，高壓蒸汽總管關斷閥 G11LBA11QM004 開啟，同步開啟 CRH 蒸汽總管關斷閥 G11LBC32QM001 和 CRH 蒸汽平衡控制閥 G11LBC32QN001。當 HRSG 單元 12 的高壓蒸汽壓力和溫度與公共高壓蒸汽管線相等時，高壓蒸汽總管關斷閥 G12LBA11QM004 開啟，同步開啟 CRH 蒸汽總管關斷閥 G12LBC32QM001 和 CRH 蒸汽平衡控制閥 G12LBC32QN001。

當兩個 HRSG 單元運行時，CRH 蒸汽平衡控制閥 G11LBC32QN001 和 G12LBC32QN001 完全開啟，僅在兩個 HRSG 單元熱負荷不平衡的情況下，閥門會節流調整 CRH 蒸汽流量，以根據 HRSG 單元之間的熱負荷比進行分配。

當 HRSG 單元開始產生蒸汽時，CRH 蒸汽壓力上升並開始流動。蒸汽管道通過蒸汽冷凝進行加熱，通常在冷啟動期間，管道內會有較多的蒸汽冷凝。只要蒸汽管道未達到最小過熱度，HRSG 和 WSC 的排水閥將保持開啟，將蒸汽和冷凝水排放至 HRSG

單元的排污罐中。

在正常運行中，如果蒸汽管道達到正常工作溫度，HRSG 和 WSC 通常不會有蒸汽和冷凝水排放到大氣中，也不會有冷凝水轉移到回收系統中。

當 ST 蒸汽密封系統運行、冷凝器抽真空並達到壓力要求時，ST 將進入運行狀態。ST 進口閥根據運行和負載程序開啟，並在 ST 加熱階段，高壓 ST 抽空蒸汽控制閥 S10LBH30QN001 打開，將蒸汽通過高壓 ST 抽空蒸汽管路排放至主冷凝器。

ST 加熱完成後，進入正常負載運行，相關的蒸汽控制閥和水注射控制閥關閉。

在電廠停機時，GT 單元將卸載至最低電氣負載 (MECL)，然後關閉 ST，並相應關閉進口閥。在 ST 停機後，GT 單元也關閉，最終 HRSG 的蒸汽生成停止，中壓汽輪機旁路 G11MAN30 和 G12MAN30 關閉，以保持 HRSG 單元和 CRH 蒸汽管道的壓力。

2.1.4. LP Steam

在汽輪機 (ST) 運行期間，來自 HRSG 單元 11 的低壓蒸汽 (LP) 通過專用的 LP 蒸汽管線 G11LBA61WP001/WP002/WP003 和 LP 蒸汽總管關斷閥 G11LBA61QM001，流入公共 LP 蒸汽管線 C10LBA61WP001/WP002。同樣，來自 HRSG 單元 12 的 LP 蒸汽也通過專用的 LP 蒸汽管線 G12LBA61WP001/WP002/WP003 和 LP 蒸汽總管關斷閥 G12LBA61QM001，進入公共 LP 蒸汽管線 C10LBA61WP001/WP002。從這條公共 LP 蒸汽管線，蒸汽流向 LP 汽輪機的入口。

如果 ST 無法接收所有的 LP 蒸汽，這些 LP 蒸汽會通過公共 LP 渦輪旁路 C10MAN60 排入冷凝器。

LP 蒸汽總管關斷閥 G11LBA61QM001 和 G12LBA61QM001 允許在單個 HRSG 單元運行時，保持 ST 正常運行，即使另一個 HRSG 單元正在停機、啟動或關閉。

LP 蒸汽管線配備排水罐、排水管和排水閥，確保通過 WSC 排水系統排放冷凝水和蒸汽。這些冷凝水通常是在機組或電廠啟動和停機過程中，由於蒸汽冷凝產生的，這些冷凝水和蒸汽會被視為污染物，並通過乾淨排水系統進一步轉移至排污回收系統。

2.1.5. Auxiliary Steam

在正常運行期間，其中一個機組會運行並提供輔助蒸汽。輔助蒸汽從機組專用的 CRH 蒸汽管線 C10/C20/C30LBC30WP003 流入機組專用的輔助蒸汽總管

C10/C20/C30LBG10WP001，然後進一步流向公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001。從這個公共輔助蒸汽總管中，輔助蒸汽會根據需要分配給三個機組以及先進的污水處理系統。

如果臨時輔助鍋爐已經連接到公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001，它可以作為替代蒸汽供應來源，為三個機組提供輔助蒸汽。

