

出國報告（出國類別：實習）

模中超臨界燃煤機組運轉操作及  
模擬器功能研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：簡賓谷/一般工程監

派赴國家：德國

出國期間：99年10月1日~10月10日

報告日期：99年12月06日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：模中超臨界燃煤機組運轉操作及模擬器功能研習

頁數 25 含附件：是否

出國計畫主辦機關／聯絡人／電話

台灣電力股份有限公司／陳德隆／(02)23667685

出國人員姓名／服務機關／單位／職稱／電話

簡賓谷／台灣電力公司／大林發電廠／一般工程監／07-8711151~390

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：99.10.01~99.10.10

出國地區：德國

報告日期：99.12.06

關鍵詞：亞臨界鍋爐 超臨界鍋爐

### 內容摘要：

超臨界鍋爐的貫流式的本質，導致必須對操作的穩定度和可靠度有必須遵守的限制和預防措施：

- (1). 最小飼水流量：飼水流量與負載成正比關係，但當鍋爐於起動過程中或負載低於 25% 或 30% 額定負載時，為確保鍋爐水牆管仍維持最小及平均流量需求，必須於蒸汽進入汽機前在爐體內建立足夠之飼水循環，以避免爐管過熱破損。除非鍋爐飼水流量在所需的極小值之上，鍋爐是不許允點火的。
- (2). 飼水導電度：不同於汽鼓(Drum Type)鍋爐能將懸浮固體物利用連續沖放排出，所有的硬的礦物質及其他污染物都會沉積在加熱面或過熱器的水側，沉積物會導致過熱及破管。如果爐水導電度超出  $2.0 \mu v / cm$  經過 5 分鐘或超出  $5.0 \mu v / cm$  經過二分鐘，鍋爐必須熄火停止加熱，運轉人員必須熟練水質控制設備的操作，精準的控制水質，以減少沖蝕及沈積物之傷害。
- (3). 爐管破漏：任何鍋爐都不允許在爐管破漏下運轉。在貫流式機組，爐管破漏會減少該部位及下游的爐管冷卻水流量不足，而使情況是更加嚴重。
- (4). 飼水溫度：每個飼水流量單位需要的加熱量，是決定於飼水入口溫度和受控出口蒸汽溫度之間的差。如果減少飼水溫度，而出口蒸汽溫度卻維持不變(經由二次燃燒 overfiring)，進入爐內的熱量也許會超過設計值而導致管材料的損傷。雖然機組設計上未設計停用飼水加熱器；但為了降低最終蒸汽溫度使爐內加熱率維持在設計值以內，停用一組飼水加熱器是必須的。除非提供具體信息，一般規則是飼給水溫度每減低華氏二度，蒸汽溫度必須減低華氏一度。

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

### 目錄

壹、前言 .....	4
貳、實習行程.....	4
參、實習內容 .....	5
(一)、德國西門子公司簡介.....	6
(二)、模擬器.....	8
(三)、KWS模擬器訓練中心.....	10
(四)、RWE煤超臨界機組.....	11
(五)、超臨界鍋爐原理及運轉操作.....	12
(1)、超臨界鍋爐基本原理.....	12
(2)、超臨界鍋爐爐牆管種類.....	16
(3)、超臨界鍋爐之旁通系統 .....	18
(4)、超臨界鍋爐之轉態控制 .....	20
(5)、超臨界鍋爐之系統水處理 .....	21
(6)、超臨界鍋爐之運轉限制 .....	24
肆、結語與建議 .....	25

## 壹、前言

超臨界貫流式火力發電機組將是本公司未來發電的潮流，超臨界鍋爐因異於亞臨界鍋爐之設計，其鍋爐熱循環已提升至單相循環，並無汽水鼓之設計，鍋爐蒸汽循環流程、蒸汽旁通系統及汽水分離器之設置，對機組起停及整體運轉操作、異常處理技術之實務經驗皆有必要更深入了解並汲取經驗，以因應新建超臨界機組整體運轉技術之提升。模中為本公司之模擬操作訓練單位，宜先行規劃購置超臨界機組模擬器，開發超臨界貫流式機組訓練課程，提前訓練超臨界機組運轉人員，使訓練工作及未來新建電廠試運轉工作得以順利進行。此次奉派前往德國 Mannheim 西門子公司實習超臨界燃煤機組運轉操作及模擬器功能相關技術，從 99.10/1 ~ 99.10/10 全部共十天。本廠大一~大六機汽機、鍋爐控制系統及模中模擬器均為美國或日本系統，且超臨界燃煤機組運轉操作不同於一般汽水鼓式之亞臨界鍋爐，職初接此任務時頗感生疏與不安，行前恰逢模中開授相關課程得以收集相關資料，雖樂於面對如此挑戰，囫圇吞棗之後消化不良恐在所難免，惟希望不辜負公司的栽培，及長官們之愛護推薦，仍不揣淺陋，勉力完成本報告，期能有益於本報告之讀者，並祈先進同仁不棄，多多垂教。

## 貳、實習行程

日期	行程
10.1~10.2	去程— 飛機：小港機場→香港轉機→德國 Frankfurt→德國 Mannheim
10.3~10.8	實習— 德國 西門子公司
10.9~10.10	返程— 德國 Mannheim→德國 Frankfurt→香港轉機→小港機場

## 參、實習內容

曼海姆(Mannheim)位於法蘭克福西南方 78 公里；萊茵河和內卡河之交匯處，是座地處要衝的工商業城市，也是文化教育中心。人口約 31 萬，面積與高雄市相當，世界上第 1 輛自行車及汽車均在此製造上路。

就燃煤超臨界發電領域，不管是在基礎研究，設備和材料的研發、製造還是發電廠的設計和建設等，德國在歐洲均處於絕對的龍頭地位。德國有一個很好的傳統，就是珍惜每一個新建機組的機會，不斷進行系統優化和技術創新，不斷推動技術進步，這一發展經驗很值得我們學習。德國在 1000 MW 等級的超臨界機組已經成熟（表一），以 RWE 公司為例，目前正在建設項目有 2x1000 和 6x800MW 超臨界機組。但其目的不同，前者旨在持續推進超臨界技術和單機容量的發展，建成後將是世界上單機容量最大的超臨界機組；而後者則基於現

今的技術條件，以追求最佳的技術經濟性為主要目的。

	Schwarze Pumpe	Lippendorf	Boxberge	Niederausem
容量/MW	2x885.5	2x933	1x910	1x1012
爐型/燃料	塔式/褐煤	塔式/褐煤	塔式/褐煤	塔式/褐煤
最大蒸發量/t. h	2420	2420	2422	2660
主蒸汽參數/MPa/°C	26.8/547	26.95/554	26.6/545	27.5/580
再熱蒸汽參數/MPa/°C	5.5/566	5.38/583	5.8/580	5.945/600
飼水溫度/°C	272.8	270	274	294
爐頂高度/m	161.5		158.1	167.5
汽機機型	單軸/4缸/ 4排汽	單軸/5缸/ /6排汽	單軸/5缸/ 6排汽	單軸/5缸/ /6排汽
排汽壓力/kpa	4	3.8	3.3	3.3
末段葉片長度/mm	977(38.5" )	1050(41" )	977(38.5" )	1145(45" )
商轉時間	1997/1998	1999/1999	2001	2002

表 1、德國百萬級超臨界燃煤發電機組



圖 1、西門子公司 Mannheim 辦事處

Topic	Contact
Introduction Siemens AG	K. Chr. Schulze
> KRAWAL for thermodynamic cycle design SW > TDY for thermodynamic monitoring SW > FMS for Boiler material fatigue monitoring SW > GTA for Generator Temperature Analysis SW > OGS (Operator Guidance System)	H. Naegel
Introduction T3000 (DCS)	K. Chr. Schulze
Introduction and Training at the Siemens Simulator	H. Kretschmer
Ongoing T3000 Factory Acceptance Test (Yoshinoura-Project, Fuji Electric)	H. Lachenmaier Eckhard Friedel Horst Jäckisch
Hands-On-Introduction Operator Guidance System (OGS)	H. Naegel
2x1.100 MW Lignite Supercritical, one-through Power Plant (large T3000 DCS Installation)	H. Jens Koellerer

#### (一)、德國西門子公司簡介

德國 Siemens AG 公司是研發超臨界或超超臨界技術的主要廠家之一，擁有著名的 Benson Boiler®專利權，已應用於全世界超過 1,000 座次臨界或超臨界鍋爐。該公司共有三大部門：

- ① 工業部門（工業自動化、驅動科技、樓宇科技、工業解決方案、運輸、照明（歐司朗）
- ② 能源部門（石油與天然氣、火力發電、再生能源、能源服務、輸電、配電）
- ③ 醫療部門（影像及資訊科技、醫療流程與解決方案、診斷）

工業自動化暨驅動科技（Industry Automation and Drive Technologies）：西門子提供台灣 70% 主要半導體與 TFT-LCD 廠自動化生產方案。其事業部涵蓋了製造產業自動化、製程自動化、機械製造業、機電設備四個主要領域。

