

一、目的

本公司林口電廠更新擴建計畫（下簡稱「林口更新計畫」）引進海水法排煙脫硫系統(SWFGD)，然而公司尚無此系統運轉實績電廠，故期能透過本次「林口更新擴建計畫海水法排煙脫硫系統及其附屬設備設計、製造、測試、運轉及維護實習」熟稔 SWFGD 設計原理與特性、運作方式、材料考量及各項優缺點等，以供未來新建選用規劃或改善評估之參考建議。同時建立本公司運轉、維護能力，發揮該系統效能，確保設備穩定運轉，並符合現今日益嚴格的環保要求。

二、實習過程

日期	城市/機構及實習內容
8/18	赴日本
8/19~8/26	GE-ALSTOM 講師講解海水法排煙脫硫系統流程、儀電設備、機械設備課程
8/29~9/2	赴 ARVOS 及 TORISHIMA 見習
9/5~9/9	赴 TOMATOH-ATSUMA 發電所見習
9/12~9/13	課程總結及討論
9/14	回程

三、實習內容

(一)海水法排煙脫硫系統概述

煤炭經鍋爐燃燒後會產生大量煙氣，其中含有大量的硫氧化物與其它化合物，根據林口更新計畫的煙氣量和煙氣參數，如果不進行脫硫，每機組排到大氣中的硫氧化物約 3,000 公斤/小時；40,000 公噸/年，將嚴重影響環境及人體呼吸道系統，在煙氣排放之前透過脫硫系統可大量去除煙氣中的硫氧化物。

SWFGD 系統係引入部份發電鍋爐所使用的冷凝海水，與煙氣接觸，利用海水中所含的天然鹼性物質，吸收並中和硫氧化物。作用後硫氧化物將氧化成無害的硫酸根 (SO_4^{2-}) 排回大海。由於背景海水中即含有大量的 SO_4^{2-} ，因此此系統放流將不致對海洋環境造成明顯影響；亦即以循環概念為基礎，藉由抽取海水執行脫硫，再將脫硫海水調整後排回大海。

(二)海水法排煙脫硫系統特點

台電過去既有燃煤電廠之脫硫設備，均使用濕式石灰石-石膏法。興建中的林口及大林電廠新機組，則是台電首度使用海水法排煙脫硫系統。其他於國內廣泛採用之脫硫系統尚包括乾式及半乾式脫硫系統；國外亦發展有 SNOX 法、DESNOX 法、活性

炭焦吸附法等諸多脫硫技術，各有其不同之適用條件與特性。與其他脫硫系統比較，SWFGD 具有主要優點包括：

1. 無需額外添加脫硫劑，脫硫成本低。
2. 節省淡水資源：SWFGD 系統主要使用海水，僅使用少量淡水進行吹灰，相對傳統之石灰石-石膏法節省大量淡水耗用量；尤其在現今極端氣候，淡水資源經常窘迫的台灣環境下，SWFGD 系統更具優勢。
3. 設備、流程相對簡單；除可降低設備初設費用，運轉維護工作亦較簡單，並節省運維成本。
4. 系統穩定度高，設備較無結渣等問題：SWFGD 系統使用海水為脫硫劑，由實場運轉經驗，因其設備相對單簡單，運轉穩定度高，並無結渣等問題。相較於石灰石-石膏法使用石灰石（ CaCO_3 ）漿液作為脫硫劑，其中所含之大量鈣離子，易在各設備中發生結渣問題；常需停機或煙氣旁通清除結渣，影響設備穩定度。
5. 不產生副產物或廢棄物，無副產物去化或廢棄物處理問題：SWFGD 系統則無副產品或廢棄物產生，運轉相對單純。相較於石灰石-石膏法，其副產品（石膏），受制於市場波動，而經常有不易去化的問題。

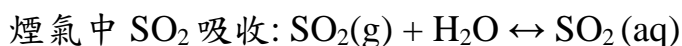
然而 SWFGD 系統亦有其相對的限制及應用上應注意之處，包括：

1. 需取用大量海水，不適合內陸電廠。
2. 對於海洋影響的控制：海水吸收煙氣中硫氧化物等酸性物質，藉由大量海水鹼度並經曝氣與中和。惟放流水 pH 值仍稍低於背景海水。為確保放流水不致造成附近海域的影響，林口更新計畫除於環評中訂有加嚴的放流水 pH 值標準予以管控外，並設有連續自動監測系統 (CWMS)，監測水質並即時上傳地方環保局。另並進行定期海域水質、生態監測調查，將可能之環境影響降低最低。

(三)海水法排煙脫硫原理

林口更新計畫之 SWFGD 系統每部機組搭配兩套煙氣系統及一套海水處理系統，煙氣系統內利用海水混合煙氣，溶解其中的 SO_2 而達到脫硫目的，而脫硫後海水會帶酸性，回到大海前須在海水處理系統內執行相關處理使水質符合規定，整體系統簡單且無任何副產物。系統相關反應過程如下：

煙氣脫硫：



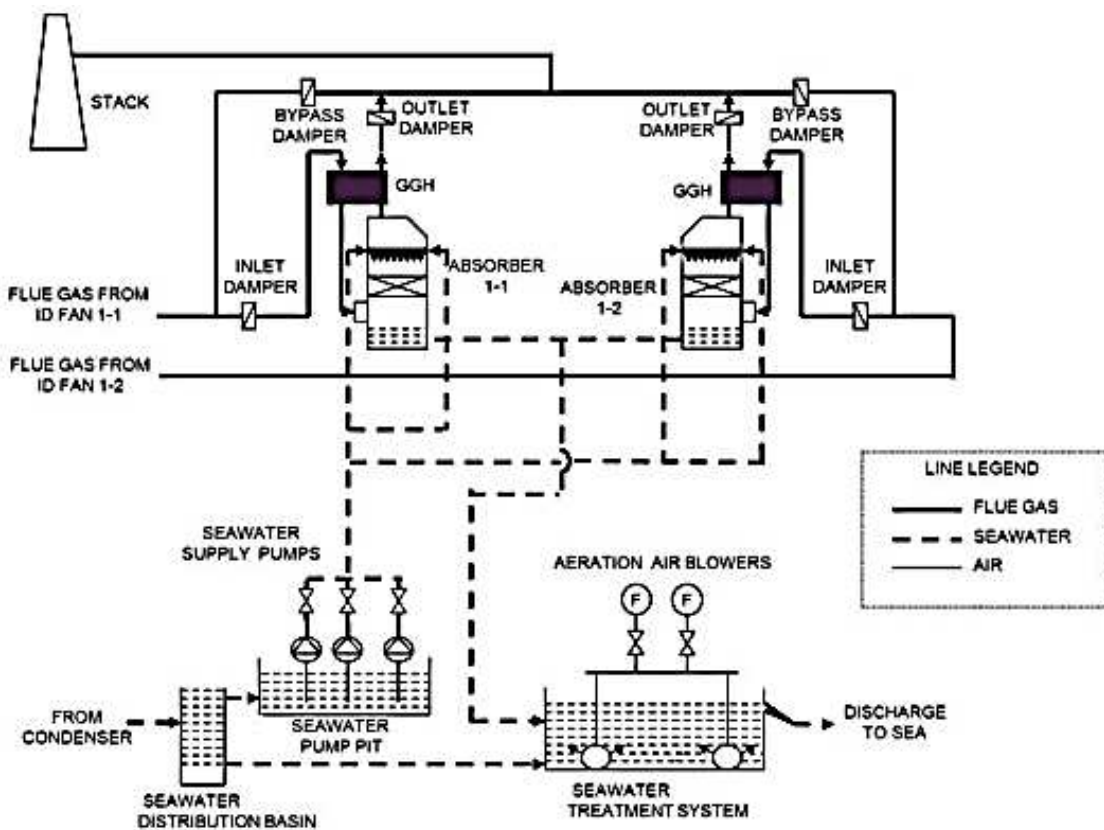
水合 SO_2 分解： $\text{SO}_2(\text{aq}) \leftrightarrow \text{HSO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{SO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$

脫硫海水處理：

曝氣池內 SO_3^{2-} 氧化： $\text{SO}_3^{2-} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \leftrightarrow \text{SO}_4^{2-}$

海水中的鹼對 H^+ 中和： $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}$

二氧化碳吹脫： $\text{CO}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ (↑排到大氣)

