

# 特種設備安全

SAFETY OF SPECIAL EQUIPMENT

1991-5 創刊 2021-10 出刊

雙月刊 第74期

發行所 台灣省鍋爐協會  
發行人 邱華瑞  
總編輯 賴桂堂  
發行地址 台中市 40452 北區崇德路  
一段 631 號 10F-2

電話 (04) 2235-1628  
傳真 (04) 2238-0960  
E-mail tw.boiler@msa.hinet.net  
網址 www.tbva.org.tw

台中職訓中心 台中市 40452 北區崇德路  
一段 629 號 4F-3

電話 (04) 2236-2977  
傳真 (04) 2236-2997  
E-mail boiler.tw@msa.hinet.net

彰化職訓中心 彰化市 50056 中央路 184  
號 3 樓之 3

南投職訓中心 南投縣 54048 南投市文昌  
街 45 號 4 樓之 2

印刷廠 洪記印刷有限公司  
電話 (04) 2314-0788  
E-mail hg2527@ms32.hinet.net

行政院新聞局局版字第 11469 號  
中華郵政台中雜字第 2056 號登記證  
台中郵局許可證台中字第 1321 號登記為  
雜誌交寄 發行數：3000 本

## 廣告索引

國方化工科技股份有限公司  
大震企業股份有限公司  
三浦鍋爐股份有限公司  
大華高科股份有限公司  
岱洋股份有限公司  
台灣紳藝實業有限公司  
金瑛發機械工業股份有限公司  
利峰機械有限公司  
東庚實業股份有限公司  
興志五金企業有限公司  
天鴻興業股份有限公司  
潔康企業有限公司  
威鼎企業有限公司  
吾豐機電廠股份有限公司  
原鈺峰工業有限公司  
東立鐵工廠有限公司  
辰鼎企業有限公司  
增大股份有限公司  
申昌機械股份有限公司  
鴻羽有限公司  
宏榮鋼瓶股份有限公司  
正熊機械股份有限公司  
志豪工業有限公司  
霖興機械工業股份有限公司

# 目錄

## CONTENTS

### 會務訊息

- ★政府補助訓練課程—產業人才投資計畫 ..... 2

### 技術報導

- ★蒸汽蓄熱器的使用及規劃 ..... 3  
★國產生質顆粒燃料可行性評估 ..... 14  
★高壓鍋爐水側腐蝕原因及對策 ..... 25  
★節能案例 ..... 30

### 訓練訊息

- ★本會舉辦各項訓練日程表  
台中職業訓練中心 ..... 31  
彰化職業訓練中心 ..... 32  
南投職業訓練中心 ..... 32

本刊內容已刊載於本會網頁，請進  
台灣鍋爐協會網站 (www.tbva.org.tw) :  
點進“刊物報導”進入覽閱

## 政府補助訓練課程—產業人才投資計畫

本會為服務各界廠商結合勞動部勞動力發展署產業人才投資方案，凡年滿 15 歲以上、具就業保險、勞工保險或農民保險身分之在職勞工，補助其修習課程之 80% 至 100% 訓練費用，3 年累積最高補助 7 萬元，歡迎有興趣的勞工踴躍報名參加。



訓練班名稱	課程代號	上課日期	訓練費 (元)		備註
			自費金額	補助金額	
營造業甲種職業 安全衛生業務主管訓練班	139713	110/11/01   110/11/23	1,760	7,040	夜間班
堆高機操作人員訓練班	139714	110/11/08   110/11/12	1,624	6,496	日間班
架空式三公噸以上固定式 起重機操作人員訓練班	139715	110/11/22   110/12/09	2,470	9,880	夜間班
甲種職業安全衛生業務 主管訓練班	139717	110/12/20   110/12/29	1,760	7,040	日間班
堆高機操作人員訓練班	139718	110/12/21   111/01/11	1,624	6,496	夜間班
架空式三公噸以上固定式 起重機操作人員訓練	139719	110/12/28   111/01/18	2,470	9,880	夜間班

