

麥寮600MW發電鍋爐給水加氧防蝕處理技術之應用及執行成效

麥寮汽電 蔡忠誠

一、前言：

為響應政府開放發電業政策，及紓解國內缺電壓力，麥寮發電廠及公用二廠於83年著手興建四部600 MW 燃煤鍋爐發電機組及三部汽電共生機組，並自日本及美國引進超臨界貫流式鍋爐，於88年6月陸續投入運轉供電。相較於以往台電大型機組採用之亞臨界汽鼓式鍋爐，超臨界貫流

式鍋爐比一般亞臨界鍋爐效率高，而且無汽鼓設計，在停機及起動較汽鼓式鍋爐快。因其無汽鼓裝置，鍋爐水循環無法利用汽鼓沉降雜質，且鍋爐水係以汽機作功後之蒸汽冷凝回收循環使用，故水質要求比汽鼓式鍋爐更加嚴苛。依據統計，電廠於運轉中被迫停機之原因中有21%為爐管破裂所引起。爐管破裂除了材質腐蝕、飛灰衝蝕、壓力或過熱問題外與給水水質的

好壞有很大的關聯性。

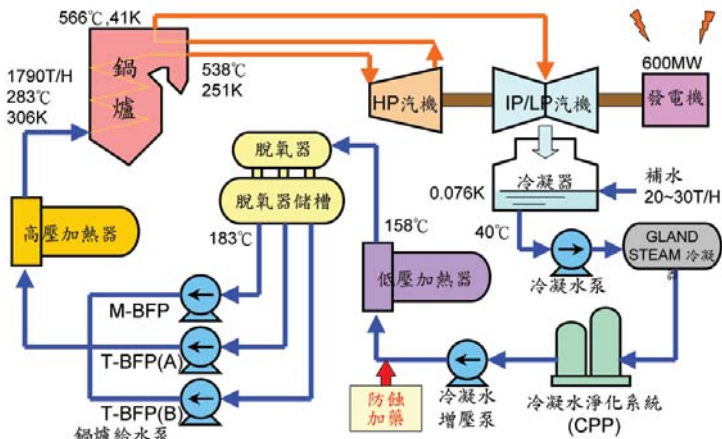
過去麥寮電廠鍋爐水防蝕處理方法，採一般常用之揮發性物質處理方法 (All Volatile Treatment, 簡稱AVT)，雖可抑制鍋爐爐管及給水管路腐蝕的發生，但結垢速率偏高，管路表面粗糙造成管路壓差提高及爐管熱傳效率降低，爲了避免浪費能源增加生產成本，必須每兩年進行酸洗，以維持鍋爐效率。而酸洗過程中，除了將爐管內結垢物清除外，亦同時將母材氧化層剝離，造成爐管逐年減薄，縮短爐管壽命。本文即針對麥寮600 MW 發電機組及汽電共生機組在鍋爐水防蝕處理方法改善成果作說明。

二、鍋爐給水流程說明：

麥寮燃煤火力發電機組係藉由燃煤鍋

爐將水加熱成蒸汽後推動汽輪發電機產生電力，其整個水汽系統由冷凝器冷凝回收之超純水(鍋爐水)經由冷凝水淨化處理(CPP)→低壓加熱器→脫氧器→鍋爐給水泵(BFP)→高壓加熱器後再入鍋爐進行汽化，鍋爐汽化後蒸汽溫度高達538°C、壓力251 kg/cm²G，再推動汽輪機葉片轉動發電。因其主蒸汽條件超過臨界點(225.56 kg/cm²A, 374.15°C)，故稱爲超臨界機組，流程如圖一所示。

在整個水—汽循環過程中，除了少量蒸汽供加熱器加熱冷凝排放及鍋爐蒸汽吹灰損失需於冷凝器補充20~30 T/H的水外，大部份的蒸汽(>98%)經由冷凝器冷凝回收再循環使用，因回收的水中含有前一次循環管路內結垢物剝落游離及防蝕加藥溶存之雜質，須經由冷凝水淨化系統進行陰陽離子樹脂交換淨化處理後，再於冷凝水增



(圖一)