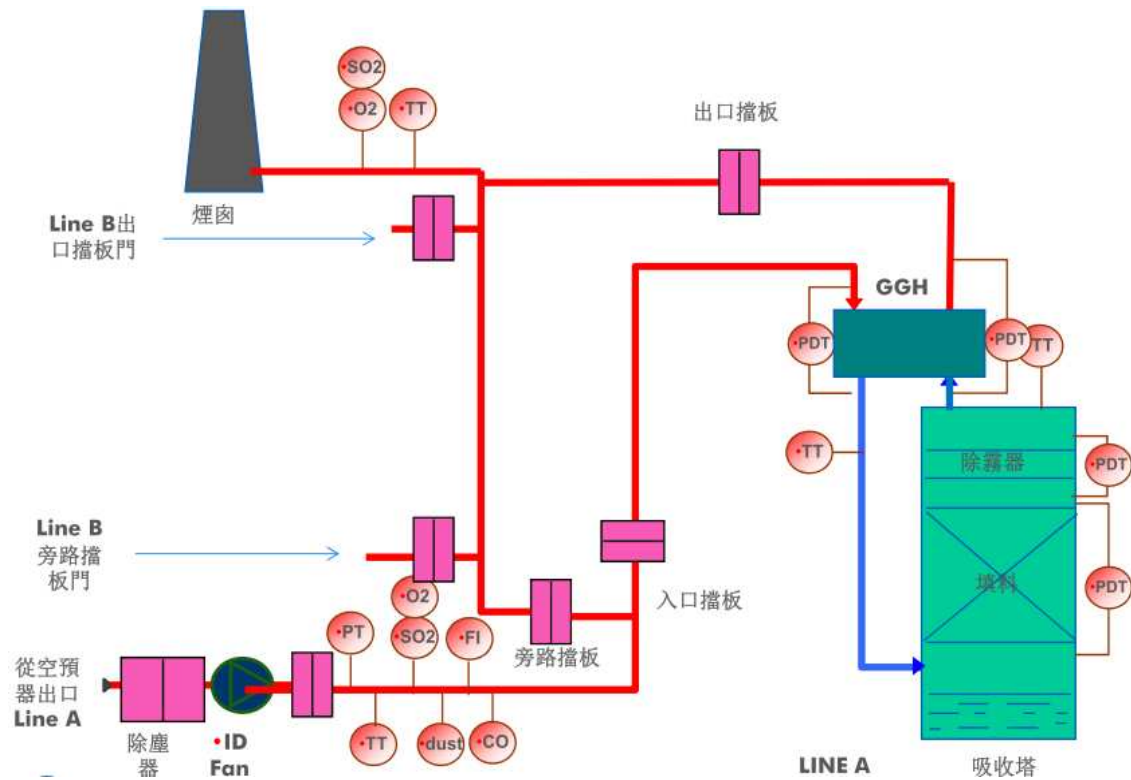


系統流程與配置

(四) 煙氣系統及設備

帶有硫氧化物的煙氣去除粒狀污染物後，經由引風機吸引即進入脫硫系統，煙氣經過降溫、脫硫、升溫等一連串程序後，最

終乾淨的煙氣經煙囪排出進入大氣。設備包含擋板門、氣對氣熱交換器(GGH)、吸收塔等。



煙氣系統流程

1. 擋板門

擋板門主要功能為隔絕煙道內煙氣，分有入口擋板門、出口擋板門及旁路擋板門，正常運轉情況下旁路擋板門為常閉狀態，入口及出口擋板門常開形成一脫硫通路。設計上出口及入口擋板門為電動驅動；而旁路擋板門以氣動驅動，因氣動方式有快速開關特性，開啟旁路擋板門時機有可能為緊急狀況，短時間開閉特性能保護系統免受損壞。各擋板門基本設計如下：