當某個機組的兩台燃氣輪機 (GT) 停機時，輔助蒸汽會從公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001 通過輔助蒸汽關斷閥 C10/C20/C30LBG10QM002 流向該機組的專用輔助蒸汽總管 C10/C20/C30LBG10WP001。如果汽輪機轉子處於冷卻狀態，則輔助蒸汽會通過減溫器 C10/C20/C30LBG21EQ001 進行減溫，以滿足汽封蒸汽系統的溫度要求，所需的注水來自公共中壓給水總管 C10LAB40WP001 的高壓給水泵系統。

當機組中一台或兩台燃氣輪機運行時，如果機組專用的 CRH 蒸汽管線 C10/C20/C30LBC30WP003 中的 CRH 蒸汽壓力達到與機組專用輔助蒸汽總管 C10/C20/C30LBG10WP001 相同的壓力，輔助蒸汽關斷閥 C10/C20/C30LBG20QM002 會打開，並從機組專用的 CRH 蒸汽管線供應輔助蒸汽。

從公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001，輔助蒸汽會通過輔助蒸汽管線 C00LBG40WP001//WP002/WP003 供應給先進污水處理系統。

輔助蒸汽關斷閥 C10/C20/C30LBG10QM002 允許在需要時將某個機組與公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001 隔離。輔助蒸汽關斷閥 C10/C20/C30LBG20QM002 則允許在機組停機的情況下，將該機組與專用 CRH 蒸汽管線 C10/C20/C30LBC30WP003 隔離，並且能夠通過公共輔助蒸汽總管 C00LBG10/20/30WP001 向機組專用的輔助蒸汽總管 C10/C20/C30LBG10WP001 以及汽封蒸汽系統提供輔助蒸汽。

輔助蒸汽管線配有排水罐、排水管和排水閥，以確保冷凝水和蒸汽能夠通過 WSC 排水系統排放。這些冷凝水通常是在機組啟動或停機過程中，當蒸汽管線因冷凝蒸汽加熱或冷卻而產生。這些冷凝水和蒸汽被視為污染物，因此經過乾淨排水系統後進一步轉移至排污回收系統 (回收水系統)。

2.2. 冷凝水系統

蒸汽通過冷凝器頸部進入冷凝器殼體 C10MAG10/20EP001，並在冷凝管表面凝結，這些冷凝管由循環水冷卻。冷凝水收集在分隔的冷凝器熱井 C10MAG10/11/20/21CM001 中，並由 3 台 60%容量的冷凝水泵 C10LCC10/20/30GP001 抽取，通過冷凝器熱井吸入管線上的手動隔離閥 C10LCB01QM001/002 和 C10LCB02QM001/002，將冷凝水輸送至 HRSG 單元 11 和單元 12 的低壓節能器。

冷凝水從各泵的排放管線流向公共冷凝水主管，並分支到汽輪機 (ST) 和 WSC 注

水消費端，然後流經汽封蒸汽冷凝器 (GSC) S10MAW30EG001 和單元專用的 HRSG 吹掃排水熱交換器 G11/G12LCB60EG001 作為冷卻介質。之後，冷凝水通過公共冷凝水主管線 C10LCB40WP003 流向 HRSG 單元專用的冷凝水排放管線 G11/G12LCB60WP001/002/005。

冷凝水泵/汽封蒸汽冷凝器的最小循環回路從 HRSG 吹掃排水熱交換器下游分支，通過冷凝器閃蒸箱 C10MAG30CM001 將部分冷凝水回流至冷凝器熱井，以確保當沒有或只有少量冷凝水流向 HRSG 時，保持冷凝水泵 C10LCC10/20/30GP001、汽封蒸汽冷凝器 S10MAW30EG001 和吹掃排水熱交換器 G11/G12LCB60EG001 的最低流量。最小循環回路控制閥 G11/G12LCB31QN002 用於調節回流量。

冷凝器閃蒸箱還會收集汽輪機和 WSC 的內部排水，特別是在汽輪機啟動和停機過程中進行閃蒸和相位分離。閃蒸箱內注入少量冷凝水進行冷卻，冷凝水通過虹吸管流入冷凝器熱井，蒸汽和不可凝氣體則從冷凝器頸部排出。

輔助補水系統 (C10LCP30) 通過低容量和高容量控制閥 C10LCP30QN006/014 進行補水，緊急補水系統則通過關斷閥 C10LCP31QM001/002/003/004 將去離子水噴入冷凝器內，以補充 WSC 的水損失。補水系統的水經過去氣處理後，通過噴嘴注入冷凝器。緊急補水直接流入冷凝器熱井。