樓宇科技（Building Technologies）：提供最佳節能效果的樓宇自動化及空調、預警與保護的火警偵測、滅火、疏散、門禁控制、影像監視等專業技術

工業解決方案（Industry Solutions）：提供基礎建設與產業設備所需之解決方案

運輸（Mobility）：業務範圍遍佈各種捷運、區域鐵路、長途幹線，以至於高速鐵路系統，有關自動化及供電、車輛、統包工程以及整合技術。

火力發電、再生能源、石化工業應用與能源服務（Fossil Power Generation / Renewable Energy / Oil & Gas / Energy Service）：涵蓋蒸氣渦輪發電機、燃氣渦輪發電機、複循環發電機、工業用蒸氣、燃氣渦輪機及空壓機、儀電控制系統及設備。

輸電與配電 (Power Transmission and Power Distribution) : 整合了輸電以及配電資源, 包括高/中/低壓配備, 裝置, 零件, 開關, 配件, 變壓器, 變電站機制防禦控制系統, 發電站控制系統, 配電電訊系統以及儀表設備。

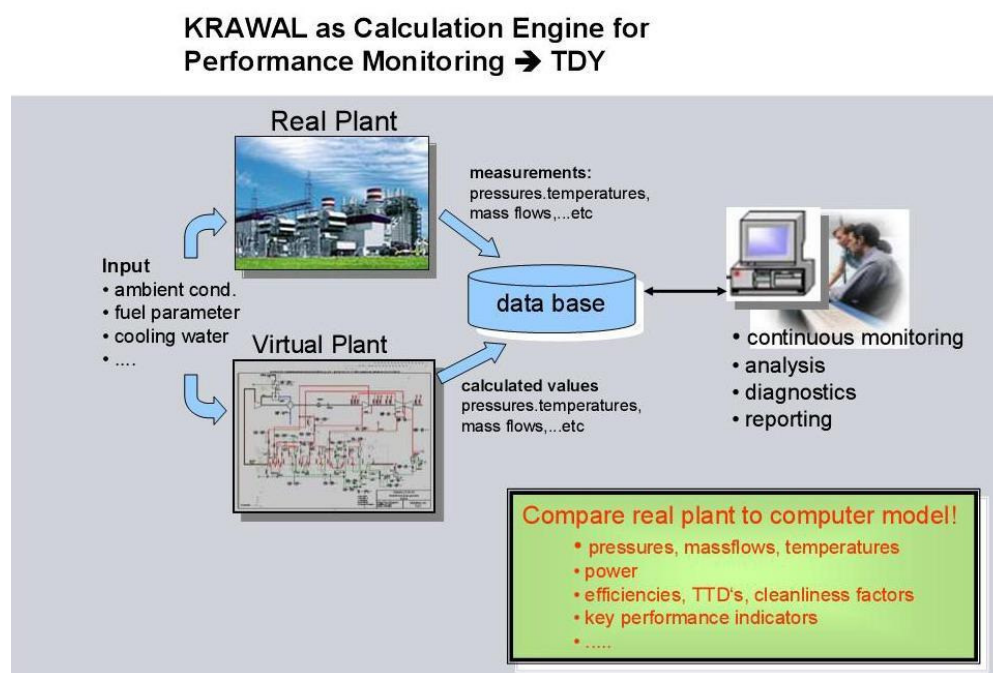
醫療 [Healthcare] : 提供多樣化的系列影像系統, 包括最先進的磁共振造影設備、電腦斷層掃描儀、心血管造影系統、正子斷層掃描儀、閃爍造影機、超音波設備等。

台電公司發電機組很多均由西門子供應, 南部複循環發電機組共有 29 部, 其中興達電廠一對三有 5 部(含 ST 機組 1 部、GT 機組 3 部, 共 20 部), 南部電廠一對二有 3 部(含 ST 機組 1 部、GT 機組 2 部, 共 9 部)、核一電廠、核二電廠等。此次行程係由能源部門 Mr. Schulze 安排, 其表示為降低運轉及維修成本、避免人為操作錯誤, 德國電廠都已採單一整合式之控制系統配合即時監測與診斷系統來提高電廠可靠度及效率。

### □SIEMENS AG 即時監測、診斷與控制系統

KRAWAL (Thermodynamic Cycle Design SW) : 電廠熱力循環設計開發軟體, 用以評估及監視電廠熱效率, 並將所有機組運轉參數建立儲存整合至其他診斷系統運用。

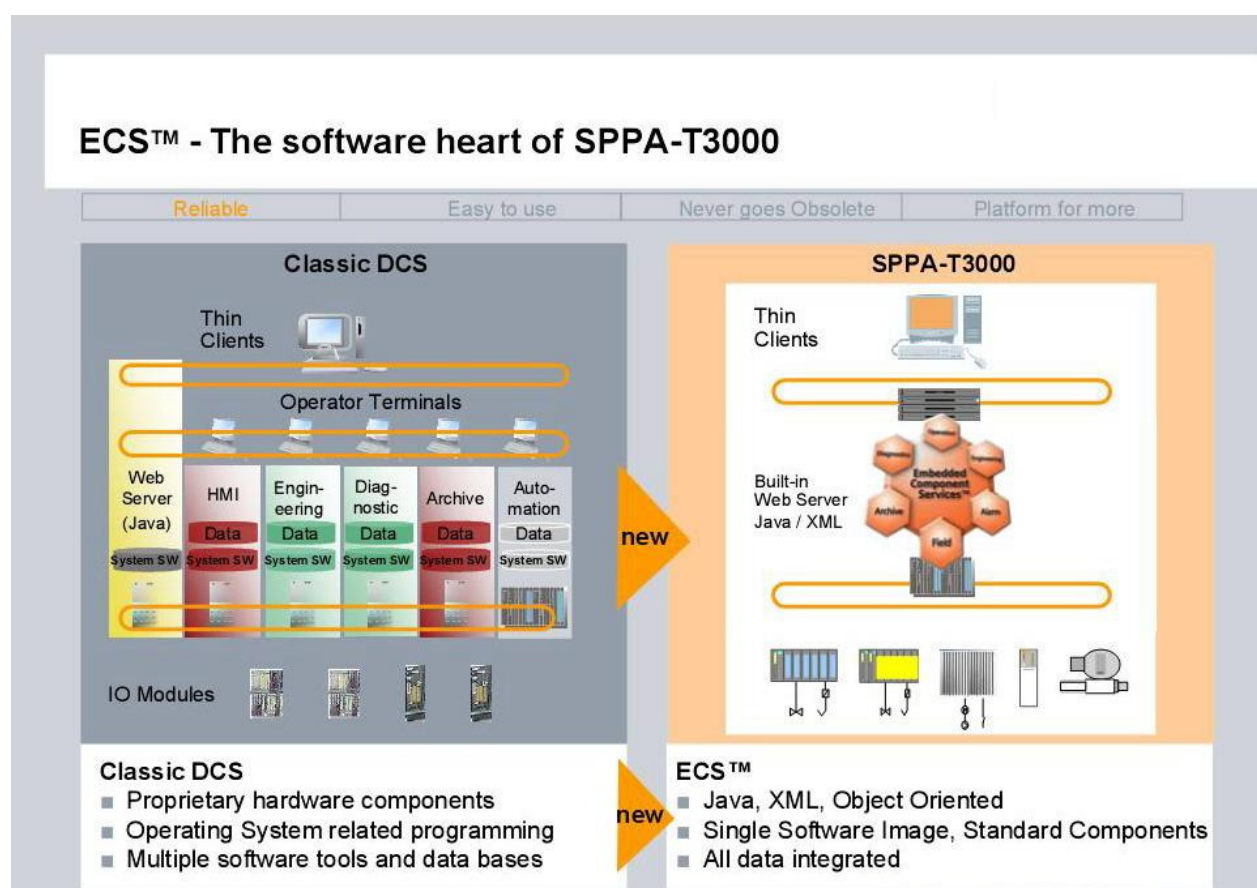
TDY (Thermodynamic Monitoring SW) : 監測整個機組熱力平衡系統, 當運轉條件與預存的期望值偏差過大時提出診斷報告, 以運轉人員採取適當處置, 減少設備損害及提高可機組用度。



FMS(Boiler Fatigue Monitoring System-)鍋爐疲勞監測系統: 機組運轉方式的改變會引起鍋爐材料疲勞使其壽命降低, 例如快速升降載、起動、停機及超溫運轉, 主要分為潛變 (creep fatigue) 及低週期性疲勞 (low-cycle fatigue) 2 種型式。該系統可提供正確資訊而獲得最佳運轉模式、降低營運成本、了解不同的運轉模式對機組壽命的影響、選擇最佳時機進行大修檢查、提高電廠安全及可靠度。

GTA(Generator Temperature Analysis)發電機溫度監測系統：監測定子溫度、定子電流、虛功率、發電機電壓、定子冷卻水進出口溫度、定子冷卻水差壓、冷氫\熱氫溫度等運轉參數來分析診斷發電機運轉情況。