入口檔板門

類型：百葉窗式，帶密封空氣

執行器型式：電動

開關時間：<44 秒

出口檔板門

類型：百葉窗式，帶密封空氣

執行器型式：電動

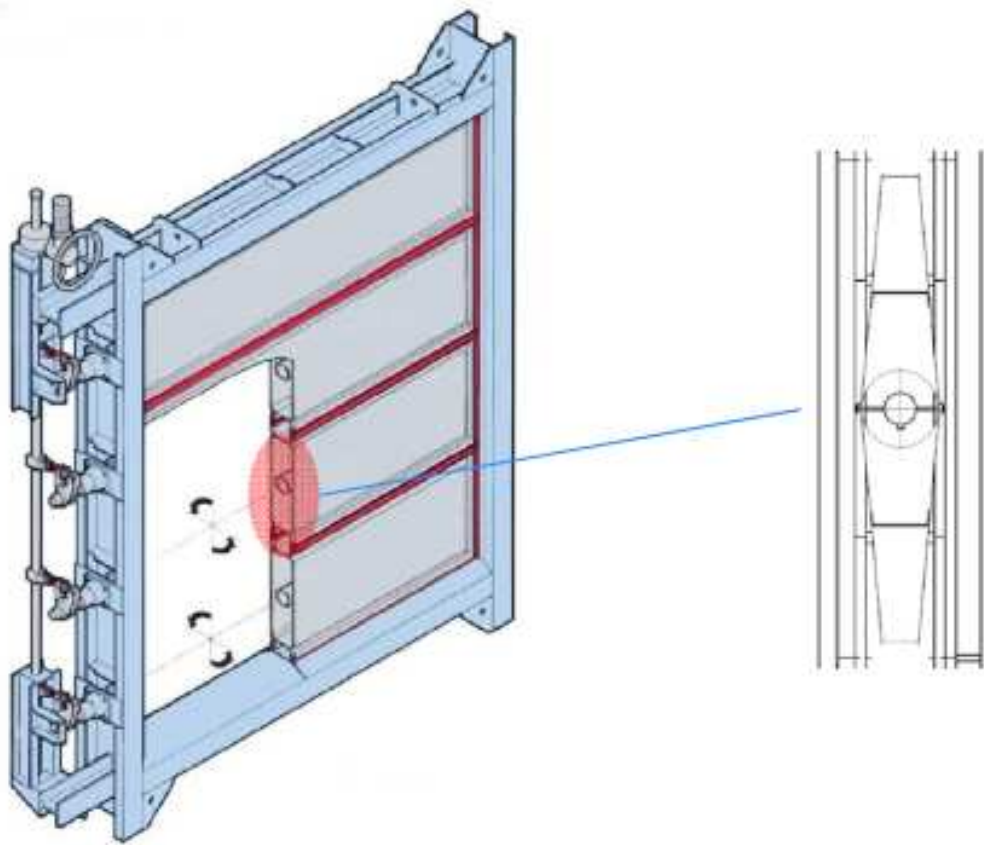
開關時間：<45 秒

旁路檔板門

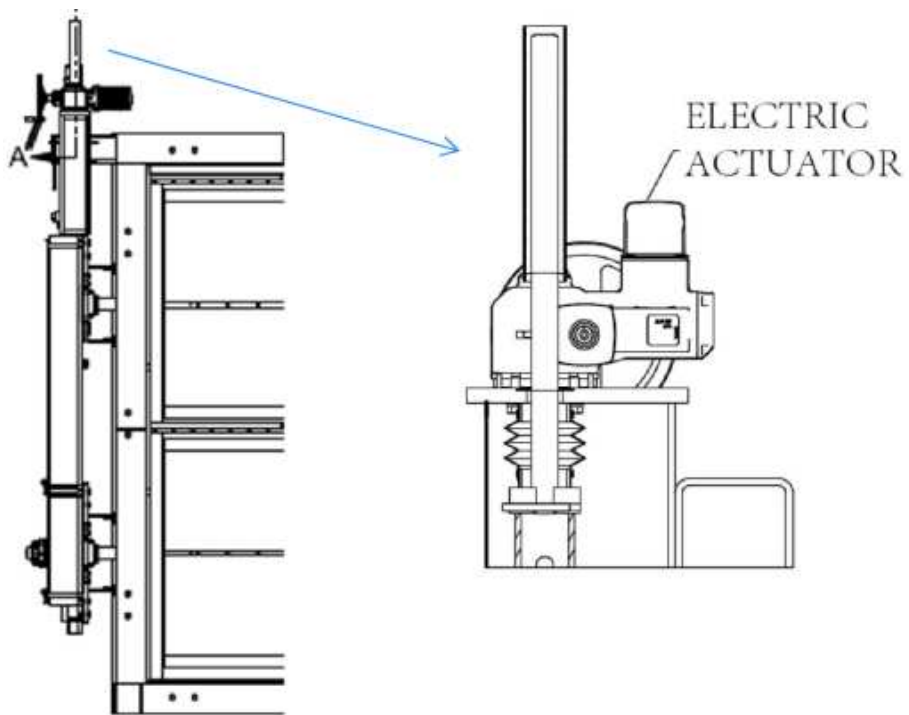
類型：百葉窗式，帶密封空氣

執行器型式：氣動

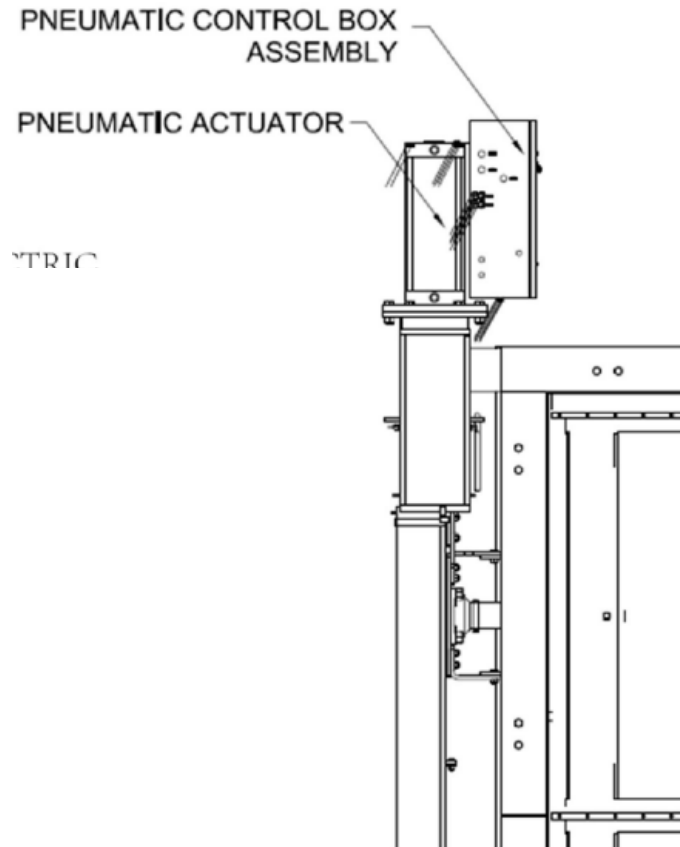
開關時間：<6 秒



門板結構



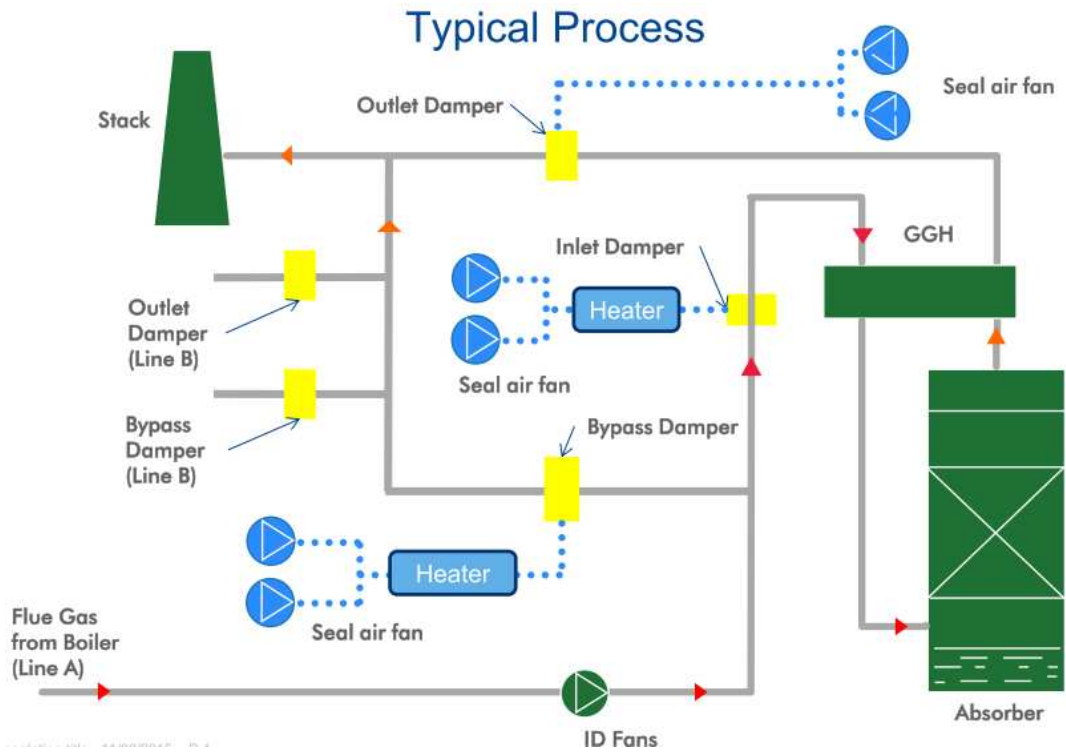
電動驅動機構



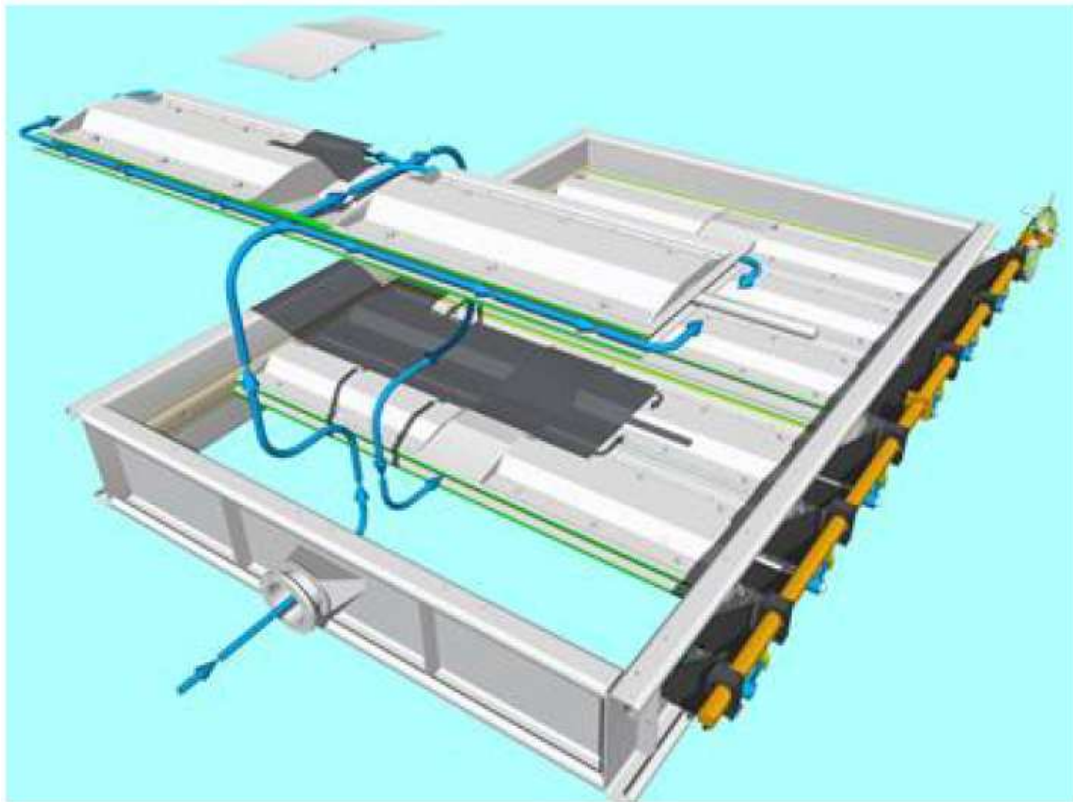
氣動驅動機構

密封空氣系統

關閉的擋板門於交接處存在縫隙，兩側的壓差可能會導致未脫硫煙氣洩漏至另一側排到大氣而增加硫氧化物排出量，故須導入密封空氣通過擋板門中間產生氣封。另外，為防煙氣中硫氧化物凝結成酸造成設備腐蝕，入口和旁路擋板門密封空氣系統包含加熱器；出口擋板門因接觸到硫氧化物濃度較低相對較無腐蝕問題，故其密封空氣系統不需加熱器。



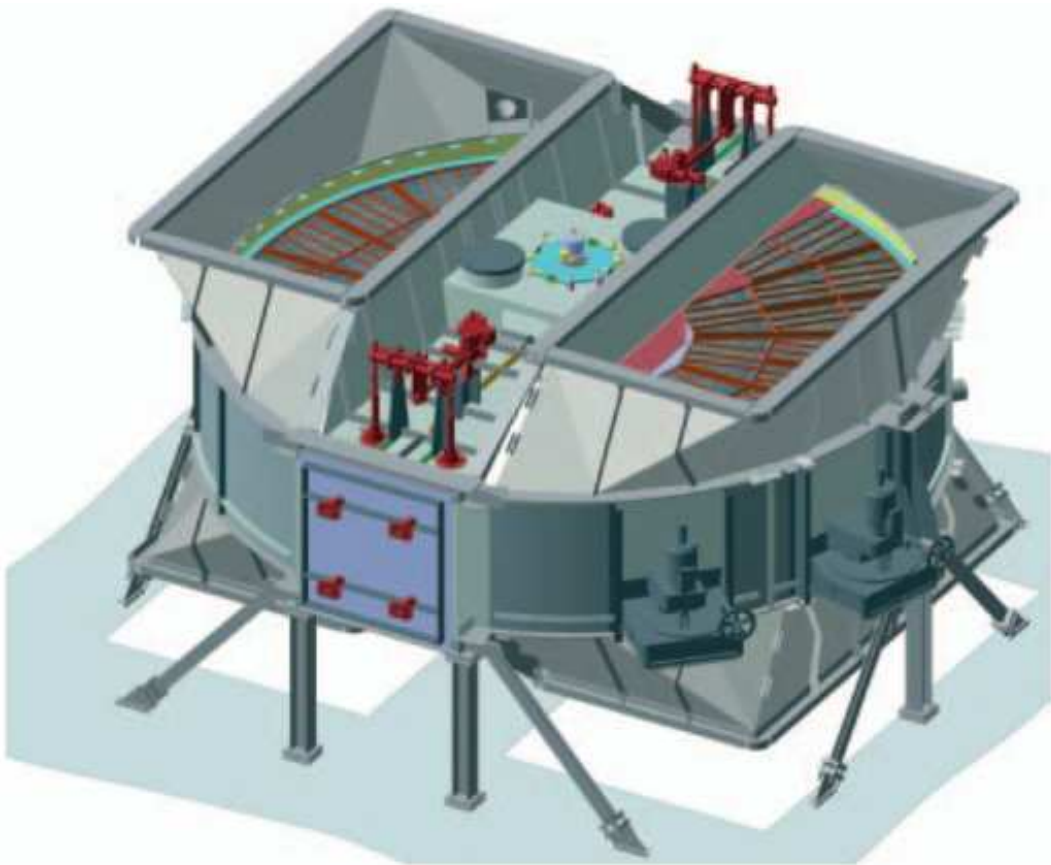
密封流程



密封示意

(五) 氣對氣熱交換器(GGH)