在 HRSG 無法接收全部冷凝水時，冷凝水緊急排放閥 C10LCB91QM001 和 C10LCB90QM001 會將冷凝水排放至冷凝水儲罐 C10LCP01CM101 或 HRSG 吹掃回收罐 G11HAP71CM001 和 G12HAP71CM001，具體取決於儲存容量和冷凝水的質量。

冷凝水泵 C10LCC10/20/30GP001 的密封水從公共冷凝水主管線中提取

2.3. 飼水系統

HIP 系統從 HRSG 的低壓節能器 (低壓給水加熱器) 供應給水，並根據需求的壓力水平將給水供應給 HRSG 及其他用戶。該系統提供高壓給水，用於 HRSG 的高壓蒸汽中間減溫器注水，以及中壓給水，用於 HRSG 的再熱蒸汽中間減溫器注水。

此外，該系統還向高壓蒸汽旁路系統、中壓蒸汽旁路系統、輔助蒸汽管線的減溫器、燃氣輪機 (GT) 的 CCA 熱交換器和燃氣輪機性能加熱器注入中壓給水，這些操作在 HRSG 的高壓和中壓節能器之後進行。

該系統的 HIP 鍋爐給水泵 (1 台 105% 容量的泵對應 1 台 HRSG，總計三台泵對應

兩台 HRSG) C10LAC50/60/70GP001 從 HRSG 的低壓節能器吸水，並將給水輸送至 HRSG 和其他用戶的注水系統。給水從各泵的排放管流入公共主給水管線，再分支到注水系統。

泵的高壓排放通過公共高壓給水管線供應至 HRSG 的高壓部分，而泵的中壓排放則通過公共中壓給水管線供應至 HRSG 的中壓部分、HP 渦輪旁路系統、再熱蒸汽 (HRH) 和輔助蒸汽系統。

2.4. 真空系統

在電廠啟動前，汽輪機 (ST)、主冷凝器 C10MAG10/20EP001 和冷凝器閃蒸箱 C10MAG30CM001 會進行抽真空操作。在電廠運行或停機期間，當保持真空時，不凝氣體會在主冷凝器 C10MAG10/20EP001 的最冷區域聚集，並被抽出。

冷凝器排氣系統的真空泵組 C10MAJ20 / C10MAJ30 / C10MAJ40 會將不凝氣體從主冷凝器中吸出，並排放到大氣中。主冷凝器內的除氧器通過兩條排氣管 C10MAJ01WP001 / C10MAJ02WP002 與公共排氣管線 C10MAJ10WP001 連接，最終連接到真空泵組 C10MAJ20 / C10MAJ30 / C10MAJ40。

真空泵組的吸入管路上設有關斷閥 C10MAJ11QM001 / C10MAJ12QM001 / C10MAJ13QM001，可實現單個真空泵組的隔離操作。

主冷凝器頸部連接了一條啟動排氣管 C10MAJ03WP001，通過關斷閥 C10MAJ03QM001 與公共排氣管線 C10MAJ10WP001 連接，該排氣管用於快速啟動抽真空（稱為 "hogging"）。

在啟動抽真空過程中，兩台真空泵組 C10MAJ20 / C10MAJ30 / C10MAJ40 會同時運行，快速移除大量不凝氣體，並將主冷凝器內的壓力從大氣壓降至啟動所需的最大允許真空值。

在電廠運行或停機期間，當保持真空時，兩台真空泵組會並行運行以進行服務抽真空 ("holding")。第三台真空泵組則作為全冗餘的備用設備，以備啟動抽真空或服務抽真空時使用。

2.5. 天然氣系統

燃氣調節區域 (COOEK): 燃氣從工廠外部管道系統的連接點 [TP-M001] 進入工廠。主要進氣閥 COOEKA10QM001 用於將燃氣系統與外部供應隔離。在火災或緊急情況下，客戶端的電動閥 (MOV, NG-006/NG-017) 也可隔離工廠，這些閥門的操作通過 DCDAS 控制。

燃氣經過三個 50%容量的敲擊分離器和過濾器 (C00EKB10/20/30) 清潔，液體排至公共廢液收集罐 C00EKR50CM001。每台燃氣輪機 (GT) 旁設有專用的廢液收集罐，位於燃氣區域附近。GT 廢液收集罐的廢液會被泵送至公共廢液收集罐 (C00EKR50)，最終通過專用的廢液泵排至道路運輸罐，由客戶負責處理。

燃氣計量站 (3x50%) C00EKU10/20/30 提供燃氣流量和燃氣分析數據給 DCDAS 進行遠程監控。燃氣調節裝置旁設有一台燃氣色譜儀 (C00EKU40)，用於監測燃氣成分，並設有自動燃氣取樣系統 (C00EKU50)，供實驗室分析使用。