傳統分散式控制系統 (DCS) 針對不同的應用程式使用不同的子系統(subsystems)，如 HMI 人機介面、工程維修，診斷，歸檔，報警和現場設備，其更新和維護均使用不同軟體，以大六機為例，鍋爐、汽機、DCDAS 便分屬不同控制系統。西門子公司 SPPA - T3000 最大特色為整合所有控制系統(鍋爐, 汽機, 發電機...)利用嵌入式組件服務™技術、結合 XML, Java 及物件導向設計，單一化界面減少了許多控制元件及系統間整合問題，風險因而降低。所有電廠數據可從廠內或外部的任何 PC 機上通過以太網連接（如果允許）直接聯接到整個系統一目了然，不僅讓操作員以靈活方式運轉電廠外，更減少維護與更新成本。



## (二)、模擬器

模擬器訓練旨在提供電廠運轉及維護人員對系統整體連貫性之觀念及事故之判斷處理，進而防範事故、降低跳機次數、減少公司損失，順利供電及確保人員、設備安全之目的；又可推演探討機組改善效率及提供各廠設備改善之參攷…等等。

模擬器的類型分為 Simulator、Emulator、Stimulator，各有不同的優缺點及特性。從經濟的觀點 Emulator 最具優勢，Simulator 及 Stimulator 分別次之。從訓練對象的著眼點



來看，如果著重的是運轉人員的模擬操作，則建議最好採用 Simulator 或 Emulator；如果要兼顧儀資人員的維護訓練，則 Stimulator 亦可列入考量。

Simulator 完全採用與 DCDAS 相同設備；Emulator 完全不採用 DCDAS 設備，以仿效建立操作與運算畫面，在 PC 上執行；Stimulator 為實際與虛擬共存模擬器。

此次研習西門子公司共介紹 3 套模擬器，其特色為：

1. 藉由及早發現應用程式的缺失可以得以高品質的程序控制軟體件
2. 藉由縮短試運轉時間以加速商轉時程
3. 保護設備和用模擬器做無風險之最佳化測試
4. 快速訓練運轉人員
5. 因為優質訓練的運轉人員而提高電廠可用度。

TBS (Testbed Simulator)：此模擬器主要作為控制邏輯/連結/人機介面、與分散式控制資訊系統設備可行性評估用，以便儘早發現並解決問題，避免因發生品質瑕疵問題致影響建廠工程進度。經由硬體迴路模擬(hardware-in-the-loop)系統，可快速完成系統功能的測試評估。

OGS (Operator Guidance Simulator)：該模擬器電廠運轉人員可在試運轉前或試運轉階段做功能性訓練，利用該簡易型模擬器熟悉新機組的人機界面控制系統及操作程序演練。

OTS( Operator Training Simulator)：該模擬器為全域式(Full Scope)模擬器，除了可提供正常起動停機操作訓練外，亦可根據電廠實際情況，模擬事故發生狀態，電廠全停電、Generator Motoring(發電機做馬達運轉)、DC Failure (直流電源消失)、或大型輔機跳脫，啟動自動減載裝置(LDC Runback) 跳脫預選粉煤機、定子冷卻水消失 Rapid Unload ON(快速卸載)等重大事故模擬 Malfunction (模擬事故)。

	<i>OGS</i>	<i>OTS</i>
模型準確度 (Modelling accuracy)	75%~90% for main functions (steady state)	90~98%
訓練目標	訓練操作員熟悉自己電廠的 1. 控制系統 2. 控制原理 3. 主要性能	1. 能更深入學習電廠運轉性能， 2. 推演運轉策略 3. 針對重要事件可使用模擬事故 (malfunctions)/編劇 (Scenarios)來訓練操作員
講師站	負載模型, 起動, 停機, 暫停, 併聯, 快照, 回溯.	快速、慢速、編劇 (Scenarios)、 歸檔 (Archiving)、趨勢分析 (Trending)、重播 (Replay)
價格	550, 000~800, 000 歐元	800, 000~1, 300, 000 歐元

表二 西門子模擬器功能及價格

### (三)、RWE 模擬器訓練中心

RWE 訓練中心為德國境內專業訓練機構，除負責德國所有核能、火力發電廠運轉及維護人員訓練外，也為比利時、義大利、荷蘭、挪威、奧地利等國家電力公司提供代訓服務，員工編制 150 人。主要業務為①理論課程訓練②模擬器實務操作訓練③人力資源發展④諮詢服務。有各式燒油、燒天然氣、燒碳（褐煤、硬煤）之自然循環式及貫流式模擬器（300MW/600MW/800MW/1100MW）。此該中心模擬設備大多由西門子公司負責建置。

KWS 對電力公司人員訓練方面依其工作性質提供不同課程：

1. 一般操作人員接受為期 4 週的基礎及專業課程，內容包含熱力學、鍋爐、汽輪機、發電機、環化、自動控制等課程，結訓後須通過 VGB 測試委員會考試(筆試及口試)取得證照。
2. 機電維護工程師接受為期 15-18 個月訓練，通過德國工商會 (CCI) 考試後取得證照。
3. 電廠運轉人員須接受為期 3 年訓練，內容為 2 年電廠實習操作、16 週的訓練中心專業訓練及 1 年線上訓練，最後通過德國工商會 (CCI) 筆試及術科鑑定取得證照。



圖 2、模擬器訓練教室

#### (四)、RWE 煤超臨界機組

RWE 電力是德國最大、歐洲第 3 的電力公司，發電量佔全國 30%。此次參訪的電廠位於 Neurath 地區，裝置容量為興建中的 2 部 1100MW 之燃煤超臨界機組，鍋爐型式：塔式/一次再熱/螺旋水牆管/褐煤，汽機型式：單軸/雙背壓/四缸四排汽，低壓末段葉片 1400mm，總投資 22 億歐元。雖然使用的煤質等級極低，低熱值 (2,100kcal/kg)、高灰份、高水份 (56%)、低灰熔點及易結渣，但電廠採用最佳化電廠技術 Optimized plant technology(BoA)建造，此技術利用高科技材料和計算機模擬渦輪葉片，例如通過回收餘熱，減少輔助電源的需求，可提高效率近三分之一，效率可達 43% 以上。德國擁有極為豐富之褐煤蘊藏量，電廠因礦設廠的例子十分普遍，因燃用褐煤之故，鍋爐截面為 26 公尺x26 公尺、爐頂高達 170 公尺，與本公司燃用煙煤之鍋爐高度 50-60 公尺差異極大，預計 2010 年底商轉。機組控制系統由西門子公司負責為新一代 SPPA-T3000 控制系統。

RWE 公司對降低二氧化碳三個發展方針：

1. 提高電廠效率。
2. 發展更佳的電廠用煤技術【so-called fluidized-bed drying technique with internal waste heat utilization (WTA)，可節省 20 至 30% 的燃料】。
3. 建造世界首座 450MW 低排放的褐煤電廠：利用整體煤氣化(IGCC)，CO<sub>2</sub> 捕獲和儲存 (CCS) 及改進現有的二氧化碳捕獲技術。

Technical data per unit		Nennbetrieb	max. Auslegung
Furnace capacity	MW	2,392	2,800
Raw lignite input (guarantee lignite)	t/h	820	1,326
Gross capacity	MW	1,100	1,122
Net efficiency	%	>43	>43
Steam output	t/h	2,870	2,960
Main-steam pressure/temperature*	Bar/degrees	272/600	280.4/600
Hot reheat pressure/temperature*	Bar/degrees	55.5/605	56.7/605
Condenser pressure	mbar	48	48
Feed heater	Stages	9	9
Feedwater inlet temperature	Degrees	292	294
Flue-gas waste heat utilization	Degrees	350/160/125	350/160/125

表 3、BoA2&3 電廠超臨界 1100MW 機組規格



圖 3、BoA2&3 電廠超臨界機組

## (五)、超臨界鍋爐原理及運轉操作

### 1. 超臨界機組基本原理

傳統亞臨界汽水鼓鍋爐(Subcritical Drum Type Boiler)運轉於臨界點之下，在汽水鼓中同時存在定量之液相及汽相，且液相密度大於汽相密度，液相於此定壓下汽化時，雖然對其進行加熱，但液相的溫度並不升高，除非增加其壓力，否則液相和汽相始終保持相應於液面壓力下之飽和溫度。當系統壓力增加到達22.064MPa (3,200psia)，及溫度達到373.99°C時，液汽兩相密度趨於相同之0.32195g/cm<sup>3</sup>，兩相合併為一均勻相，不再具有液汽二相共存之情況，飽和水和飽和蒸汽之間的差異已完全消失，此一特定點即定義為水之臨界點，所對應的溫度及壓力則分別定義為臨界溫度及臨界壓力。在汽水平衡圖中工作流體的壓力溫度超過臨界點(Critical point)時，已無汽水兩相區分別謂之超臨界，汽力機組工作流體即肯循環(Rankine cycle)中有部份的壓力溫度在臨界點以上者，即稱為超臨界壓力機組(Supercritical Unit)，在臨界點以下者則稱為亞臨界壓力機組(Subcritical Unit)，鍋爐若以操作