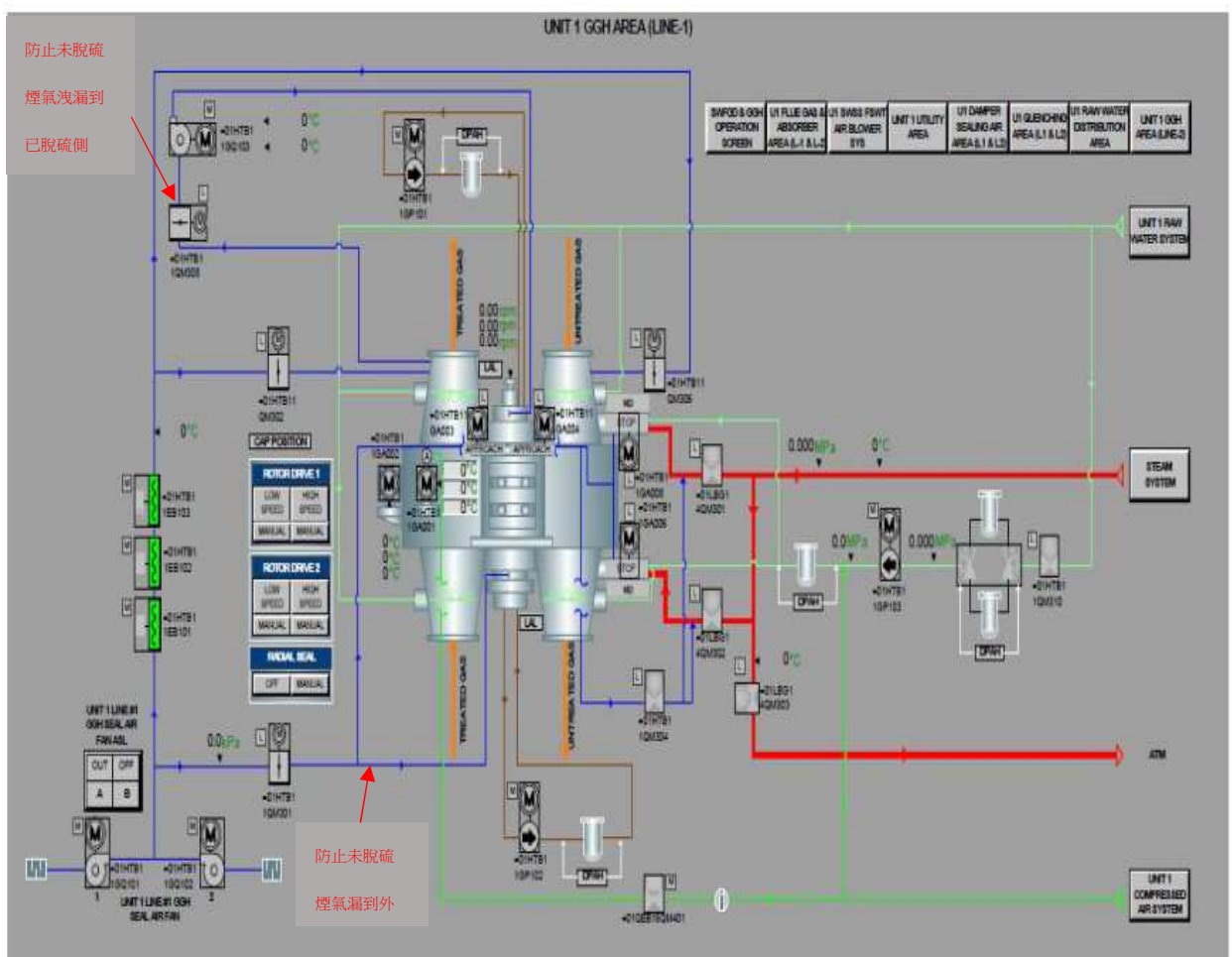
GGH 主要功能為進入吸收塔前及出吸收塔後的煙氣熱交換，降低進入吸收塔煙氣的溫度保護塔內不受高溫損壞；同時熱能被換熱元件帶到吸收塔出口加熱煙氣，使其溫度高於露點，可防止後端煙道及煙囪腐蝕，並加強煙氣擴散效果。此型式 GGH 的缺點是設備以轉動型式跨過兩側，造成些許煙氣未進入吸收塔即被帶至大氣。



氣對氣熱交換器

密封空氣系統

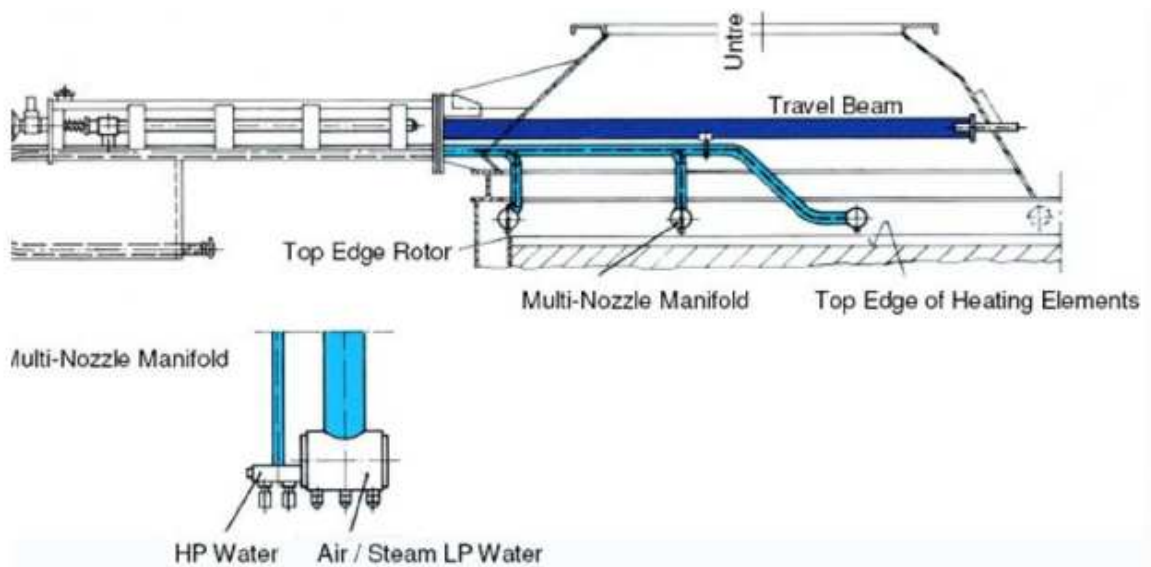
因 GGH 以轉動執行熱交換且銜接驅動及吹掃系統，所以未脫硫側與已脫硫側/GGH 與外界交接處存在間隙，為盡量避免煙氣未進入吸收塔執行脫硫，除了盡可能縮小間隙外，導入密封空氣才能讓煙氣隔離最大化。



密封空氣系統

吹掃系統

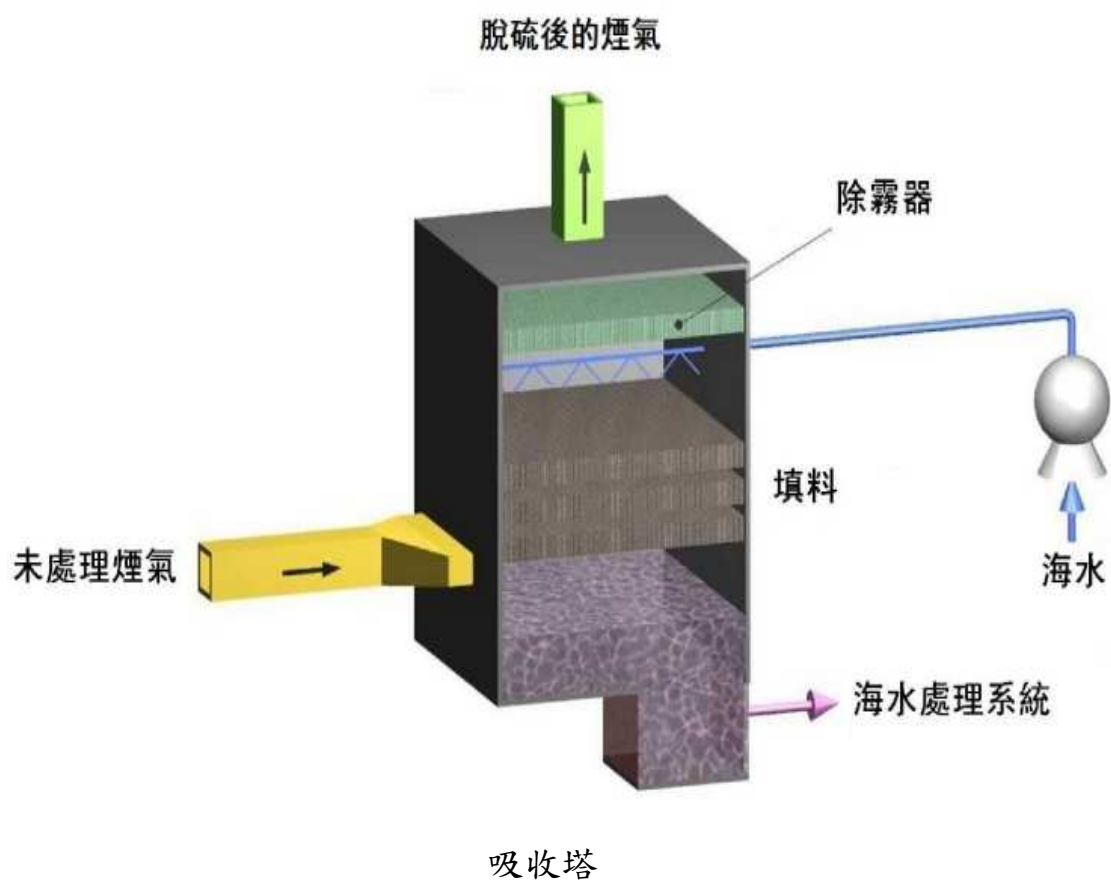
換熱原件構造為蜂槽狀，運行過程煙氣會挾帶粒狀物而逐漸阻塞孔槽，必須利用吹掃系統暢通讓煙氣能持續通過。吹掃系統由兩套可完全伸縮的蒸氣/高壓水噴槍組成(未脫硫側轉子上下兩側)，正常運行下蒸汽吹掃每 8 小時自動執行，每次吹掃持續時間約為 2 小時；而壓降達到 1.5 倍初始乾淨狀態壓降時啟動高壓水清洗系統，並以低速運行進行清洗，持續時間約為 11 小時。