三個 (1x100%) 燃氣壓力調節站 (C10/20/30EKD10/20/30) 用於機械調整燃氣壓力至燃氣輪機所需水平。在每個壓力調節站下游設有自動冷凝水排放裝置 (C10/20/30EKR10/20/30)，在特殊情況下自動將冷凝液排至公共廢液收集罐 (C00EKR50)。

燃氣調節區的所有設備通風口都連接到調節區的排氣管，除了燃氣色譜儀和取樣系統的排氣口。

燃氣單元分配 (G10/G30/G30EK)： 壓力調節站及自動排水裝置下游，每個聯合循環單元都有專屬的燃氣管線，供應各自的燃氣輪機。

燃氣輪機區 (G11/G12/G21/G22/G31/G32EK)： 每台 GT 配備 (1x100%) 的燃氣洗滌器 MLI-G002 作為燃氣輪機前的最後一道屏障。燃氣流量計 (MLI-0639) 提供燃氣輪機控制系統所需的操作流量數據。燃氣性能加熱器 (MLI-G010) 提升燃氣溫度，以優化整體工廠效率。燃氣安全關斷閥 (MLI-0572) 用於安全隔離系統。此外，每個 GT 還設有氨氣吹掃裝置，用於燃氣安全關斷閥下游的系統吹掃。

清潔和調節後的燃氣進入燃氣輪機的燃氣系統。每台 GT 設有廢液收集罐，用於收集來自燃氣洗滌器和性能加熱器的冷凝水，這些冷凝水會自動通過專用泵輸送至公共廢液收集罐。

3. HRSG

3.1. HRSG Operation

HRSG 的作用： 聯合循環電廠 (CCPP) 的原理是回收燃氣輪機 (GT) 廢氣中的熱能，這些熱能通常會被直接排放到大氣中。回收的熱能用於產生蒸汽，供應給汽輪機 (ST)，從而提高整體電廠的效率，達到約 60%，相比之下，開式循環燃氣輪機的效率僅為 32% 至 42%。這些熱能通過餘熱鍋爐 (HRSG) 從燃氣輪機的廢氣轉移到水或蒸汽中。某些工廠會將部分熱水或蒸汽直接用於工業 (如生物質乾燥、海水淡化) 或民用 (如區域供熱) 用途。

超臨界蒸汽系統已經得到開發並取得良好效果，但由於其高溫高壓環境需要高投資成本，因此並未被廣泛應用。本文將只討論常見的亞臨界蒸汽系統。

材料應力與 HRSG 控制：HRSG 承受著來自燃氣輪機高溫、偶爾腐蝕性廢氣與高壓蒸汽/水的雙重壓力，特別是在冷啟動期間。HRSG 是被動元件，調節能力有限，主要依賴燃氣輪機和水-蒸汽循環（WSC）系統來控制應力。

HRSG 設計：HRSG 不像電廠中的其他子系統那樣是標準化產品，它們根據具體電廠的特性（如運行模式和現場條件）進行專門設計。HRSG 的設計取決於熱功率、燃料類型、設計溫度、啟動/停止速度及電廠的基礎負載或備用狀態等多種因素。因此，雖然不同電廠的 HRSG 設計可能相似，但並不完全相同。

蒸汽生成過程：HRSG 作為逆流式熱交換器運作。燃氣輪機的廢氣從 HRSG 的一端向煙囪方向流動，水則從煙囪端向燃氣輪機廢氣端流動。熱量在這過程中有效地從廢氣轉移到水和/或蒸汽中，廢氣溫度從燃氣輪機的排氣溫度（設計參數）下降至煙囪排放溫度，而水的溫度則從給水溫度上升到過熱蒸汽溫度，並以所需的壓力和溫度條件供應蒸汽。

由於逆流循環，廢氣離開煙囪時的溫度接近但高於進水溫度。水在向燃氣輪機排氣方向流動時，首先經過節能器區域，這一過程中水溫幾乎升至沸點。在熱量持續傳遞給水流的過程中，會產生一定量的蒸汽，這一蒸汽生成過程發生在被稱為蒸發器的熱交換區域。

最後，隨著蒸汽向燃氣輪機廢氣入口進行，蒸汽進入過熱器區域，在此處被進一步加熱，並以符合汽輪機（ST）設計需求的壓力和溫度條件離開 HRSG。此時，蒸汽的溫度接近但低於燃氣輪機廢氣溫度。