壓泵出口重新進行加藥防蝕處理，保持鍋爐水在最佳的防蝕狀態。

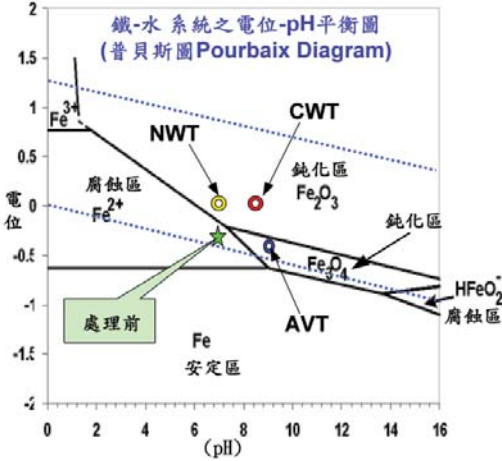
三、改善前——揮發性物質處理方法 (AVT):

1. 防蝕原理:

鍋爐水在以鐵金屬為主要材質的管路內流通，無法完全避免鐵在水中產生氧化作用，爐管防蝕的觀念在於使鐵—水共存的氧化還原狀態達到平衡，確保鐵在水中的氧化之速率降低而不繼續惡化。其防蝕原理簡單以鐵-水電位-pH 平衡圖(普貝斯圖 Pourbaix Diagram，圖二)說明...

如圖二所示，鐵在酸性或中性($\text{PH} < 7$)的水中會腐蝕產生 Fe^{2+} 離子。而在鹼性、低電位時鐵與水反應生成 Fe_3O_4 ；在鹼性、高電位時產生 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 及 Fe_2O_3 均為穩定

的氧化物，在爐管表面生成沈積後會形成鈍化保護膜，可減緩爐管腐蝕速率。



(圖二)

2. 揮發性物質處理方法 (AVT) :

麥寮發電機組鍋爐水過去採用傳統之揮發性防蝕處理 (All Volatile Treatment, 簡

稱 AVT) 方式，係將鐵—水的環境維持在鹼性—低電位處理，使管路表面形成 Fe₃O₄ 鈍化保護膜。在實務的操作上，鍋爐給水中以化學加藥調整 pH 值維持在 9.2~9.6 之鹼性條件，並以物理脫氧處理利用蒸汽加熱給水將溶存氣體及溶存氧 (DO₂) 脫除至 \wedge ppb 以降低氧化電位。在藥劑選擇方面，為避免藥劑在高溫高壓下，於爐管內形成固態結晶鹽類之沈積造成阻塞，採用揮發性物質聯氨 N₂H₄ 作脫氧劑 (還原劑) 及氨 NH₃ 作 pH 值調整，使爐管表面鈍化，達到防蝕之目的，其反應示如下，如圖三：

(1) 聯氨 (N₂H₄) 作用：當脫氧劑除氧降低電位，同時提高 pH 值：



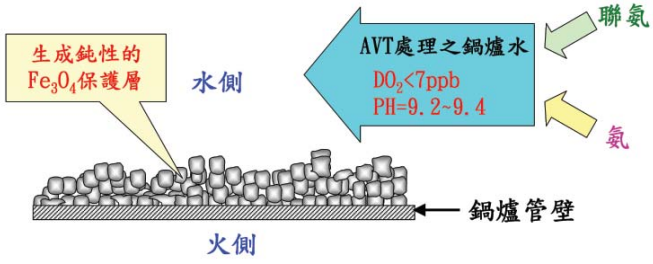
(2) 氨 (NH₃) 作用：提高 pH 值

$$3NH_4 + H_2O \rightarrow N_2H_5^+ + OH^- \text{ (提高 pH 值)}$$

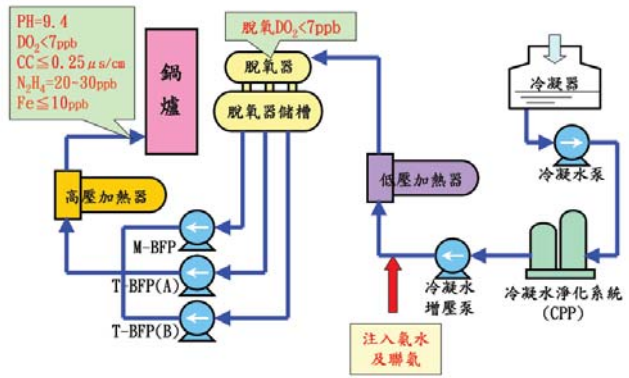
(2) 氨(NH₃) 作用：提高給水 pH 值



AVT 是在熱力脫氧器正常運轉同時，在鍋爐給水中加入聯氨及氨調節給水的水質，處理時必須嚴格控管各階段水質，使鍋爐入口陽離子導電度維持在 <0.25 μs/cm、pH 值 = 9.4、聯氨 = 20~30 ppb (流程如圖四)，同時定期檢驗水中鐵離子濃度 < 10 ppb。為確保防蝕效果最佳化，各國對於 AVT 運轉時給水的水質制定標準比較如下表：