吹掃系統

3. 吸收塔

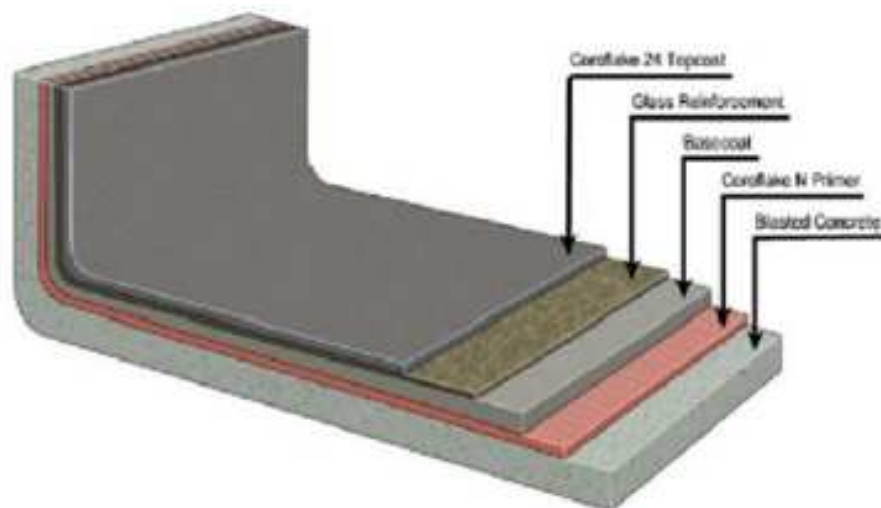
吸收塔為煙氣與海水混合的空間，煙氣中的硫氧化物在此被海水吸收帶到吸收塔底層再送往海水處理系統。塔內主要設備含海水分配管、填料及除霧器。



防腐襯裡

海水吸收硫氧化物後轉為酸性溶液，直接接觸吸收塔內層會使其腐蝕，故塔內側需施加適當的防護措施，用玻璃鱗片組成的塗層即可有效防止酸性溶液腐蝕。

<u>Item</u>	<u>Description</u>	<u>No. of Coats</u>	<u>Colour</u>	<u>DFT Thickness (microns)</u>
Primer	Coroflake N			
	Primer AS	1	Black	100 – 200
Basecoat	65 Lining Resin/ F-1 Powder	1	Grey	
Reinforcement	65 Lining Resin/ ECR 450 gm/m ²	1	Grey	2,025 – 2,500
Topcoat	Coroflake 24	1	Off-White	350 – 500
Thickness range:		2.5 – 3.2 mm		
Target thickness:		2.8 mm		
Minimum thickness:		2.5 mm		

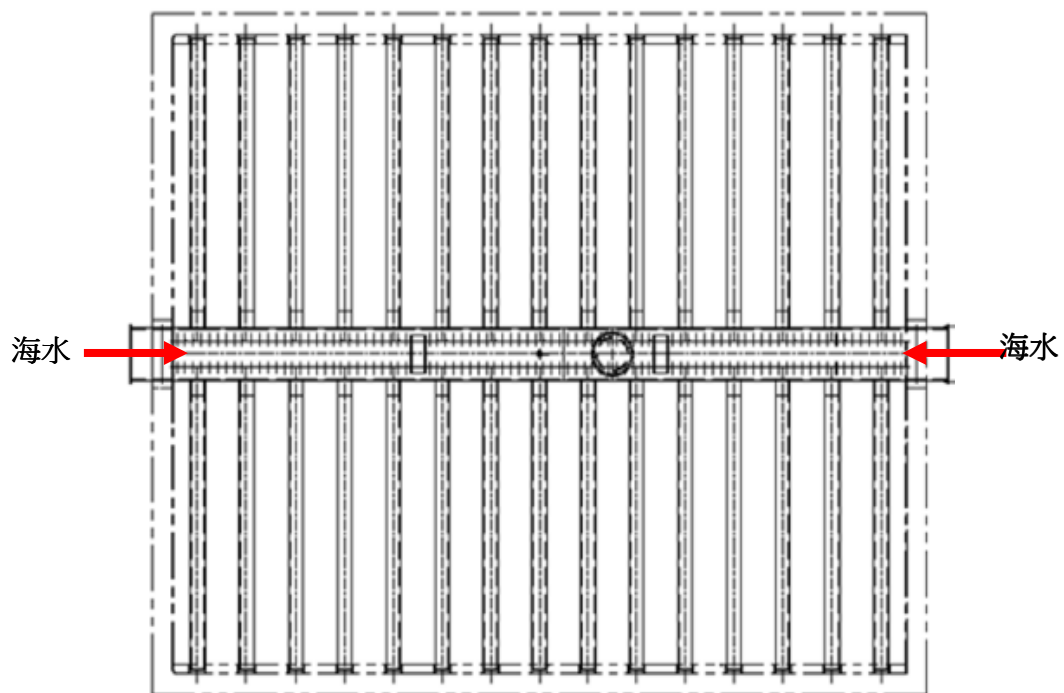


Coroflake 24M Systems Design

吸收塔襯裡塗層

海水分配管

由海水供應泵抽取新鮮海水進入一 ID 900mm 主管，再由主管兩邊分出數對 ID 263mm 支管進行海水噴灑，其主要功能為均勻海水分布填料中，令海水充分與煙氣接觸而達到較全面的吸收效果。



海水分配管俯視圖



海水分佈情形

填料

填料由聚丙烯(PP)塑型製造而成，向下噴灑的海水與向上竄升的煙氣會在填料內會合，填料扮演緩衝空間的角色，使海水能充分吸收硫氧化物。填料分成規整填料及散裝填料，規整填料為方整蜂槽狀置於填料區下層，功用為均勻煙氣分布；散裝填料為雪花狀散布於規整填料上方，提供海水與煙氣充分混合區域。填料能抗腐且不參與反應，理論上不會有所消耗，但隨著運轉時間仍可能產生破損，必須適當檢查及更換填補。



規整填料



散裝填料

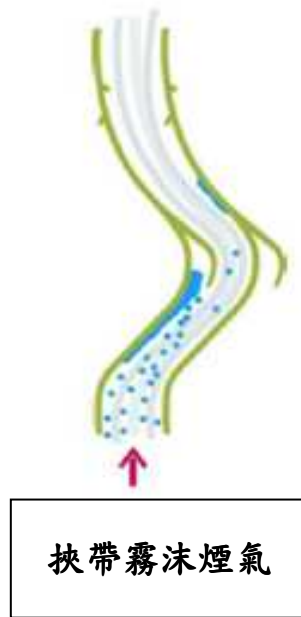
除霧器

海水由吸收塔噴灑時會產生大量霧沫，當煙氣通往吸收塔出口時會將其一併挾帶出去，被帶出的霧沫在下游冷卻後凝結成水滴會造成煙道或煙囪腐蝕，而裝置除霧器即可攔截霧沫。



除霧器

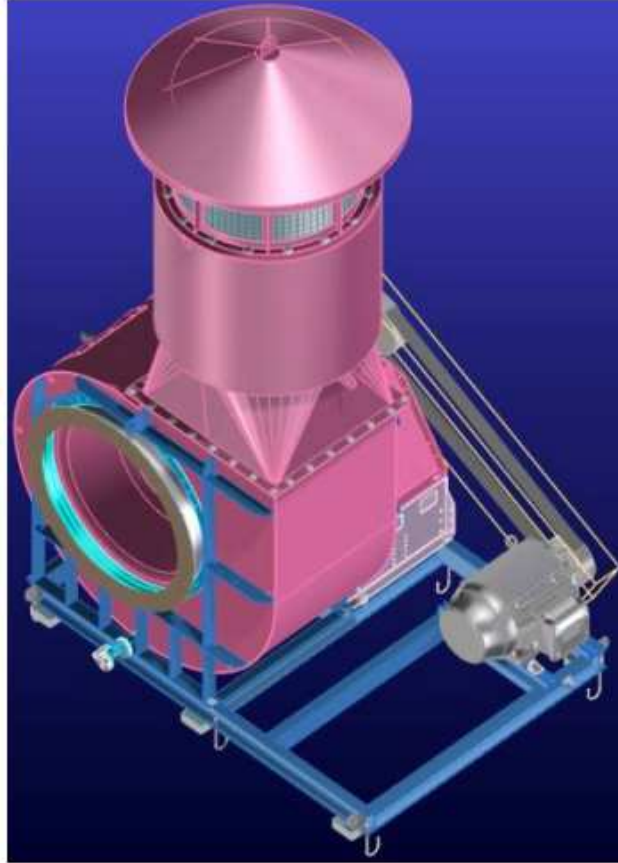
除霧器的內構造為多個波浪彎折且設突出物，霧沫經過除霧器逐漸凝聚成液滴，聚集足夠重量後液滴向下流出，最終剩煙氣向上排出。內構造可能隨著煙氣帶來的物質造成阻塞，因此除霧器上下兩側配有清洗管提供清洗。