3.1.1. HRSG 的運行：

一般來說，燃氣輪機可以單獨運行，只需要燃料（氣體或油類）的供應；汽輪機也可以單獨運行，前提是有適當壓力和溫度的蒸汽供應。

在聯合循環電廠（CCPP）中，燃氣輪機和汽輪機通過 HRSG 和水-蒸汽循環系統（WSC）連接。HRSG 的任務是根據汽輪機的需求供應蒸汽，而這些需求會根據不同的運行模式（如啟動和正常運行）而變化。為了實現其運行目標，HRSG 必須考慮許多因素，其中壓力和溫度尤為重要。

另一方面，在 CCPP 中，燃氣輪機的啟動並不像開式循環那樣簡單。HRSG 對來自燃氣輪機廢氣的熱能供應施加了限制，特別是在溫度和質量流量梯度方面。

因此，了解 HRSG 的工作原理對於理解整個 CCPP 的運行至關重要。

在啟動聯合循環電廠 (CCPP) 時，HRSG (餘熱鍋爐) 可能處於以下三種不同的狀態：

1. **冷卻且空的狀態：** 這種情況發生在大修和需要排空 HRSG 的維護操作之後。啟動系統前的首要步驟是向汽包、節能器和蒸發器中注入給水。
2. **冷卻且具有正常的啟動水位：** HRSG 處於大氣壓力，通常內部表面由氮氣保護。
3. **熱且加壓，具有正常的啟動水位。**

HRSG 充水：

這種情況通常出現在大修或長時間停機後。維護和修理之後，一些手動閥門可能已被從正常運行位置移動，自動閥門可能被切換到手動操作。因此，需要特別小心，確保所有手動閥門 (如排水閥、通風閥、隔離閥等) 都處於正確位置。在完成所有維護工作並在開始填充 HRSG 之前，應將所有自動閥門恢復到自動運行模式。此外，還需要檢查所有相關的控制和測量設備是否正常運行。

準備工作：

在滿足一些基本條件後，才可以對 HRSG 進行初次填充。這些條件包括：

- 給水泵的功能組 (FG) 需要處於啟動狀態。
- 給水箱 (FWT) 和熱井的液位控制功能組也需要處於啟動狀態。
- 需要有可用的補水，並且化學加藥系統必須正常運行。
- 水處理廠需要投入運行。

需要注意的是，填充空的 HRSG 或水-蒸汽循環 (WSC) 系統需要大量去離子水，化學加藥系統需運行以保證水質。

正常的填充順序如下：

1. 填充冷凝器熱井
2. 填充冷凝水系統
3. 填充給水箱
4. 填充給水系統
5. 填充 HRSG

在此課程中，我們將只討論 HRSG 的填充，假設所有前置步驟已經完成，相關的功能組 (包括給水泵功能組) 已啟動，這些步驟將在 WSC 課程中進一步討論。

初次填充節能器：

當 HRSG 處於大氣壓力，而給水處於高壓時，HRSG 入口的關斷閥門 (HP 回路的

LAB95 AA052) 無法打開。此時，一個較小的電動閥 (LAB95 AA062) 帶有限流孔板 (LAB95 BP051)，該閥門會打開以填充節能器區域，當該回路加壓後，主關斷閥才會打開。

具體操作步驟如下：

1. 打開節能器的手動排氣閥。
2. 關閉手動排水閥。
3. 打開給水填充關斷閥。
4. 當水流出時，依次關閉排氣閥。
5. 一旦節能器加壓，入口關斷閥可打開。

化學加藥功能組需啟動以保證給水的質量。

這些步驟需要手動執行，並且需要對 HRSG 中的每一個壓力回路進行完成。

初次填充汽水鼓：

當節能器已填充水並加壓後，需執行以下步驟：

1. 啟動排污罐 (BD) 液位控制。
2. 啟動汽包液位控制。
3. 啟動排水功能組 (FG)。
4. 開啟蒸發器的控制閥至填充位置，直到汽包達到啟動水位。如果汽包水位過高，可通過打開排放閥來降低水位。
5. 當達到正常水位後，關閉給水控制閥。

注意，填充時的水位低於正常運行水位，以避免水開始沸騰時因膨脹導致水位過高。

初次填充 OT：

高壓回路的一次蒸發器節能器部分的填充程序與循環式蒸發器相同，具體步驟如下：

1. 啟動 BD 罐液位控制。
2. 啟動排水功能組。
3. 開啟控制閥至填充位置，水會開始填充蒸發器，並溢流至分離器。當 "水分離器液位" 功能組啟動時，排水閥會控制分離器內的水位。當水位超過最低值後，達到 "OT 蒸發器已滿" 的狀態。