◎ 上課地點：台中市北區崇德路一段 629 號 4 樓之 3（本會附設台中職業訓練中心）

◎ 連絡電話：(04) 2236-2977

◎ 報名請至台灣就業通在職訓練網或參考本會網站

# 蒸汽蓄熱器的使用及規劃

陳建志〔本會資料室〕

現代鍋爐的設計都著重高性能，蒸發量大、體積小為特點，因此，鍋爐內水室的容積相對減少，所能容納的高壓飽和水也減少，同時蒸氣室的容積也小，如此，雖啓動反應很快，但當蒸氣需求負荷變動大時，鍋爐無法瞬間有效地蒸發或利用鍋爐儲存所需蒸汽，以供應現場操作需求。

有很多工廠因為生產程序的安排必須因應現場蒸汽需求經常會有週期性的尖峰負載因而鍋爐的負荷變動極大，當負荷大增時蒸汽供應量不足，致鍋爐壓力下降引起汽水共發或共騰。為了解決上述問題，一般工廠經常購置遠超過平均需求量 2~3 倍的鍋爐，以應付瞬間蒸汽量的需求，如此，鍋爐絕大部分時間都處於低負載致空氣過剩率過多，又由於爐體大負荷小，爐體散熱損失也大，導致鍋爐效率低能源大量浪費。

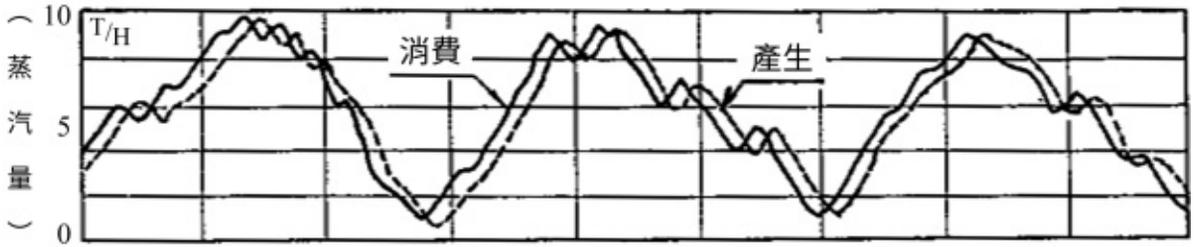
## 一、蓄熱器 (Accumulator) 說明

例如一家企業的生產製程如每隔數小時的時程就有一段時間需要使用很大的蒸汽量，而該段使用大蒸汽量的時間又不是很長，如此，對購買鍋爐蒸發量的大小就要深深考慮，若夠購買足以應付最大使用量則除購買費用昂貴外，鍋爐又絕大部分處於低負載狀態致熱效率甚差，耗費能源，不符合節能減碳法則；而若購買較小量的蒸發量鍋爐，則在需使用大蒸汽量時段又蒸汽量不足供應製程使用。理想的鍋爐蒸發量應是長時間讓鍋爐處於中、高負載情況。也就是購買鍋爐的蒸發量高於中負載，接近高負載但遠低於短時間的大使用量。於是現場蒸汽使用於低負載時鍋爐運轉於中負載以上，而現場蒸汽使用於中負載時鍋爐運轉於高負載，此時鍋爐蒸汽量未完全被消耗掉而尚有剩餘時，把剩餘的蒸汽熱能儲蓄下來，在現場蒸汽於大使用量超過鍋爐高負載所能產生時，再把儲存的熱能放出，以加速蒸汽的產生以補充不足的蒸汽量，這種儲存熱能的裝置叫做蒸汽蓄熱器。下圖為一般鍋爐的運轉法及利用蓄熱器運轉法。

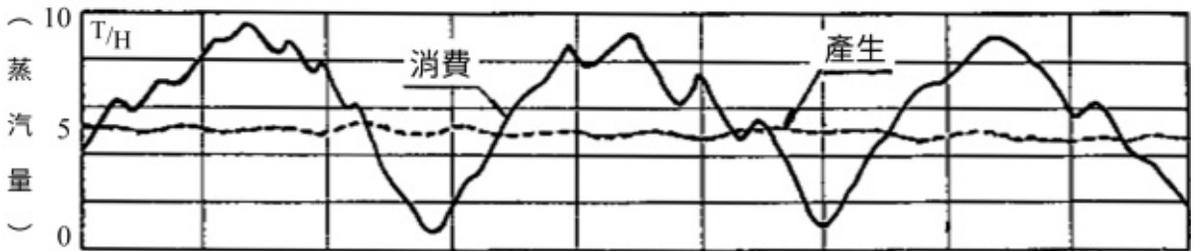
## 二、裝設蓄熱器的優點

1. 可使鍋爐的燃燒穩定，長時間處於較高負載，提高鍋爐效率。
2. 可配合製程要求快速增加鍋爐蒸發量。
3. 負載穩定可提高蒸汽品質。
4. 使用較小的鍋爐也能在短時間滿足現場需要大蒸汽量的需求
5. 當鍋爐故障或負載低於自動控制範圍而停機時，可短暫利用（變壓式）蓄熱器所蓄的熱能產生蒸汽不影響生產。