壓力來分類可分為低壓鍋爐、中壓鍋爐、高壓鍋爐、超高壓鍋爐、亞臨界壓力鍋爐、超臨界壓力鍋爐及超超臨界壓力鍋爐 (ultra supercritical)，而其相對應的壓力範圍如表四所示。超臨界壓力鍋爐之設計架構均採用貫流 (Once-Through) 方式，即以水牆管作為為汽化器，其加熱、蒸發及過熱過程皆在單一管子內完成，進行單相相變化，所以不需裝設汽水鼓，另改以數個較小之汽水分離器取代，可將蒸汽中微量的水分加以分離排放。

名稱	壓力範圍 (MPa)	名稱	壓力範圍 (MPa)
低壓鍋爐	< 2.5	亞臨界壓力鍋爐	16.0 ~ 20.0
中壓鍋爐	3.0 ~ 5.0	超臨界壓力鍋爐	22.5 ~ 28.0
高壓鍋爐	8.0 ~ 11.0	超超臨界壓力鍋	> 28.0
超高壓鍋爐	12.0 ~ 15.0		

表 4、鍋爐對應的壓力範圍

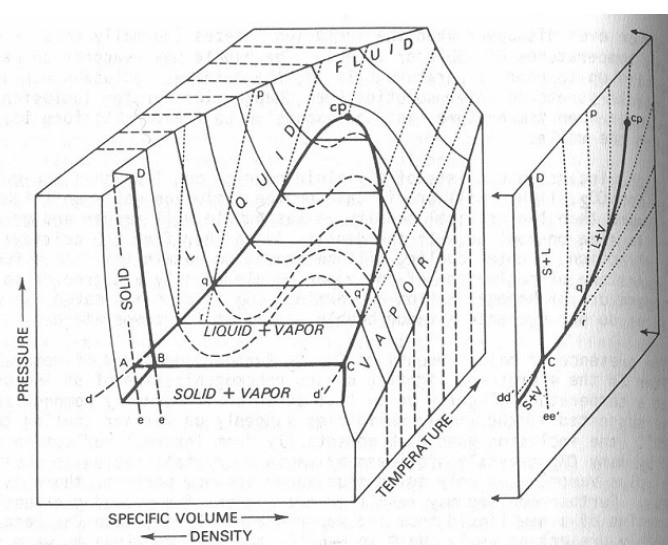


圖 4、汽水平衡圖

提高郎肯循環效率之方法就是增加可用能及減少廢熱能排放：

1. 增加主蒸汽、再熱蒸汽溫度及主蒸汽壓力，甚至包括超臨界蒸汽條件，可用能增加，效率愈好。
2. 再熱級數愈高，可用能增加，效率愈好。
3. 冷凝器背壓降低，廢熱減少，效率愈好。
4. 抽汽級數愈高、飼水溫度愈高，效率愈好，但出力減少。

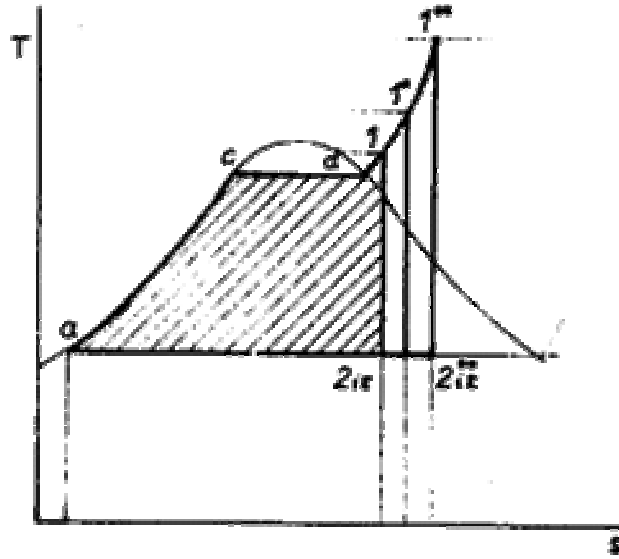


圖 5、過熱蒸汽溫度愈高，可用能愈多，效率愈好

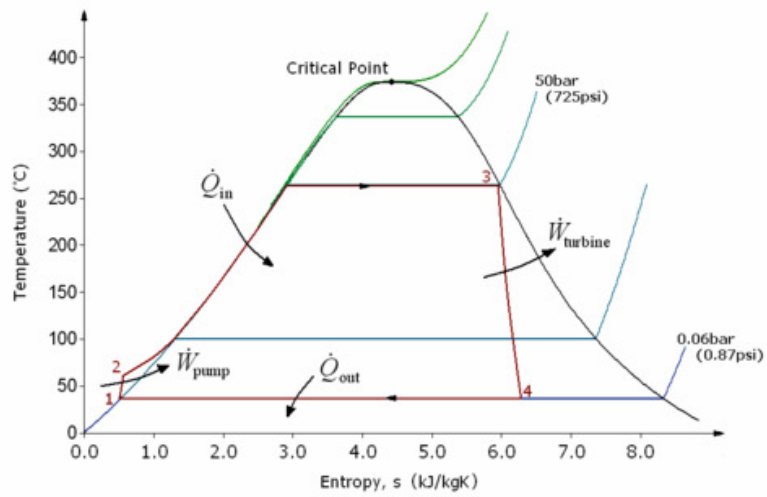


圖 6、蒸汽壓力愈高、冷凝器背壓低，可用能愈多，效率愈好

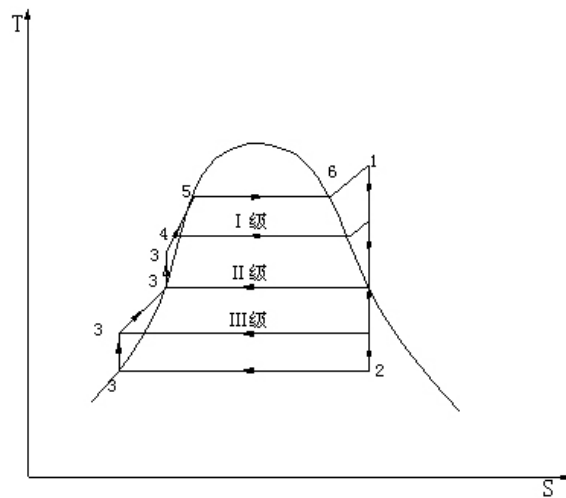


圖 7、抽汽級數愈高、飼水溫度愈高，效率愈好，但出力減少。

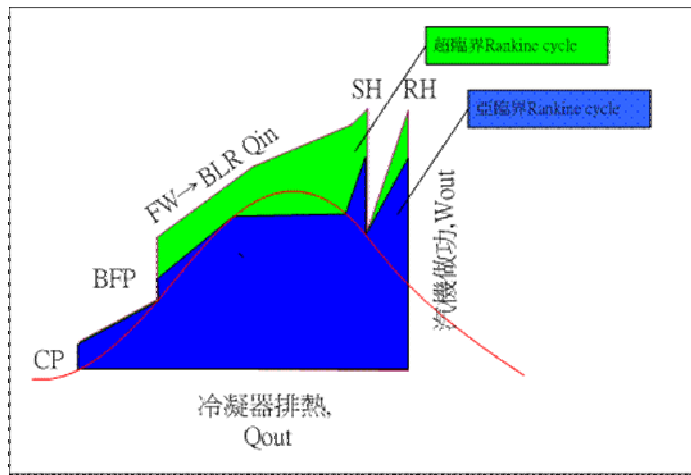


圖 8、亞臨界汽水循環及超臨界汽水循環

使用二次再熱系統雖然可獲得機組若干熱耗率之改善，但此將增加機組結構的複雜度，且系統之控制方式將更為複雜，機組運轉之穩定性亦相對降低，初期投資及日後維護費用增加，抵銷了熱耗率改善之效益，故各國超臨界機組採用二次再熱循環系統者並不多見。

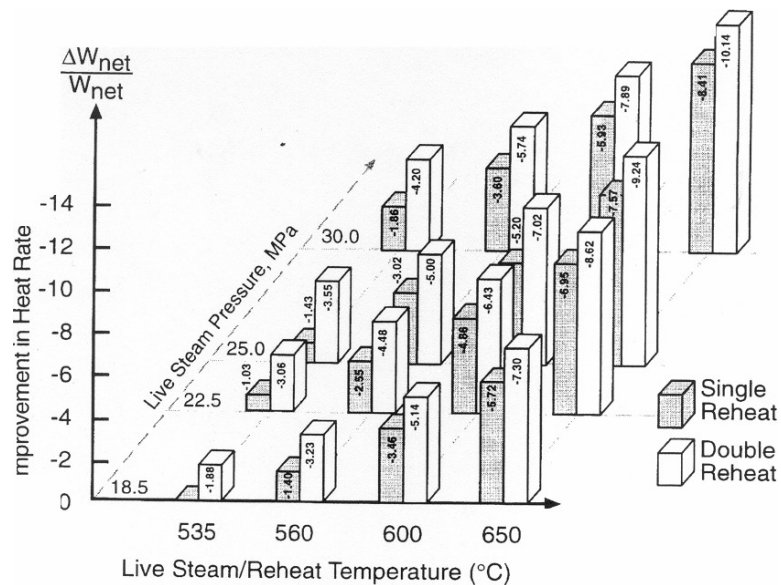


圖 9、再熱級數對熱耗率之比較(EPRI)