在這兩種情況下，填充蒸發器/汽包的順序由操作員站自動執行。

HRSG 準備啟動：

當節能器已填滿，汽包達到正常啟動水位，並且分離器（若適用）達到要求水位後，HRSG 即將準備啟動。但要獲得 "準備啟動" 信號，還需滿足其他條件，例如 "煙囪阻尼器打開"、"分流阻尼器到位"（若適用）、"蒸汽溫度控制開啟" 或 "排污開啟"。

達到 HRSG 的 "準備啟動" 狀態是允許燃氣輪機啟動的前提條件之一。詳細的 HRSG 啟動準備控制動作可參閱 HRSG 順序控制文件。

3.1.2. Start-Up

冷啟動、溫啟動和熱啟動：「冷啟動」、「溫啟動」和「熱啟動」這些術語是指當汽輪機啟動指令下達時，汽輪機高壓/中壓 (HP/IP) 轉子金屬的平均溫度。這影響蒸汽進入汽輪機時所允許的溫度和壓力梯度。

對於 HRSG 來說，唯一需要考慮的是是否需要在啟動前進行手動操作（例如填充節能器）。

啟動順序：當 HRSG 準備啟動並且滿足燃氣輪機的啟動條件（包括 HRSG 淨化）後，燃氣輪機可以點火。正如 HRSG 控制章節中所討論的，燃氣輪機首先會產生較低的電力輸出，以允許 HRSG 進行適當的加熱並保持合適的溫度梯度。

在過熱器中，管道由內部流動的蒸汽冷卻。由於在啟動初期沒有蒸汽流動，冷卻無法進行，過熱器管道可能會過熱並受損。因此，燃氣輪機會慢慢增加其電力輸出，並且會經歷幾個等待階段。

蒸汽產生過程：高壓蒸汽 (HP) 被旁通至冷再熱管線。

最初產生的蒸汽將用於暖機，排水系統功能組 (FG) 將啟動，以排出冷凝水。

隨著壓力的增加，蒸汽首先用於密封裝置 (gland seals)。一旦密封裝置正常運行並達到一定壓力，蒸汽將用於啟動真空噴射器。

當冷凝器達到一定的真空水平並且蒸汽管線達到最低壓力水平後，高壓 (HP)、中壓 (IP) 和低壓 (LP) 旁通功能組將啟動，並根據允許的溫度/壓力梯度和計算的熱應力，與汽輪機的進汽控制閥 (CVs) 一起調節蒸汽壓力。

3.2. 水處理

水質對於 HRSG 的運行和維護至關重要。不適合的給水成分會導致熱能傳輸效率降低，並可能損壞熱交換器及其他設備。

為了確保長期無故障、連續運行，給水的成分和性質必須保持在預定的範圍內。某些成分應避免，而需要添加一些化學藥劑以防止出現問題，例如結垢和腐蝕。

即使有良好的補水處理，氧氣仍可能進入冷凝器，並且小的洩漏也可能污染冷凝水，從而加速結垢和腐蝕。

3.2.1. Mechanical Problems

熱交換器結垢：

HRSGs 中的一個重要問題是結垢。當某些化學化合物沉積在熱交換管的內表面，甚至在蒸汽管道內部時，就會發生結垢現象。連續的蒸發過程會在 HRSG 蒸發器和汽包內濃縮不揮發的化合物，當達到溶解度極限時，這些化合物可能會沉澱並附著在管壁上，特別是在 OT 蒸發器中。

結垢的主要影響：

1. **熱交換管沉積物**：導致熱阻增加。結垢的導熱性明顯低於管材，因此在相同的氣水溫差下，傳熱效率會低於未結垢的管道。
2. **管壁溫度升高**：隨著結垢層的厚度增加，管道內壁溫度可能會大大高於水的溫度。由於熱膨脹和收縮的反覆作用，結垢可能會脫落，暴露出來的金屬表面會與較冷的水接觸，導致熱沖擊，這可能最終導致管道破裂。
3. **堵塞蒸汽管道**：脫落的沉積物可能會進入蒸汽管道，對閥門甚至汽輪機造成損害。

為了降低結垢風險，通常會向汽包中加入一些化學藥劑，並對蒸發器汽包進行連續排污處理。對於 OT 蒸發器，由於無法進行連續排污，則定期進行特殊排污循環。

蒸汽管道/汽輪機葉片的沉積物：

當運行保持在正常工作範圍內時，汽包不會有水分隨蒸汽帶出。給水進行減溫操作後，水會在減溫器下游的蒸汽管道內完全蒸發。因此，減溫水中所有不揮發的成分會沉積在蒸汽管道的內表面，最糟糕的情況是這些成分會被蒸汽流帶入汽輪機，並可能附著在葉片上。這些沉積物會降低汽輪機葉片的運行效率。