● 以往之鍋爐運轉法

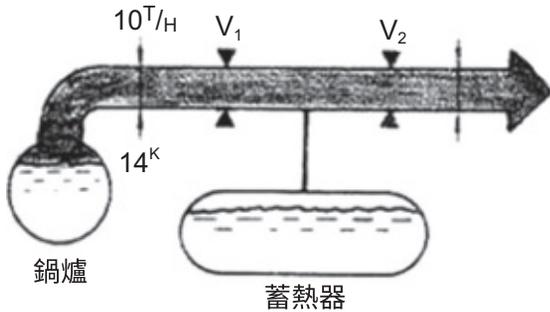


● 利用蓄熱器之鍋爐運轉法

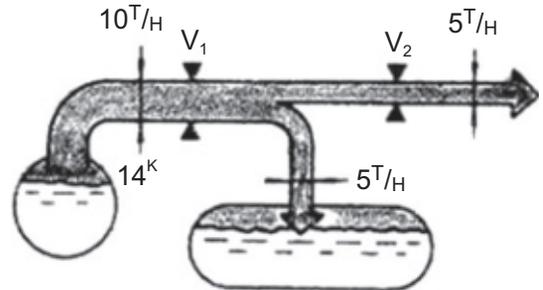


三、蓄熱器各種情況下使用動作如下圖所示（以變壓式情況為例）

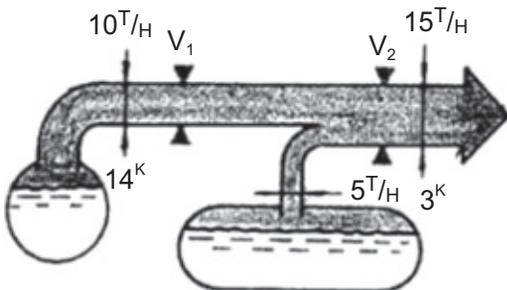
① 鍋爐發生的蒸汽全部被工廠消費時蒸汽並不進出蓄熱器。



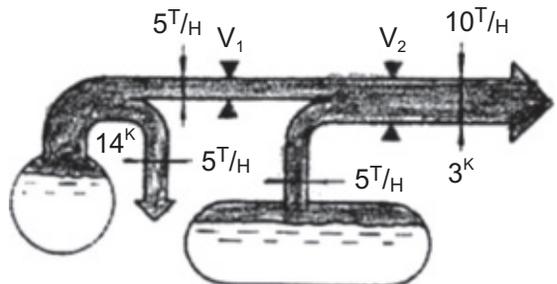
② - ① 工廠的蒸汽消費減少一半時，剩餘的一半就進入蓄熱器蓄存。



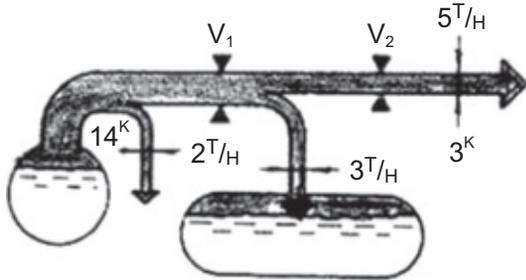
② - ② 工廠的蒸汽消費增加時，鍋爐的蒸汽就不足，可由蓄熱器來蒸發補給。



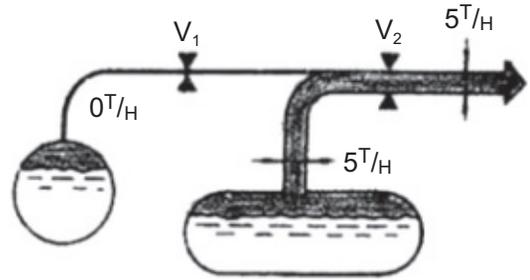
② - ③ 高壓蒸汽消費增加而低壓部門的蒸汽不足時，可由蓄熱器來補給低壓部門。



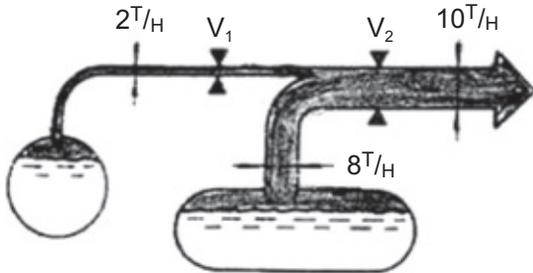
- ② - ④ 高壓、底壓蒸汽消費都減少時，剩餘的蒸汽就進入蓄熱器蓄積。