註：以亞臨界機組 535°C/18.5 Mpa ( 1000°F/2400 psi)為比較基準

因此，為能大幅改善汽力機組效率，以增加壓力及溫度較為直接有效；超臨界汽水循環之壓力溫度均高於亞臨界汽水循環，增加了可用能，在相同冷凝器排汽壓力條件(即廢熱能量排放相當)時，可以獲得有很高的能量轉換效率，故超臨界機組成為應用科技發展的重心之一。

## Steam condition vs. Plant Efficiency

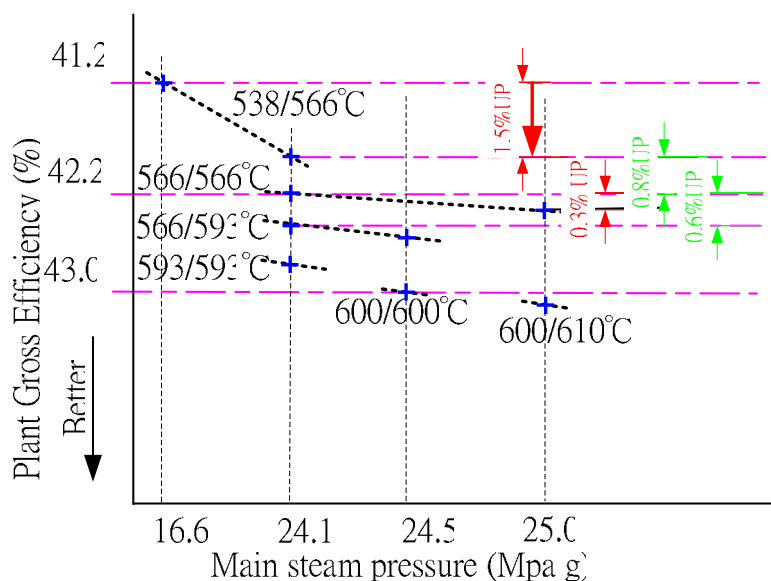


圖 10、各種蒸汽壓力溫度條件之郎肯循環可達到之機組效率

## Thermal efficiency & Steam condition

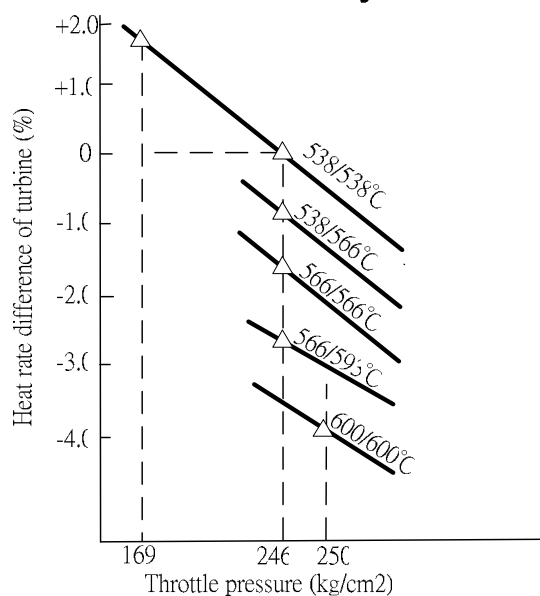


圖 11、蒸汽條件與汽輪機熱耗率相對關係圖

## 2. 超臨界鍋爐爐牆管種類

在次臨界環境下，水牆管的吸熱經由蒸發-沸騰的過程，促使飽和水轉換為飽和水蒸汽的雙相共存於水牆管，由於密度的差異而產生液-汽相的分離，由於流體溫度固定於飽和溫度值，因此水牆管金屬溫度對不同高程之熱通量(heat flux)變化僅略有不同；然而當鍋爐壓



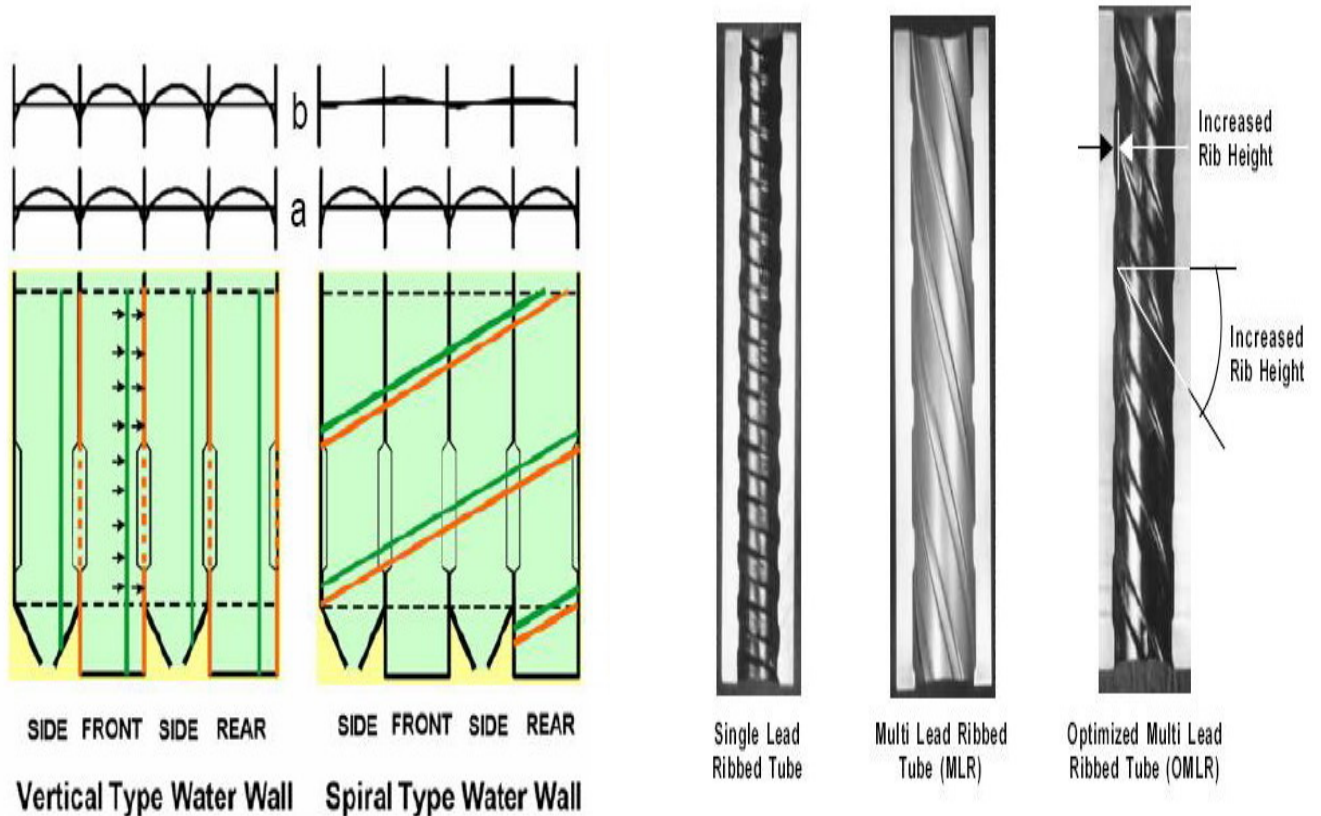
力達臨界壓力以上時之超臨界狀態，液-汽相並無密度差異而視為為單一相的流體於水牆管內，水牆管流體不再是單一溫度，而有低溫流體、高溫流體於不同高層水牆管內，因此水牆管金屬溫度更高於次臨界狀態，由於沒有蒸發過程，具有縮短起動時間，以及高升/降載速率的優點，但也有各水牆管出口溫度不易均一、金屬溫度偏高等 2 項主要缺點。

(一) 針對出口溫度不易均一的缺點，水牆管採 spiral-wound 排列的設計，意指每支水牆管均設計環繞鍋爐四周而受熱均勻，不同於次臨界水牆管採垂直(vertical)排列設計而受熱不均，圖 12；然而 spiral-wound 的設計亦會造成爐膛支撐(support)的困難及安裝不易，目前最通用的設計是結合 spiral-wound 與 vertical 的設計，鍋爐 Arch tube 以下採用 spiral-wound 的設計，以上則採用 vertical 設計的水牆管。但是採用部份垂直管設計仍有溫度不易均一的問題，因此水牆管出口處必須裝有密集分佈的熱電偶監視其出口溫度值，並採取適當措施防止發生水牆管過熱情形。