除霧器內構造

清掃風機

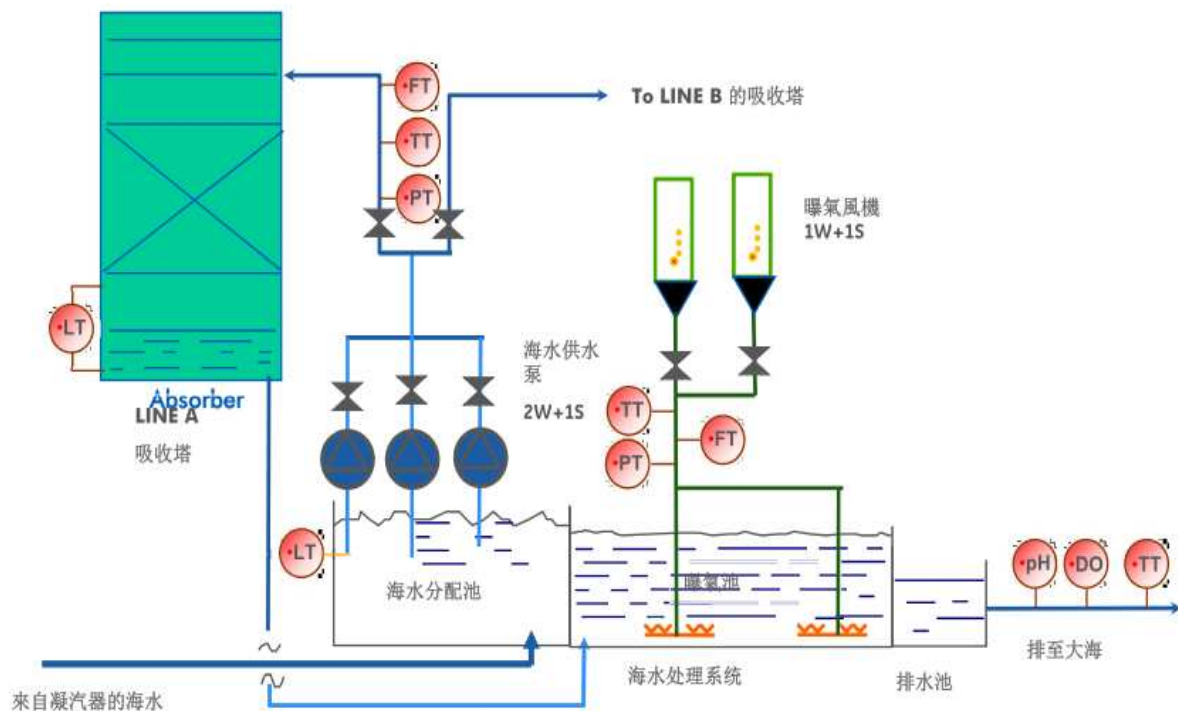
系統停機後吸收塔內仍會含有高濃度硫氧化物的煙氣，在需要進入吸收塔內檢修的情況下，若檢修人員貿然進入將可能遭致危害，須藉由清掃風機帶出殘餘煙氣並通入新鮮空氣，待換氣且確認安全後方可進入作業。



吸收塔風機

(六)海水系統及設備

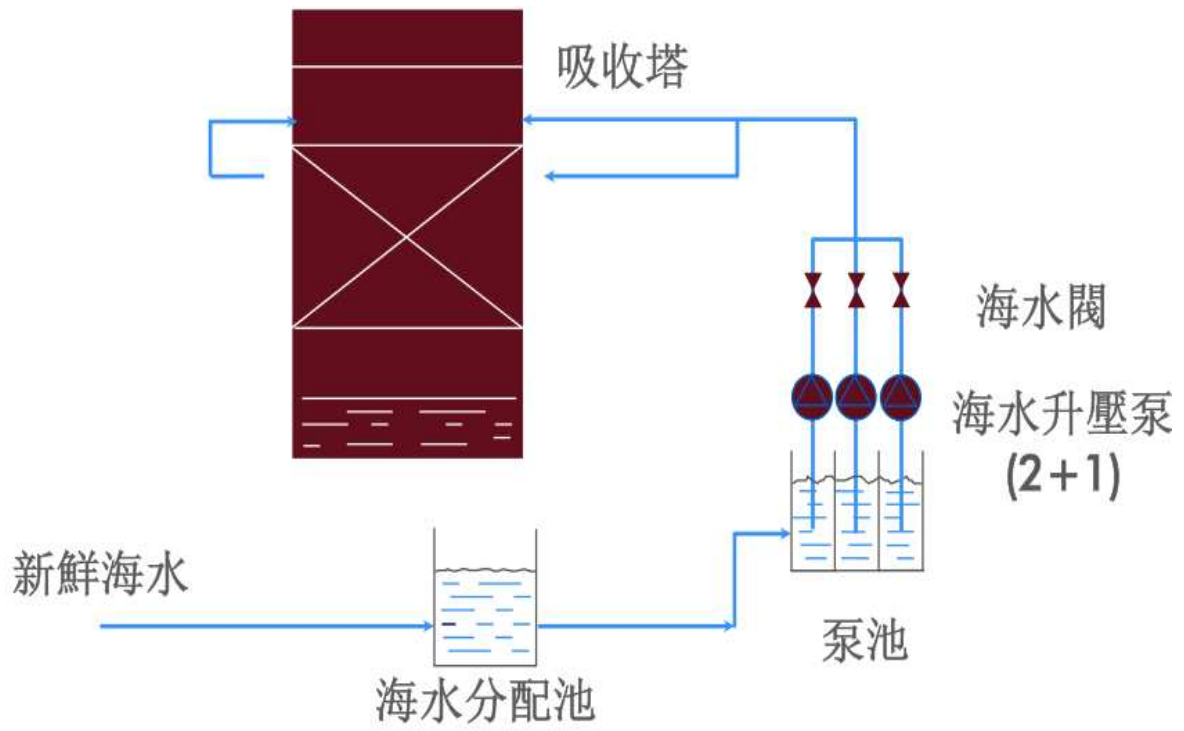
海水系統分為供應系統及處理系統。供應系統為整個系統提供海水至吸收塔執行脫硫；處理系統為調整脫硫後海水的 pH 值、化學需氧量及溶解氧等，使其達排放標準再回到大海。



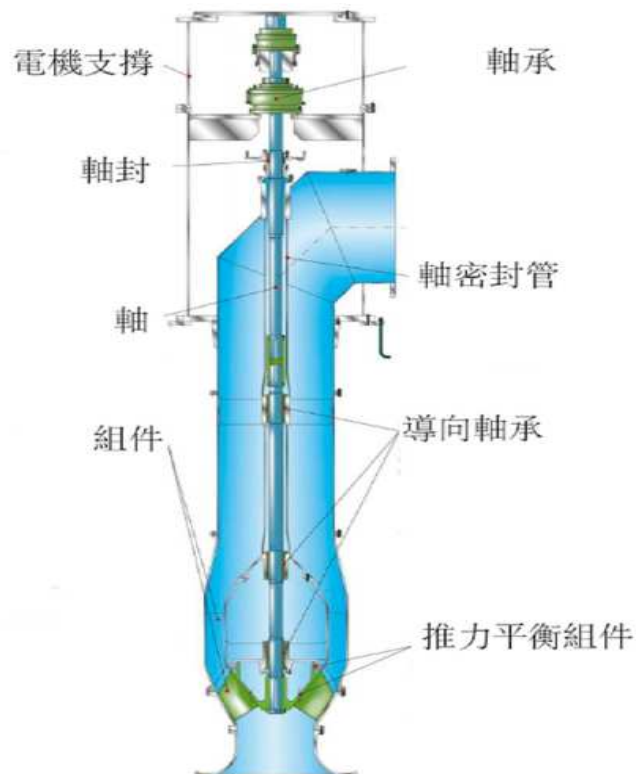
海水系統

1. 海水供應系統

系統執行抽取新鮮海水輸入吸收塔內海水分配管執行噴灑脫硫，每部機組由 3 部海水供應泵及橡膠內襯管路組成，機組正常運轉下僅啟動 2 部泵，另 1 部備用。每部泵出口皆配有一個電動液壓碟閥，閥一側配有重錘，泵停機時可藉重錘迅速將閥關閉 90%，剩餘 10% 再以液壓關閉，此設計可避免水錘造成泵損壞。