(圖三)



(圖四)

3. AVT 脫氧處理之缺點

(1) 爐管鈍化保護層容易剝離

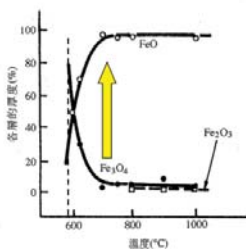
AVT 處理後爐管表面生成之鈍性磁鐵礦(Fe_3O_4)保護層，在高溫時(570°C)，靠近管壁內側之磁鐵礦將轉換成氧化亞鐵(FeO) (如圖五)，而使磁鐵礦剝落，造成爐管結垢沉積腐蝕。

(本圖節錄自「中國材料科學學會修訂鋼鐵材料手冊(1998)」P.501.「鋼鐵材料之腐蝕與防蝕」，作者：余承聖、吳覺宇、魏豐義)

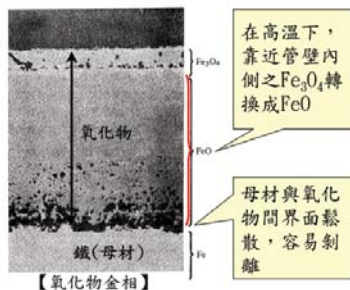
(2) 爐管容易積垢沉澱

磁鐵礦(Fe_3O_4)保護層為粗糙的波形沉澱，鍋爐水中的游

AVT 處理 法規標準	單位	EPRI 美國	VGB 德國	GB 中國	JIS 日本	參察 機組
陽離子導電度	$\mu\text{ s/cm}$	<0.2	<0.2	<0.2	<0.25	<0.25
溶氧量	ppb	<5	<100	<10	<7	<7
pH 值		9~9.6	9~10	9~9.6	9~9.7	9.2~9.6
聯氨含量	ppb	≥ 3 倍溶氧	-	20~50	>10	20~30
鐵	ppb	<10	≤ 20	≤ 10	<10	<10



(高溫下鐵生成氧化物之厚度變化)



【氧化物金相】

(圖五)

(本圖節錄自「中國材料科學學會修訂鋼鐵材料手冊(1998)」P.501.「鋼鐵材料之腐蝕與防蝕」，作者：余承聖、吳覺宇、魏豐義)

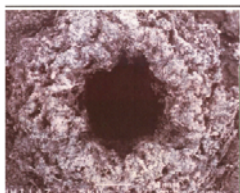
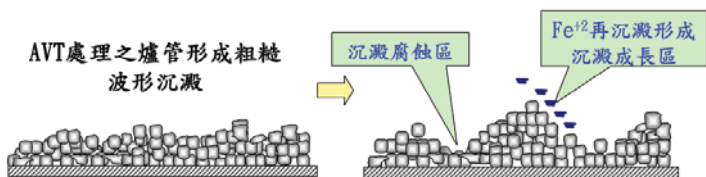
離二價鐵離子(Fe^{2+})容易在波峰形成再成長區，使保護層更粗糙。而波谷處因局部流速不均，容易沈澱結垢(如圖六及照片)，長期累積會造成管路壓損提高及爐管熱傳效率降低，增加鍋爐給水泵負載及降低鍋爐效率，浪費能源，嚴重者造成阻塞爐管過熱破管。

四、改善後——加氧防蝕處理方法 (CWT)：

1. 加氧防蝕處理之源起

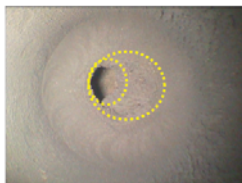
鍋爐加氧防蝕處理於1960年代由德國開發，早期單純以氧化劑(氧氣或過氧化氫)加入高純度中性之鍋爐水，即中性水處理(Natural Water Treatment, 簡稱NWT)，其防蝕原理如前述：鐵-水電位-PH平衡圖(普貝斯圖Pourbaix Diagram)，維持鐵-水在中性、

(圖六)