(二) 針對金屬溫度偏高的缺點，必須以提高管內液體的通量(mass flux, kg/m<sup>2</sup>s)或流量(mass flow)，來抑低水牆管金屬的溫度值。這對於 spiral-wound 排列型式的爐管設計而言較為有利，因為其垂直面的投影面積大於 vertical 排列的爐管，因此 spiral-wound 排列的爐管本身即具有較高的流量、較低的金屬溫度之優勢，相當適合超臨界或超超臨界鍋爐水牆管的設計。但是依前段敘述 spiral-wound 的設計並不利於鍋爐的支撐，以及支撐位置爐管銲道常有熱疲勞破管的問題，因此在 Arch tube 以上高程改採 Vertical 排列的爐管設計，有利於改善爐膛支撐的問題。

但是 Vertical tube 有流量不足的缺點，易造成金屬溫度偏高的問題，因此必須提高流體通量來降低金屬溫度，但是過高的質量通量將會增加廠內用電，以及改變流體特性的缺點。因此若要改善 vertical tube 本質上的缺點，因此研發水牆管內壁來福線(rifled)的設計型式來解決 vertical tube 的缺點，圖 13。然而在最佳化的來福線幾何形狀的環境下，更可以降低爐管流體質量通量，而不會顯著增加水牆管金屬溫度，以及控制水牆管出口溫度保持均一的優點，這也是目前 Siemens 公司針對 Benson Boiler 主要的低質量通量 (Low mass flux)設計之最佳化來福線爐管的研究項目，茲簡述如后。

來福線的設計對爐管質量通量、差壓、金屬溫度的影響極大，最佳化的來福線設計可以有效降低管內流體的質量通量，以及維持較低的爐管最大金屬溫度值(420°C)。此外，在鍋爐每支水牆管進出口差壓恆定的現況下，採用低於 1,050kg/cm<sup>2</sup>s 之低質量通量設計時，流量將隨著水牆管受熱增加而增加(自然循環爐水特性)，因此水牆管出口溫度可以保持均一的優點。反之，若採用高於 1,050kg/cm<sup>2</sup>s 之高質量通量設計時，流量隨著水牆管受熱增加而減少(貫流式爐水特性)，會造成金屬溫度異常增加及無法保持均一的缺點。簡而言之，超臨界貫流式流體的特性是高質量通量，與次臨界流體特性低質量通量不同，此時流量隨著水牆管受熱增加而減少；若設計將流體流量降為次臨界自然循環特性時，當水牆管持續受熱時，流量會自動增加，如此可以有效防止水牆管的金屬溫度超限，以及保持每支水牆管出口溫度均一的優點。



a = Heat Flux, b = Water Wall Outlet Fluid Temp.

圖 12、垂直及螺旋水牆管流體溫度圖

圖 13、水牆管內壁來福線的型式

### 3. 超臨界鍋爐旁通系統

早期設計的旁通系統問題出現在管閥元件沖蝕、洩漏、控制系統複雜等的問題，目前各方面關鍵的可靠度問題已大有改善；進步的廠控制器皆設計有內含熱應力監測、起動升降載的汽機旁通系統的全自動控制功能，使蒸汽及汽機金屬的溫度能相互配合，減少固體沖蝕。旁路系統主要之功能在於保護設備及改善機組低負載或起動時之負載提升速度；而依其系統設置之目的可分為鍋爐旁路系統及汽輪機旁路系統。

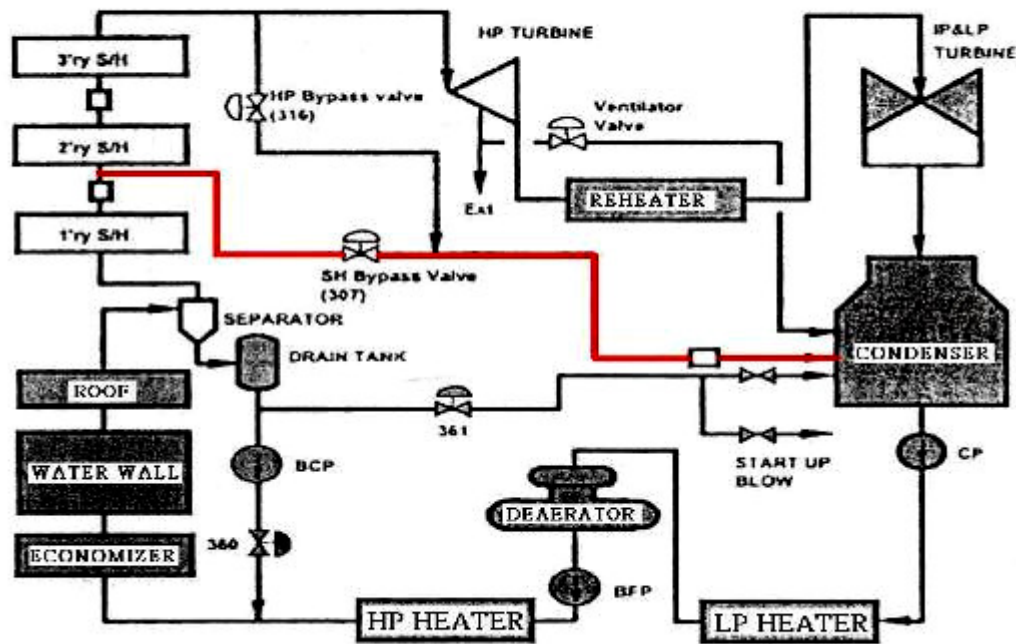
以貫流式鍋爐旁路系統而言，其旁路系統之設計須配合鍋爐運轉特性需求，依不同的鍋爐製造廠家而有不同的設計。鍋爐旁路系統主要之功能為：

- (1) 在起動或低負載運轉時，維持適當之最小流量，以避免水牆管過熱。
- (2) 於機組起動時洩放過高壓力，以利提昇蒸汽溫度，縮短起機時間。
- (3) 於機組起動或低載運轉時，回收部分熱能。
- (4) 於機組起動時避免第二級過熱器因水進入，造成損害。

(5)於機組突然故障跳機時，可以降低水汽系統的壓力。

不同的鍋爐製造廠家採用不同型式的旁路系統，由鍋爐水牆管出來之水汽混合流體，經由水汽分離器(Separator)進行水汽分離後，蒸汽導入過熱器，飼水則排回冷凝器或除氧器，或是部分經由爐水循環泵送回飼水系統。圖 14 為鍋爐旁路系統之示意圖。

### Standard System (Boiler Startup Bypass)



鍋爐旁路系統(以日本 BHK 公司之系統為例)

圖 14、鍋爐旁路系統

汽輪機旁路系統包括高壓旁路系統與低壓旁路系統，其主要作用為改善機組起動和增載的特性，效用如下：

- (1) 若機組需擔負週期運轉之責任，由於起停次數頻繁，設置汽輪機旁路系統可提高機組起動與提升負載之速度。
- (2) 使用汽輪機旁路系統可以提高鍋爐燃燒效率與流量，將鍋爐出口的蒸汽溫度迅速提升至與汽輪機金屬溫度相匹配之程度。
- (3) 高壓汽輪機未運轉時，利用高壓旁路系統，將蒸汽導入再熱器，可使再熱器蒸汽溫度容易控制，避免再熱器管過熱受損。
- (4) 由於中壓汽輪機所需之操作壓力及溫度較低，可直接利用中壓汽輪機起動併聯運轉，不僅可縮短機組自起動至與系統併聯之時間，亦可因蒸汽流量增加，提高鍋爐燃燒效率及主蒸汽溫度上升速度。部分歐洲廠商如 Alstom 等即為此種設計。

(5) 另在汽輪機突然跳機之情況下，可利用此一旁路系統維持鍋爐的正常運轉；俟汽輪機於短時間回復正常運轉時，鍋爐可立即供給蒸汽，迅速恢復與系統併聯，避免汽輪機跳機後，鍋爐必須跟隨停機再重新起動，費時費力，影響系統供電。但此一設計方式將大幅增加初期投資成本及運轉維護費用，包括管路系統及其配件、冷凝器之設計容量加大以及控制系統之配合等。汽輪機旁路系統如下圖所示。