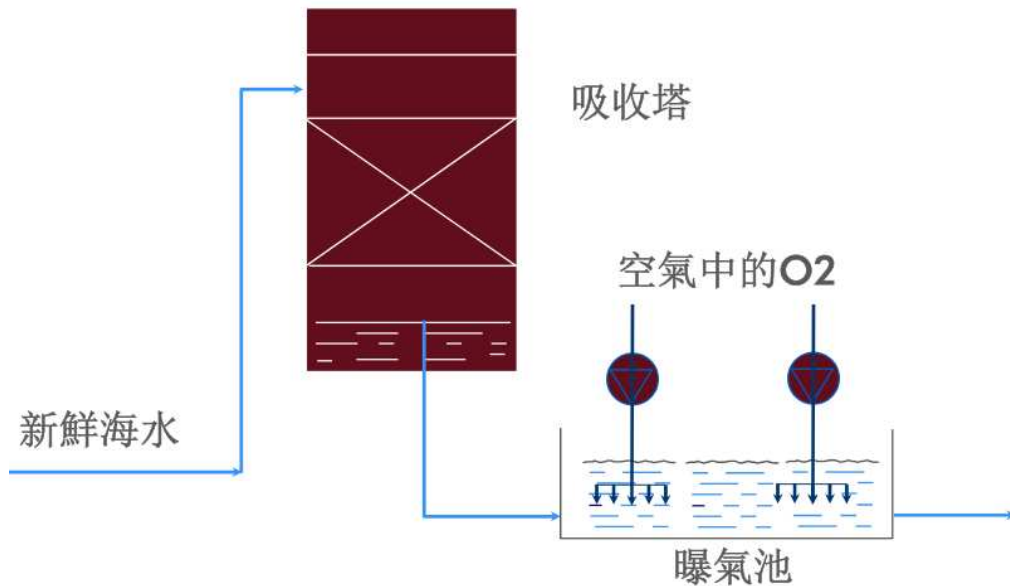
海水供應系統



海水供應泵

2. 海水處理系統

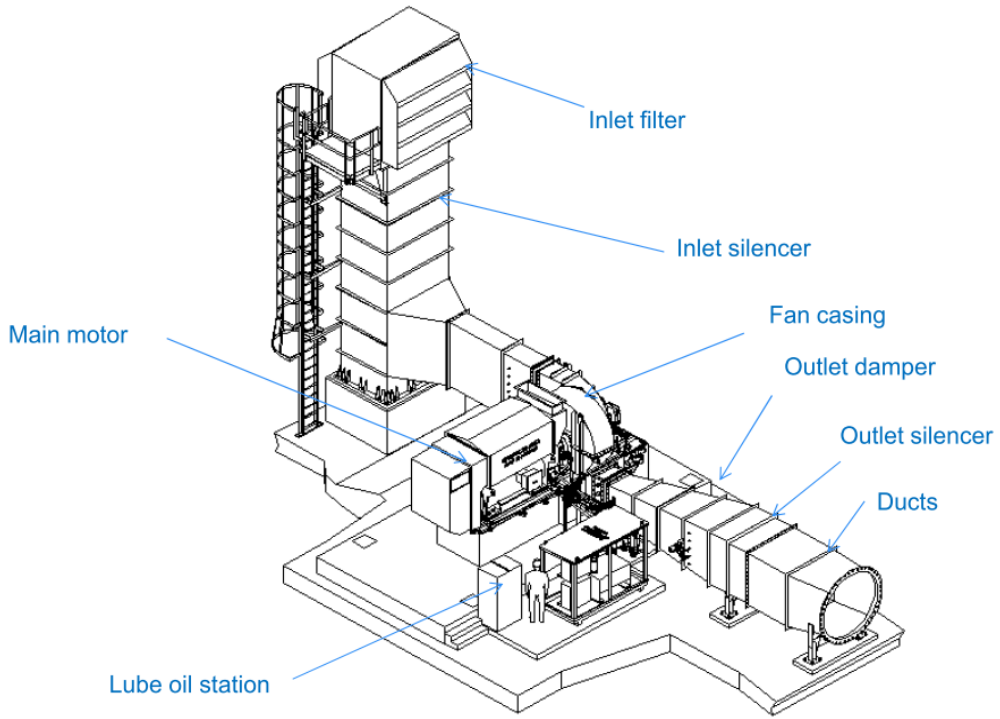
溶入大量硫氧化物的海水呈現酸性，須先將其導入曝氣池混合些許新鮮海水以增加溶解氧及防止硫氧化物溢出，再導入第一級曝氣區中曝氣[原理詳見三、(二)]，之後再混入剩餘新鮮海水後導入第二級曝氣區，最終排入大海。



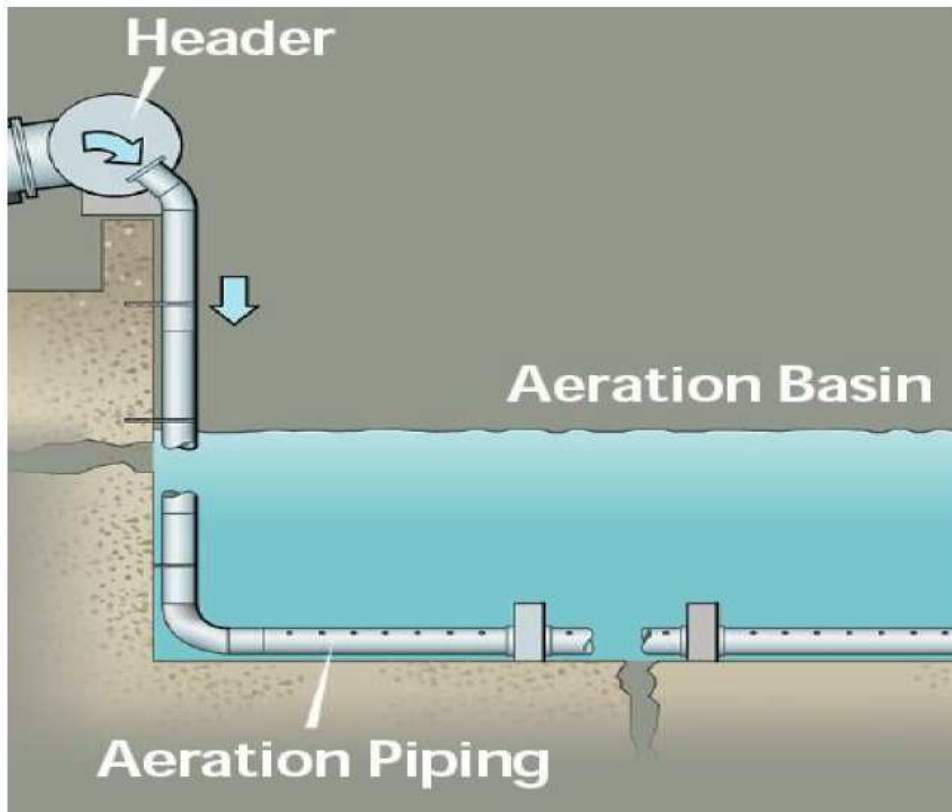
海水處理系統

曝氣風機

曝氣區內空氣由曝氣風機鼓風打入池底，使脫硫海水增加溶氧促進 SO_3^{2-} 快速氧化成 SO_4^{2-} ，並吹脫二氧化碳排入大氣中使 pH 值得以回昇。



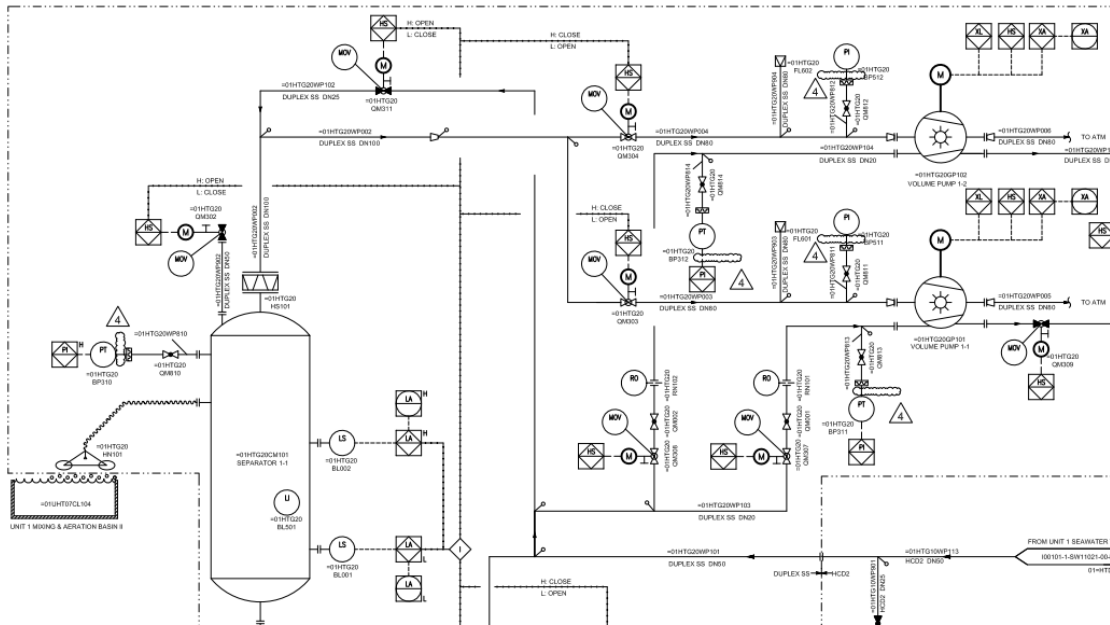
曝氣風機



曝氣風管

除泡系統

曝氣池中因打入大量空氣使海水表面產生大量泡沫，為防泡沫隨同排入大海，故設置除泡系統加以排除。系統在曝氣池後段以錐形檔板將泡沫集中至中央處，再以真空吸引方式將泡沫集中至氣水分離氣內，待達一定量後排放。



除泡系統

(七)系統啟停

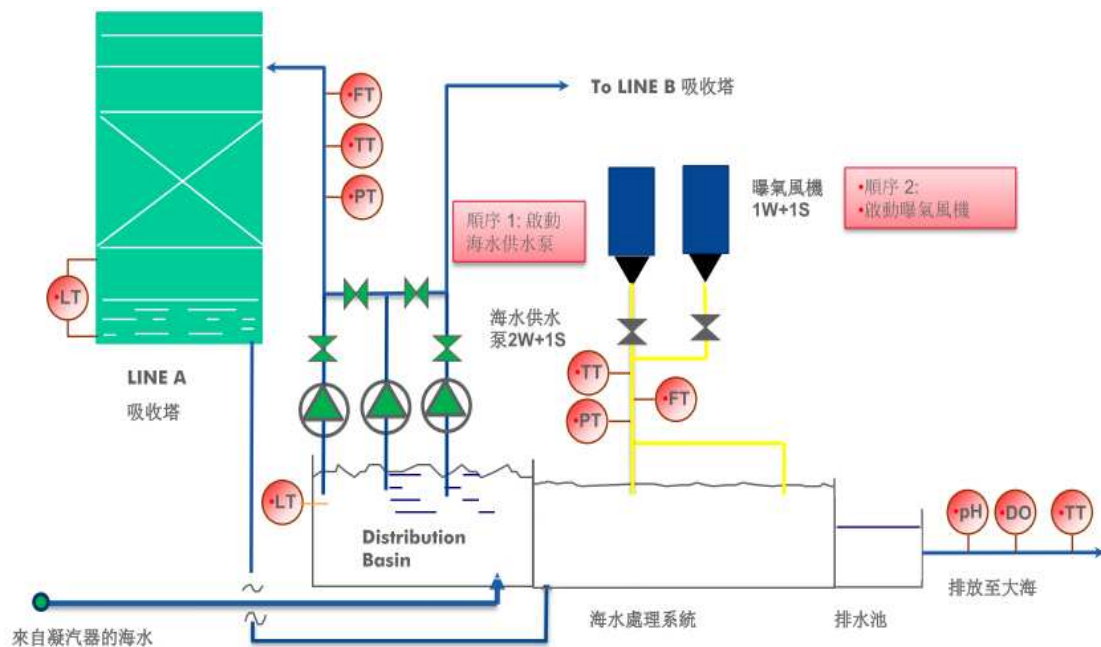
執行系統啟動前確認系統中沒有緊急關閉信號和警報信號，且確認除塵器、引風機、儀用空氣、廠用空氣、冷卻水系統工作正常及入口煙氣溫度 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ 、 $\leq 140^{\circ}\text{C}$ 等條件，方為啟動系統的必要條件。