電廠爐管結垢物 (AVT處理)

生成之氧化物較不平整，較易生成沉積物。



UPA機組鍋爐流孔板結垢物 (AVT處理)

高電位之鈍化態，使爐管表面生成 Fe_2O_3 鈍化保護膜。但因其防蝕操作點非常靠近腐蝕區，一旦水質受到些微污染，鍋爐水很容易降到 $\text{pH} \leq 5$ 之酸性條件，此時加氧不但無法形成鈍化保護膜，且會加速腐蝕。

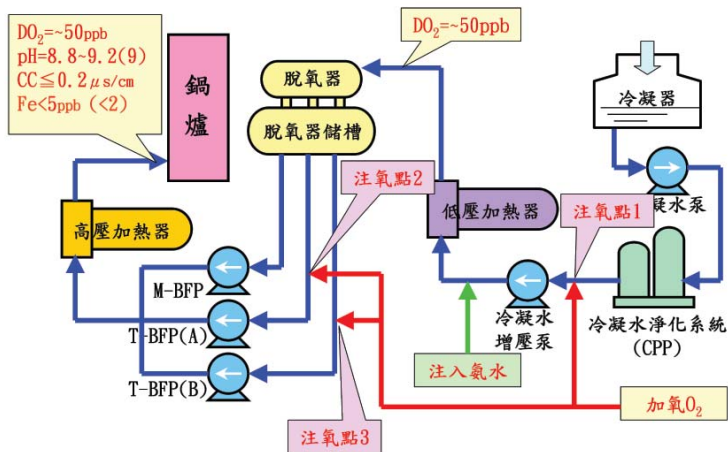
於是在NWT基礎上發展出加氧及加氨之聯合水處理(Combine Water Treatment, 簡稱CWT)，並在1982年正式將其確立為貫流式鍋爐給水處理的新技術，此後即為歐洲國家廣泛使用。日本1990年開始試行、美國於1991年引進技術，目前世界各地已有超過100部鍋爐機組使用中，其技術已非常成熟。而國內於2004年麥寮UPA機組首次引進試行。

2. 加氧防蝕處理方法(CWT)：

鍋爐水CWT防蝕處理，初期運轉時仍需先以AVT處理維持鍋爐入口水質陽離子

導電度在 $\leq 0.2 \mu\text{s}/\text{cm}$ 的高標準(AVT標準 $\leq 0.25 \mu\text{s}/\text{cm}$)，並持續至少20天水質穩定後才能執行切換CWT運轉，切換CWT前爐管表面仍形成AVT處理時的磁鐵礦(Fe_3O_4)之鈍化保護膜。

進行AVT切換CWT處理時須停止加脫氧劑聯氨，並在鍋爐水中注入超純氧(如圖七)。為了加速鈍化保護膜生成，CWT切換初期需提高注氧量至200 ppb待鈍化生成後，再逐步調降注氧量至30~70 ppb(目標值=50 ppb)維持水中溶氧量一定。同時pH值亦隨注氧量調整變化，逐步調降注氧量控制pH由9.4降至8.8~9.2(目標值=9.0)維持運轉。CWT切換過程使鐵材表面既有AVT生成的磁鐵礦(Fe_3O_4)上再生成赤鐵礦($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)，形成複層之平滑緻密共化合物保護膜。在爐管鈍化生成後，仍必須持續注氧維持給水中氧溶度及pH值控制在標準值

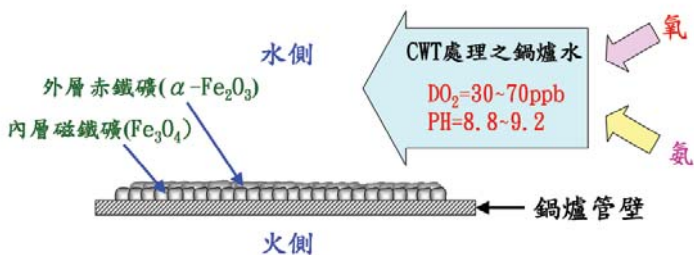


(圖七)

($\text{DO}_2=30\sim 70\text{ ppb}$, $\text{pH}=8.8\sim 9.2$), 達到防蝕及減緩結垢速度之目的。其反應示如下，如圖八：

(1) 氨(NH_3)作用：
調整pH值作用
與AVT(回)
 $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$
(提高pH值)