因此，保持給水中不揮發成分的低濃度至關重要，以防止對設備造成損害。

二氧化矽 (Silica)：

當壓力低於 40 bar 時，水中高濃度的二氧化矽會導致結垢。在更高的壓力下，

二氧化矽變得揮發，並隨蒸汽一起被帶走。這些二氧化矽可能會在管道表面形成沉積物，減小管道的有效直徑，從而導致更明顯的壓力下降。當蒸汽膨脹且壓力降低時，二氧化矽還可能沉積在汽輪機葉片上，進一步降低汽輪機效率。

懸浮固體：

補水處理包括過濾，以防止懸浮顆粒和固體進入循環系統。然而，由於氧化物或結垢脫落，固體顆粒仍可能出現在 HRSG/WSC 內。高速的水或蒸汽流、振動和熱循環也可能導致磁鐵礦、結垢甚至鐵顆粒脫落，隨著管道流動，這些顆粒會增加設備的侵蝕，並可能沉積在閥門密封處，導致密封不緊。

蒸汽和水管道中的懸浮固體應使用過濾器和濾網分離。

侵蝕：

水或蒸汽在管道內的高速流動會加劇管道內部表面的機械侵蝕，特別是在管道彎頭處。隨著水中懸浮固體顆粒濃度的增加，這種效應會更加嚴重。

此外，侵蝕會去除保護性鐵氧體層，暴露出未保護的鋼材，進一步加速氧化，這將削弱管壁的機械性能。

應力：

由於超出設計範圍的溫度循環、水從汽包帶出、液擊和高振動會產生熱機械應力，這可能導致微裂紋，最終發展成管道破裂。此外，微裂紋為應力腐蝕等腐蝕機制提供了理想條件，加速管道的劣化。

3.2.2. Chemical Problems

與水質相關的其他問題包括水與電路中金屬組件的化學反應，主要發生在熱交換器管道內，這些反應導致腐蝕。腐蝕在許多情況下會因水流、熱循環和機械應力等機械作用而加劇。

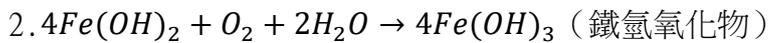
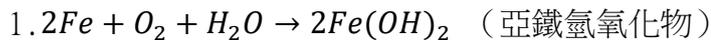
為了確保鍋爐的正確和安全運行，補水必須保持盡可能純淨。因此，原水在進入水-蒸汽循環系統 (WSC) 之前，會經過不同的物理和化學處理：

1. **過濾**：去除懸浮的固體顆粒。
2. **脫鹽**：通過離子交換系統和/或反滲透技術去除鹽分。
3. **溶解氣體的去除**：主要去除氧氣和二氧化碳，通常在 WSC 內進行。

氧氣的影響：

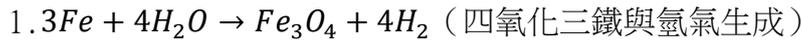
補水中的溶解氧濃度可能相對較高，因此水在進入水-蒸汽循環系統 (WSC) 時必

須經過脫氣處理。然而，當水中仍殘留一定濃度的氧氣時，氧氣會與鐵發生以下腐蝕反應：



鐵氫氧化物無法附著在鐵表面，因此在鐵、水和氧氣接觸時會發生腐蝕。

當溫度升高到一定水平後，反應會轉變為：



最終生成的產物是磁鐵礦（四氧化三鐵）。圖中顯示，氧化物中的孔隙控制了氧氣的運輸。為了促進保護性氧化層的形成，水-蒸汽循環系統中必須保持一定的氧氣濃度。

pH 值：

為了保持保護性的磁鐵礦層，應保持給水的 pH 值較高，否則磁鐵礦會溶解。因此，給水中會添加化學藥劑，以將 pH 值維持在 9 至 11 之間。

二氧化碳：

二氧化碳與水反應生成碳酸 (CO_3H_2)，這種酸會溶解磁鐵礦層。為防止這種情況發生，給水需要進行脫氣處理，並持續抽取不可凝結氣體。CO₂ 可能隨著補水中的溶解碳酸鹽或碳酸氫鹽進入系統，或者通過主冷凝器及真空管道中的空氣洩漏直接進入系統。

3.2.3. Chemical Additives

為了保持 pH 值、控制氧化過程並限制結垢，使用了多種化學添加劑。這些添加劑的效果取決於濃度、水質、溫度和壓力等因素，因此，沒有通用的規則來確定應使用哪些物質以及具體濃度。