1. 啟動海水側

為保護整個 SWFGD 系統不受高溫侵害，必須先確認海水供應系統正常無虞，並在煙氣投入前運轉，啟動程序為：

- (1) 啟動海水泵：啟動前先確認泵池水位在最低點以上，且泵出口閘門關閉。啟動後必須檢查至吸收塔的海水流量及吸收塔內的液位。塔內液位 10 分鐘沒有警報方可啟動下一步。
- (2) 啟動曝氣風機：確認投入足夠空氣量，確保導入煙氣後脫硫海水可達排放值。

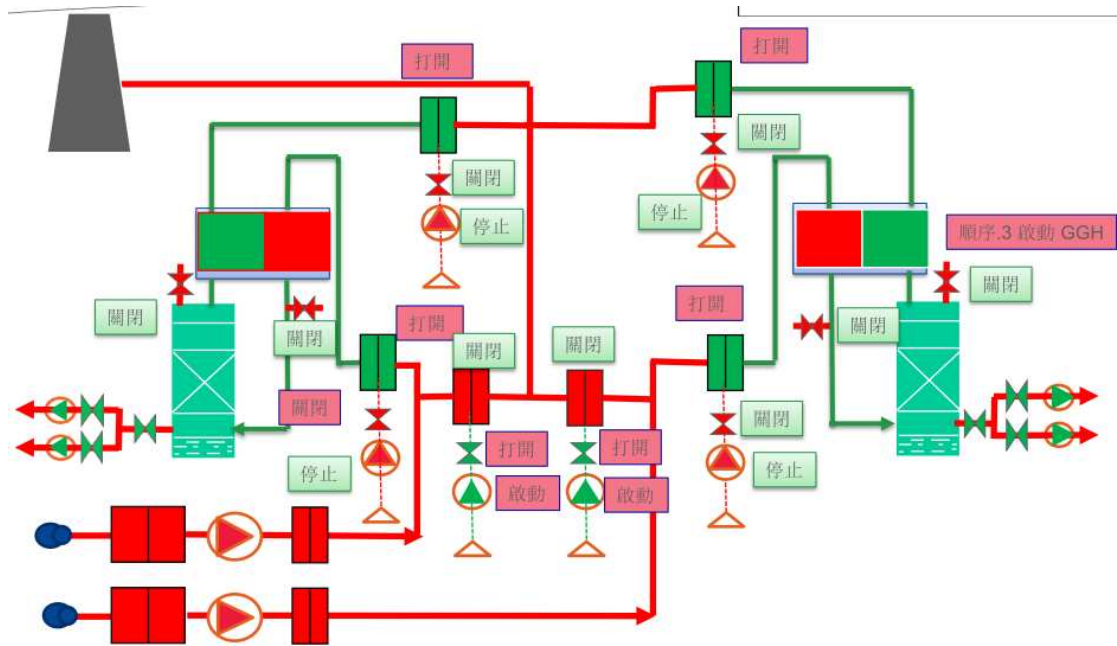
海水側啟動



2. 啟動煙氣系統

確認海水側已正常運轉後始能投入煙器側，啟動程序為：

- (1) 啟動 GGH：將兩台兩台驅動裝置全都啟動至低速模式，待五分鐘後切換至低速模式，帶動 GGH 至正常轉速。
- (2) 啟動擋板門：海水側及 GGH 備便啟動後，開啟進、出口擋板門且關閉旁通擋板門，並通入煙氣執行脫硫。



啟動煙氣系統

3. 系統停機

系統停機順序與啟動順序相反。

四、問題與討論

此次受訓期間向講師提出的議題討論與回覆整理如下：

(一) **Q:國際上 SWFGD 發展應用情形為何？相較於台灣普遍使用的濕式石灰石-石膏法優勢為何？**

ANS:

SWFGD 技術為歐洲所開發，其後逐漸推廣至大陸、中東、東南亞等電廠，目前大陸沿海地區電廠已廣泛使用 SWFGD。

SWFGD 相較於濕式石灰石-石膏法主要具有處理成本低、去除效率高、設備簡單、維護容易、較無結垢問題、節省生水用量等優勢。但 SWFGD 應用上亦有須為設於濱海，海水取得容易的限制條件，因此內陸地區即無法設置。因此 SWFGD 的選用時仍有地理位置等考量（有關 SWFGD 系統與石灰石-石膏法的比較詳三、(二)節內容）。

(二) **Q:既設系統在不加鹼前提下，提升放流水 pH 之建議方案為何？**

ANS:

SWFGD 主要係利用海水天然鹼度中和吸收硫氧化物產生之酸度，因此欲提升 pH 最有效之方式為增加海水量。惟對於既設設備系統，SWFGD 海水量即為冷卻海水量，如欲增

加，將涉及整個冷卻海水的變更，牽涉過大而可行性不高。

另對於增加曝氣量，以增進曝氣效果來提升 pH 值的方式，

GE-Alstom 講師初步認為，曝氣提升 pH 除考量曝氣量外，反

應時間(主要取決於曝氣池面積)亦為重要因素。在現行設計

下，若僅增加曝氣量，對 pH 改善效果有限，故應搭配增加曝

氣池面積，方能有效改善。

(三) Q:其他廠在不加鹼的情況下，放流水設計 pH 最高可達多少？

ANS:

放流水 pH 主要依據需求(如環保要求)加以設計，以

GE-Alstom 近期設計案例，不加鹼情況下，pH 最高為 7.2。提

升 pH 之主要方式為增加海水量。

(四) Q:林口電廠第一段曝氣池與第二段曝氣池曝氣管數量分別為

23 與 7 支，其分配設計考量為何？

ANS:

林口電廠第二段曝氣量約僅佔整體之 10%，且國外其他廠

亦均僅設置一個曝氣池(一段曝氣)，然而各國法規對海水排放

要求有所不同，台灣的環保法規相對較嚴謹，為確保符合法規

規定，故在第一段曝氣匯入部分新鮮海水(來自冷凝器)後，需

再進行第二段曝氣處理方可排放。

(五) Q:林口電廠如為因應煤質變動調整進入 Absorber 之海水量，在不更動 Absorber 內現有設備下，可以調整的範圍大約為何？另請建議較佳之設備改善方式。

ANS:

目前林口電廠 SWFGD 進入吸收塔海水流量係為定值(每個吸收塔 8,000 m³/hr，即 16,000 m³/hr，每機組)，並無調整機制。以設備正常運轉的觀點，該海水流量可以調整的幅度約可至 50%。惟實際操作仍須視煤質情況而定。

至於調整海水流量方式，最佳方式為將 SWFGD 海水供應泵改為變頻，此方式可不需更動現有海水供應泵或其他設備，僅加裝變頻設備即可。裝控制閥亦為可行方式，但將降低海水供應泵之效率。

五、心得與建議

此次有機會由林口更新計畫設計團隊 GE-Alstom 公司介紹 SWFGD，並得以和系統設計者請教及交流林口電廠實場的議題，收穫頗豐。參訓心得與建議如下：

(一)海水法排煙脫硫系統，其主要特性包括：取用海水進行脫硫，不需額外藥劑，降低營運成本。此外無副產物產生、所需淡水消耗量低（相較濕式石灰石-石膏法）的特性，既對環境

較為友善，亦不會因副產物去化問題而影響運轉。另外系統構造較它法簡單，維護需求相對較低。上述有利穩定系統運轉，在供電吃緊的現在實為重要，故 SWFGD 系統在脫硫系統的選用時有其優勢。

(二)如欲提升放流水 pH 值，以增加曝氣量方式，仍需考慮曝氣反應時間；即牽涉曝氣池尺寸等設計，較長的時間或較大的面積得到的氧化及中和反應較完整，建議未來可視排放規定研究規劃曝氣池尺寸，以儘量避免添加鹼劑之可能。

(三)目前林口電廠 SWFGD 系統已進入試運轉階段，學員藉由此次實習，可充分將試運轉過程中之經驗與疑問，充分與講師討論，既可提升對於系統的了解，亦可向設計團隊直接反映實際問題及台電關心議題，達到雙向交流的目的，對於增進後續運轉維護能力上，有相當助益。建議後續可增加海外受訓名額，以提升本公司 SWFGD 方面之能力。

(四)TOMATOH-ATSUMA 電廠 4 號機（70 萬瓩）已是運轉 22 年的機組，機組硫氧化物排放濃度限值為 20ppm，而控制室中實際觀察排放濃度在 10ppm 以下，訪其原因為電廠採用 0.3%~0.7% 低硫煤，可有效控制硫氧化物排放；另外系統 GGH 採用 Non-Leakage Type 避免煙氣換熱過程中造成的洩

漏，能更有效降低硫氧化物排放至大氣，亦可作為後續新建機組設備規劃上之參考。