(2) 氧(O_2)作用：提
高電位使 Fe_3O_4
表面進一步生成
 Fe_2O_3 保護膜



(圖八)



由於CWT處理係於

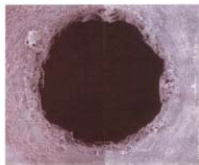
鍋爐水中加入高純度的氧氣，而氧氣即為強氧化劑，加氧溶度過與不及都將造成腐蝕加劇。

CWT在切換過程中每一步驟氧濃度之控制及pH值之調整均有嚴格之規範，而麥寮機組CWT切換後之給水的水質標準較各國制定之標準更為嚴苛，比較如下表：

CWT 處理 法規標準	單位	EPRI 美國	VGB 德國	GB 中國	JIS 日本	麥寮 機組
陽離子導電度	$\mu\text{s}/\text{cm}$	≤ 0.15	< 0.2	< 0.15	≤ 0.2	≤ 0.2
溶氧量	ppb	30~150	30~150	30~300	20~200	30~70
pH 值		8~8.5	8~9	8~9	6.5~9.3	8.8~9.2
鐵	ppb	< 5	< 20	< 10	< 10	< 5

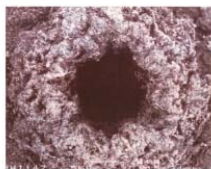
3. 鍋爐CWT 執行成效：

麥寮UPA機組於93年自日本引進技術試行後，已建立自主技術包含設備、控制系統及運轉技術等，並陸續完成FP2(95.02)、UPC(95.02)、UPC(95.06)、FP1(95.07)、UPB(96.03)及FP3(96.06)等5部機切換。鍋爐執行CWT防蝕處理後，由於形成的磁鐵礦(Fe₃O₄)及赤鐵礦(α-Fe₂O₃)共合物保護膜，較為平滑緻密(如圖九)，生成沈積物較少，其成效



日本電廠爐管結垢物
(CWT處理後)
(圖九)

爐管生成之
氧化物較為
緻密平滑，
不易生成
沉積物。

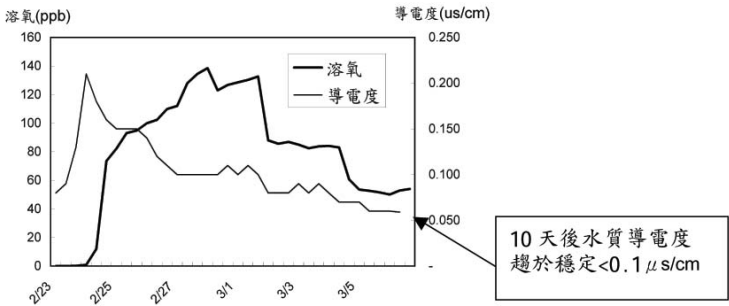


對照-(AVT處理後)

可由短期間切換過程水質變化及長時間爐管結垢量分析結果觀察到明顯的差異。

(1) 短期成效——水質提昇，抑制腐蝕

以第一部自主技術完成 CWT 切換之 FP2 機組為例，在 AVT 切換至 CWT 過程中，初期給水加氧後，鍋爐水導電度由 AVT 運轉時 0.08 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 急劇上升至 0.23 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (如圖十)，顯示爐管表面積存之鬆散之結垢物，因水中溶氧增加而氧化剝離，造成暫時性的水質陽離子及鐵濃度增加，此為 CWT 切換過程中之清管作用。隨著爐管鈍化逐漸形成，溶氧調降至 50 ppb，導電度明顯下降至 0.06 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，比切換前 AVT 維持在更佳的水質。而鍋爐水中鐵離子濃度由 7.2 ppb 下降至 3.5 ppb，鍋爐水中析出之鐵離子減少，即 CWT 比 AVT 有更有效的抑制腐蝕發生。