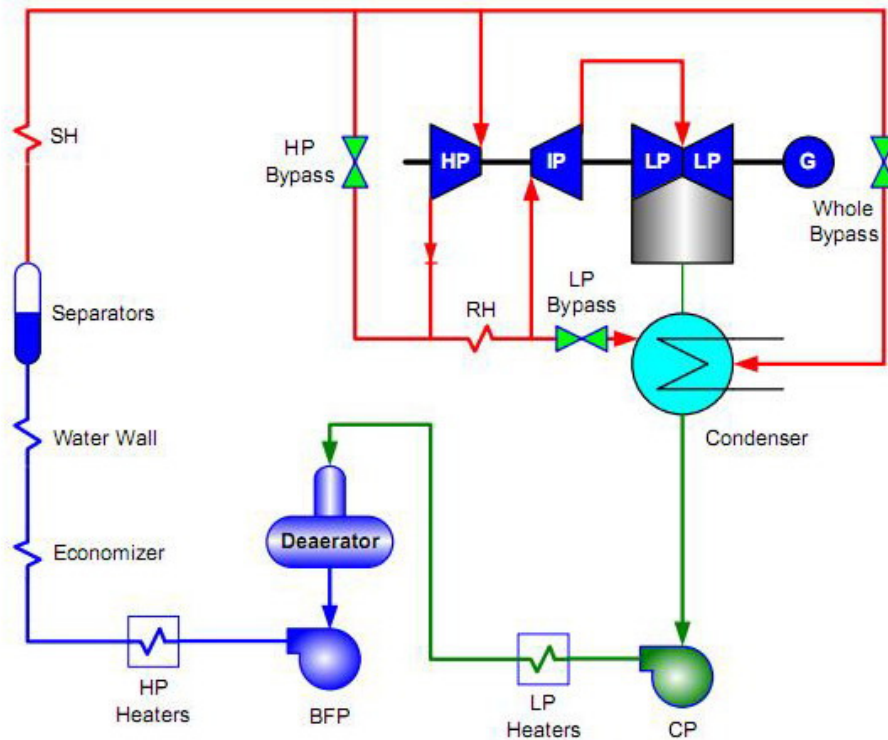


圖 15、汽輪機旁路系統

#### 4. 超臨界鍋爐之轉態與控制

超臨界鍋爐起動初期爐水的循環大致有三種模式：

第一種由 separator storage tank 直接洩入冷凝器，經海水冷卻後再經由 Condensate Pump 經低壓 Heater 至除氧器，再由 BFP 餉水經高壓 Heater 至 ECO，再經 water wall，separator 至 storage tank 完成循環，國內麥察超臨界電廠即如此設計，如此將造成能量的損失。

第二種由 separator storage tank 直接洩入 deaerator，由 BFP 餉水經高壓 Heater 至 ECO，再經 water wall，separator 至 storage tank 完成循環。

第三種由 separator storage tank 經 BCP 再經高壓 Heater 打至 ECO 入口，再經 water wall，separator 至 storage tank 完成循環，不足的水再由 BFP 飼水補充。後兩種循環可節省能源。

鍋爐補水完成後即開始鍋爐水循環，並維持一最小流量（25%或 30%MCR），鍋爐點火後，隨著燃料及加熱時間的增加，蒸汽量越多，循環水越少，不足的水再由 BFP 飼水補充維持最小流量，此時濕態因水循環流量固定，由燃料量決定主蒸汽壓力，噴水來控制主蒸汽溫度。若燃料及加熱時間繼續增加，待負載達 25%MCR 時，全部循環水幾乎都變成水蒸汽，此時鍋爐水循環系統停用，暖機閥開啟。此時為乾態，其飼水量決定主蒸汽壓力，水燃比 FR/FW 控制主蒸汽溫度。下圖為貫流式鍋爐流量與負載關係圖。

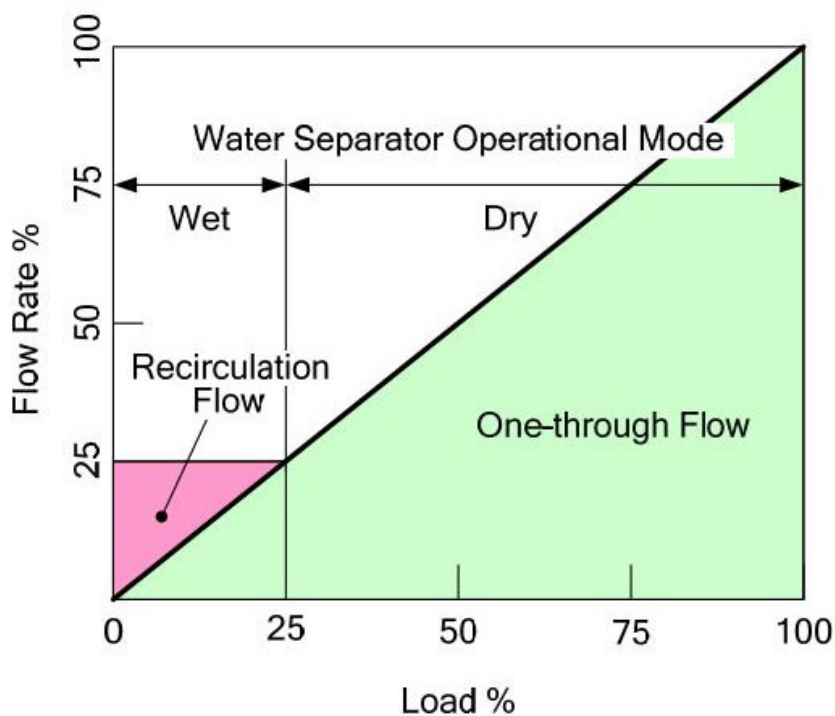


圖 16 貫流式鍋爐流量與負載關係圖。

### 5. 超臨界鍋爐系統水加氧處理

傳統機組系統水大都使用  $N_2H_4$  除氧之處理法，將水中溶氧降低，使爐管材質之高溫氧化反應降低。但在這種完全除氧的環境中，對水流速度較快的機組，例如超臨界貫流式機組，水流相當有機會侵蝕碳鋼材質的管壁，特別是在彎管或是有局部擾流的部分，發生所謂的流體輔助腐蝕 (flow assisted corrosion, FAC)。如果在系統水有些許溶氧存在的話，則上述這種效應即可能減少，因為如果溶氧量控制得宜則會在管壁處產生一層其保護性氧化層，避免管材進一步的腐蝕，就是所謂加氧的系統水控制方法 (Oxidant Treatment, OT)。

依據研究顯示當溶氧濃度介於 150 至 200ppb 時，碳鋼的腐蝕率最低。此種水處理方法的原理為在有稍許溶氧存在的狀況下，管壁的氧化層可形成更緻密的質地，因較為穩定而釋放較少的溶解性鐵成分至系統水中。氧化物結構示意圖如圖 17 所示，顆粒較小的 FeOOH 會將 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 週邊的小孔洞給塞住，如此即可減少氧氣進到管材表面的機會，而由 FeOOH 所構成的表面對於流動的水流也有著較低的溶解度，故形成更為穩定的材質，而減低金屬釋出的可能性。

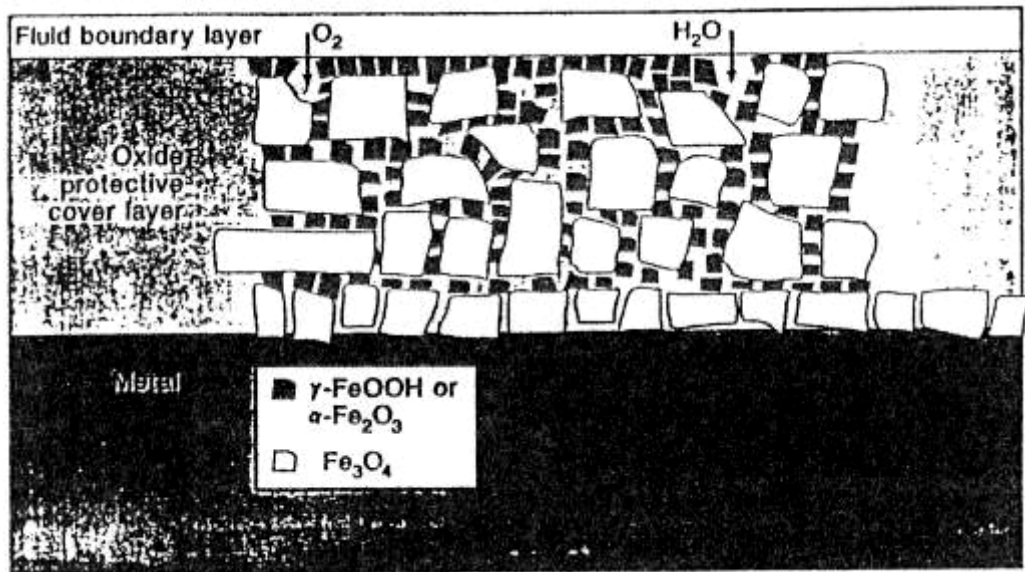


圖 17、使用加氧處理時在飼水表面的氧化物結構圖

但超臨界機組一般則使用綜合性水處理法 ( Combined Water Treatment, CWT )。即在系統水中氧的注入量約以保持 50 至 150 ppb 的氧殘存量。另外加入氨以提高系統水的 pH 至 8.0~8.5；經驗上約需加 20 至 70ppb 的氨量以達到這個要求的 pH 值。

比較加氧處理技術(The Combined Water Treatment, CWT)與傳統全揮發處理(The All Volatile Treatment , AVT)，如圖 18 所示系統水中總鐵離子濃度皆有明顯減少的趨勢，對汽機元件而言 CWT 具有降低沈積物之優點，如圖 19。