除氧劑：

常用的除氧劑包括聯氨、亞硫酸鈉以及各種有機化合物如胺類，這些物質可與溶解氧反應，並在鍋爐內創造還原環境。這對於包含銅元素的系統有幫助，但在全鐵系統中，氧氣濃度通常已經足夠低，可以接受。此外，這些添加劑創造的強還原環境會降低磁鐵礦的穩定性。因此，聯氨等除氧劑（尤其是因其毒性）的使用

越來越不受歡迎。

這些除氧劑需要直接在鍋爐內添加，因此存在專門的加藥系統。

氨 (Ammonia)：

管道內表面的保護氧化層會因酸性（低 pH）環境而被破壞。為了避免這種情況，使用鹼性化合物將 pH 值提高到 9 到 11 之間。氨 (NH₃) 是常用的物質，而氫氧化鈉 (NaOH) 的使用則越來越少見。

磷酸鹽 (Phosphates)：

磷酸鹽常被添加到鼓型蒸發器中以軟化水質。磷酸根離子與水中的鈣和鎂離子反應，形成不溶性化合物，這些化合物在沉澱後可通過排污去除。該反應發生在超過 100°C (212°F) 的溫度下。

在高濃度磷酸鹽的情況下，可能會出現一種現象，稱為“磷酸鹽隱藏”，即磷酸鹽在鍋爐高熱傳區域部分沉澱，並隨著鍋爐熱功率的增加而增多。當鍋爐熱功率降低時，沉澱物重新溶解，磷酸鹽濃度回升至初始水平。

由於磷酸鹽還具有 pH 緩衝作用，磷酸鹽濃度的變化會導致 pH 值的變化。因此，必須保持鼓內磷酸鹽濃度在適當範圍內，以確保良好的化學控制。

四、 心得與建議

此次能夠參加針對發電機組 Balance of Plant (BOP) 系統的研習，是一個難得的成長機會，讓我得以深入了解熱循環系統中各個環節的運作，也讓我對整個電廠的運行架構有了更全面的認識。在此，感謝公司和興達電廠各級主管的支持和機會，讓我能夠出國學習和吸收新知識，為日後的工作奠定更堅實的基礎。

此次研習重點是發電機組的 BOP 系統，其中涉及如何將燃氣輪機 (GT) 排氣中的熱能轉移至工質水中，進而從布雷登循環進入朗肯循環的過程，最終將熱能逐步轉化為機械能。在這個過程中，涉及主系統中的冷凝水、給水、蒸汽及循環水，以及輔助系統如真空系統、廠用水系統、潤滑油及燃氣等。每一個系統都是不可或缺的齒輪，共同構建出這套複雜而精密的熱能轉換結構。

此外，興達電廠新採用的三壓式熱回收鍋爐 (HRSG) 也是此次研習的重點之一。鍋爐的高壓部分為貫流式設計，這種設計的特色及其在熱能轉換中的應用，讓我對未來的新設備運行及其維護要求有了更清晰的理解。在鍋爐起停過程和水處理方面的學習，更讓我深刻認識到操作流程中的每個細節對於機組穩定運行的重要性。

回顧這段學習歷程，除了獲得技術知識外，我也深刻體會到每個系統之間如何協

同運作，彼此支持，以實現整體效能的最大化。BOP 系統中涉及的各個環節，就像電廠運行中的生命線，從主系統到輔助系統，每一部分都緊密聯繫，共同保證機組的安全、穩定、高效運行。這些知識的積累，對我來說不僅是技術上的提升，更是對整個電廠系統運作的全盤理解，這對於我未來在實際工作中提升設備運行效率，優化操作策略，將帶來極大的助益。

這次的研習也讓我對新技術的應用與整合有了更多思考，尤其是 HRSG 的應用如何在能源轉換過程中最大限度地提升效能，減少能量損失。這不僅是技術挑戰，更是對未來電廠實現高效運行、節能減排的重要探索。

最後，感謝公司提供的學習機會，讓我能夠將最新的技術知識帶回來，與同仁分享並應用於興達電廠的新機組運行中。我相信，通過這樣的學習和成長，我們能更好地面對未來的挑戰，為公司、為能源轉型貢獻自己的力量。讓我們共同努力，為電廠的卓越運行奠定堅實基礎，持續提升公司的競爭力，實現技術和效能的雙向突破。

參考文獻

1. GE, IPS-1080188 TRAINING MANUAL BOP, 2024.08
2. GE, IPS-1080188 TRAINING MANUAL HRSG, 2024.08