參察 FP2 機組 AVT 切換 CWT 之溶氧-導電度趨勢圖

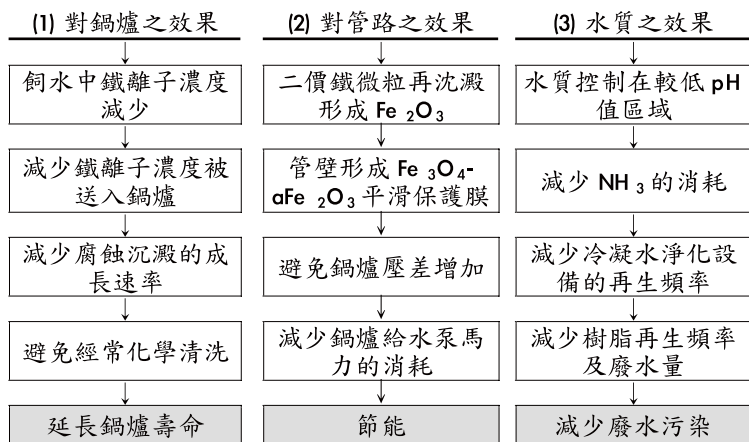
(圖十)

(2) 長期成效——結垢量減少，延長鍋爐使用壽命

長期成效觀察，以最早投入 CWT 運轉的 UPA 機組為例，UPA 自 86 年 1 月商轉以來，鍋爐水以 AVT 處理期間，歷經 90 年 4 月及 92 年 10 月兩次停機定檢，進行爐管取樣切管進行內部積垢重量及厚度化驗，均高於管制值 $24\sim36 \text{ mg/cm}^2$ ，需進行爐管酸洗。在 93 年 6 月執行 CWT 處理後，歷經 95 年 2 月及 96 年 11 月兩次定檢，經化驗爐管積垢量，僅由 $12\sim18 \text{ mg/cm}^2$ 微幅成長至 $13\sim20 \text{ mg/cm}^2$ ，均維持在管制值內，無需酸洗。顯示 CWT 有效抑止爐管積垢的成長，且因酸洗次數減少，可延長鍋爐使用壽命。

(3) 綜合成效——保護鍋爐、節能及減廢

鍋爐水採用 CWT 防蝕處理後，在防蝕能力的提昇及抑制結垢量有顯著的直接成效外，對於整廠的鍋爐、管路及水質方面的間接影響關係如下表，可以達到保護鍋爐、節能及減廢之目的：



五、AVT與CWT效益比較..

AVT 切換至CWT 後停用聯氨，鍋爐水 pH 值由9.4 降至9.2，氨用量由51 L/hr 減少為28 L/hr，而鍋爐水中含藥量及雜質減少，冷凝淨化系統(CPP) 樹脂再生週期可由4 天延長至17天，節省藥品及再生費用912 仟元年。在爐管結垢速率有效抑制後，酸洗費用平均每年減少734 仟元年。爐管壓損降低，整廠效率提高約0.011%，增加效益4,158 仟元年。合計每部機每年效益5,804 仟元。詳細說明如下表：

六、結論..

麥寮發電機組在鍋爐給水處理改善上，引進國外新技術並建立自主技術，除了節省軟硬體設備費用9,900 仟元/部機×5

項目 \ 方式	AVT	CWT	說明
鍋爐酸洗費用	-1,100	-366	每次酸洗 2,200 仟元 (AVT 兩年一次；CWT 六年一次)
CPP 再生費用	-951	-224	AVT 再生週期 4 天；CWT 約 17 天
氨氣消耗費用	-113	-23	AVT 需求 1.5ppm；CWT：0.3ppm
聯氨消耗費用	-145	0	切換至 CWT 運轉後無需再加聯氨
氧氣消耗費用	0	-50	
爐管壓損降低之效益	0	+4,158	預估壓差減少 14 kg/cm ² ，整廠效率增加 0.011%
總計	-2,309	+3,495	
改善為 CWT 之效益	5,804	仟元/年	
投資費用每部機 9,490 仟元，回收年限約 1.63 年			

部機=49,500 仟元外，改善後每部機的年效益高達5,804 仟元。在操作技術方面，由於 UPA 進行 CWT 切換時，原廠在鍋爐完成鈍化的操作點上仍留有模糊空間，FP2 第一次自主試車時，除了參考 UPA 機組操作參數外更廣泛搜集國外文獻，成功的在鍋爐出口主蒸汽量測收集溶氧變化趨勢，確立鍋爐完成鈍化時的具體操作點，建立更明確的操作標準。在控制軟體方面，秉棄原廠之半自動單向控制方式，自行開發軟體整合鍋爐負載、給水流量、注氧流量及鍋爐水溶氧回饋循環控制，使 CWT 水質調整達到完全自動控制。有了明確的操作標準及精確的控制系統，更能確保鍋爐運轉安全、提昇效率、減少損失及延長鍋爐使用壽命。