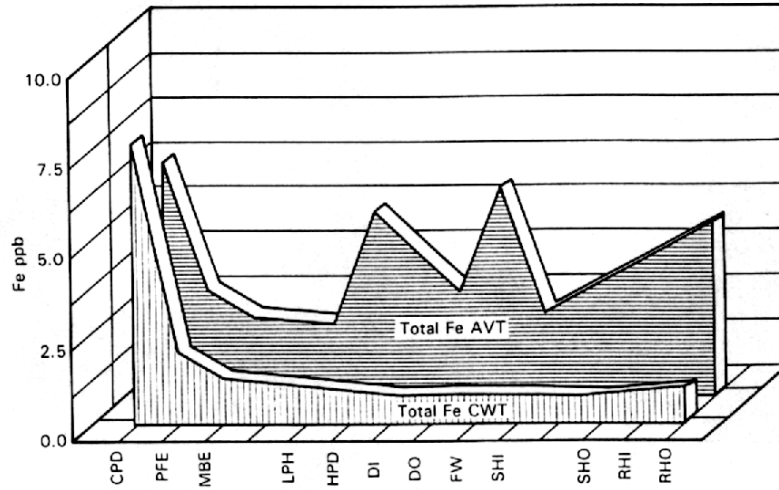


圖 18、系統水中總鐵離子濃度的比較

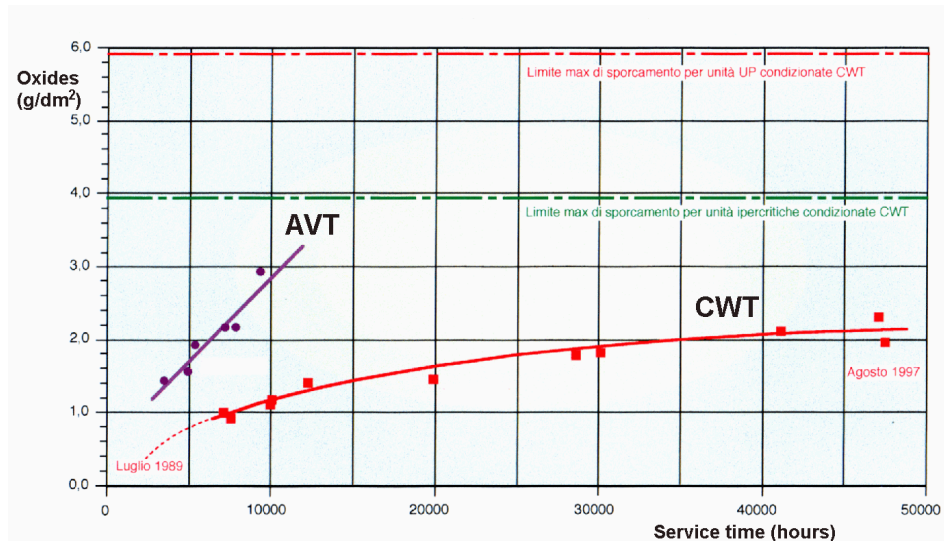


圖 19、氧化沈積物成長速率比較

使用加氧處理時，對水質的要求較高，不是一開始就使用加氧處理，而是待水質符合條件才開始使用，如表 5。通常飼水陽離子導電率要  $<0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，因而再運轉過程中得強制要求使用淨水器，而且需熱交換器部分能有效的去除不凝結氣體及高壓飼水加熱器不能有銅材質以防止腐蝕等種種條件。

程序	對策	備註
起動	淨化器運轉 停止加氧 除氧器逸氣閥開大、除氧 注 NH <sub>3</sub> 、pH 依 AVT 目標值	陽離子導電率 > 0.2μs/cm
正常運轉	淨化器繼續運轉 除氧器逸氣閥關閉、加氧 注 NH <sub>3</sub> 、pH 依 OT 目標值 淨化器繼續運轉	陽離子導電率 < 0.2μs/cm
停機	停機前一小時或負載低於設定值時停止加氧 開除氧器逸氣閥 注 NH <sub>3</sub> 量、pH 依 AVT 目標值 停機 淨化器停止運轉	

表 5、停機起動水處理程序

#### 6. 超臨界鍋爐之運轉限制：

超臨界鍋爐的貫流式的本質，導致必須對操作的穩定度和可靠度有必須遵守的限制和預防措施：

- (1). 最小飼水流量：飼水流量與負載成正比關係，但當鍋爐於起動過程中或負載低於 25% 或 30% 額定負載時，為確保鍋爐水牆管仍維持最小及平均流量需求，必須於蒸汽進入汽機前在爐體內建立足夠之飼水循環，以避免爐管過熱破損。除非鍋爐飼水流量在所需的極小值之上，鍋爐是不許允點火的。如果流量低於極小值的 85% 超過二十秒或在極小值 70% 以下超過為一秒，鍋爐必須立刻停用。
- (2). 飼水導電度：超臨界鍋爐因不具汽水鼓來分離汽水及不純物，亦無沖放不良爐水，故水質要求較為嚴格，冷凝水必須 100% 淨化處理，以達極低導電度，如果爐水導電度超出 2.0 μv/cm 經過 5 分鐘或超出 5.0 μv/cm 經過二分鐘，鍋爐必須熄火停止加熱，運轉人員必須熟練水質控制設備的操作；另因爐管口徑較小，及飼水流量較大，為避免爐管內壁受水流沖蝕致破管，廠家建議在除氧器下游加氧，使爐管內壁產生一層硬化保護層，以延長爐管壽命。
- (3). 爐管破漏：任何鍋爐都不允許在爐管破漏下運轉。在貫流式機組，爐管破漏會減少該部位及下游的爐管冷卻水流量不足，而使情況是更加嚴重。
- (4). 飼水溫度：每個飼水流量單位需要的加熱量，是決定於飼水入口溫度和受控出口蒸汽溫度之間的差。如果減少飼水溫度，而出口蒸汽溫度卻維持不變(經由二次燃燒 overfiring)，進入爐內的熱量也許會超過設計值而導致管材料的損傷。雖然機組設計上未設計停用飼水加熱器；但為了降低最終蒸汽溫度使爐內加熱率維持在設計值以內，停用一組飼水加熱器是必須的。除非提供具體信息，一般規則是飼給水溫度每減低華氏二度，蒸汽溫度必須減低華氏一度。



- (5). 過度燃燒：在超臨界機組中，流體在爐內沒有像亞臨界鍋爐那樣的蒸發潛熱。結果，當熱被吸收，流體溫度總會增加而爐管金屬溫度也隨之增量。燃燒率超出設計值可能導致特定區域的爐管金屬溫度超溫。因此操作員必須遵守一個瞬間供熱的嚴格極限。典型的指南，最多不可超過 1.15 倍穩定加熱率，這個在各種不同的負載下的加熱率，應該由燃燒測試清楚地建立。
- (6). 最低壓力：在定壓鍋爐中若爐膛壓力低於 3200psi (22.1MPa) 超過 15 秒鍋爐就必須跳脫，否則會造成不適當的循環流量，不良的爐管冷卻及爐管損壞。在變壓鍋爐設計上也有限制壓力的變動，以免造成爐管損壞，機組必須隨著設計壓力變動曲線運轉。

#### 肆、結語與建議

綜合此次出國實習心得，提出下列幾點建議：

1. 建議本公司未來規劃之 800MW 超臨界貫流式機組應制定統一標準，採單一整合式之控制系統且考量未來之擴充升級能力，以減低運轉維護訓練成本並提高機組設備之可靠度。
2. 德國十分重視專業分工與資源共享，所有核能、火力發電廠的運轉、維護人員的訓練工作均交由境內的專業訓練中心 KWS 承接。該中心為一非營利機構，經費來源由各電廠營餘提撥部份資金來提供，任何電廠運轉上的疑難雜症均可由其提供技術支援服務。本公司未來新建電廠都計畫採用超臨界貫流式機組，各電廠都有意購置模擬器，若此將花費大量購置、維修及訓練人員編置等成本且新的發電機組因尚無運轉經驗，若先購置模擬器，在測試時無相關運轉資料可以依循，恐增加驗收模擬器困難度；除非採取二階段延長驗收時程至機組商轉完成，否則模擬器逼真度及功能將大打折扣。大林模中向來負責本公司火力電廠訓練工作，經驗加上人力資源豐富，僅須增購一套超臨界貫流式模擬器，就可供運轉及維護人員即時訓練及運轉狀況研擬改變時模擬之用。因此建議新建相同容量機組僅購買一套模擬器置於模中，採集中管理及統一訓練方式，以節省設備購置、維護、人員訓練等成本，避免資源浪費及疊床架屋之情形。
3. 德國訓練中心的另一項特色是【行動模擬車】，可針對客戶需求如試運轉期間、大修期間或偏遠地區不便前往時派出模擬器訓練車至各電廠提供訓練服務，值得參考。
4. 本次在德國研習期間發現，其對人員進出的管制十分重視，特別是參觀電廠時更是嚴格，外來訪客一律先在入口處接受 30 分鐘左右工安訓練課題，經過測驗及格且簽名後方能進入，隨後領取安全帽、安全鞋、口罩、護目鏡、反光背心等防護裝備，在接待人員帶領下入廠參訪，值得我們學習。
5. 誌謝：職由衷感謝長官之愛護推薦，得以參加此次出國實習，增長見聞與提升專業技能，藉此訓練能多認識較先進的發電設備，及學習前所不熟悉之領域，收穫良多。出國任務幸賴各級單位長官與承辦人員多方協助與配合才得以成行，在此表達最誠摯的謝意。