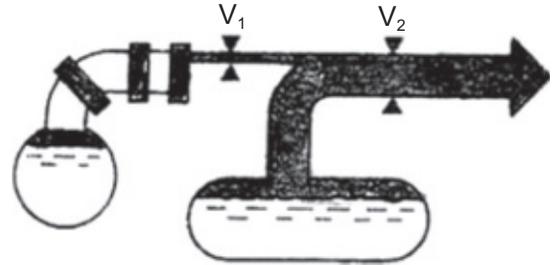
- ③ 因停電或鍋爐故障而鍋爐停止出汽時，自蓄熱器供應應急蒸汽。



- ④ 早上開始作業鍋爐蒸汽不足時，可自蓄熱器把前日剩餘蒸汽發出來供應工廠使工廠可以 100% 操作。

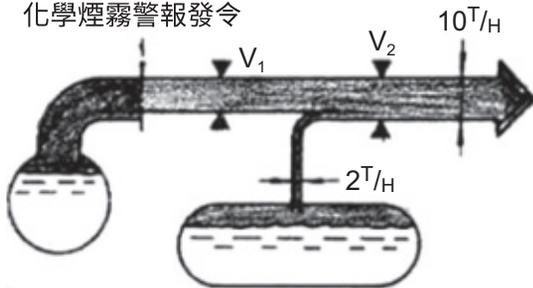


- ⑤ 燃木屑鍋爐、蔗屑鍋爐、廢熱鍋爐等，如鍋爐發生蒸汽變動或停止時可自蓄熱器連續供應產生用蒸汽。

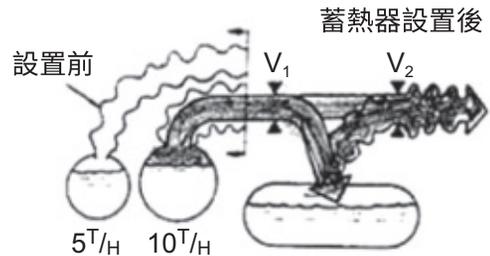


- ⑥ 光化學煙霧警報發令而鍋爐蒸汽量減少 20%~40% 時：自蓄熱器補給不足的蒸汽使工廠可以全額運轉。

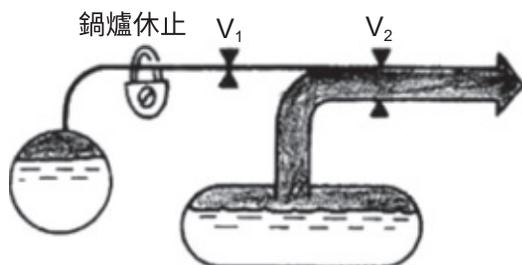
化學煙霧警報發令



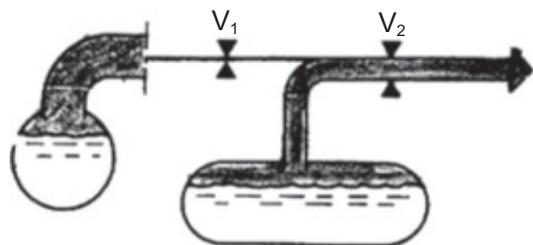
- ⑦ 蓄熱器裝設前用 2 個鍋爐，裝設後只要用 1 個鍋爐就夠了。因負荷變動大而就是用 2 個鍋爐也感到困難時，只要裝設蓄熱器就可由蓄熱器來吸收負荷變動，鍋爐變為平均蒸發而只要 1 個就足夠。



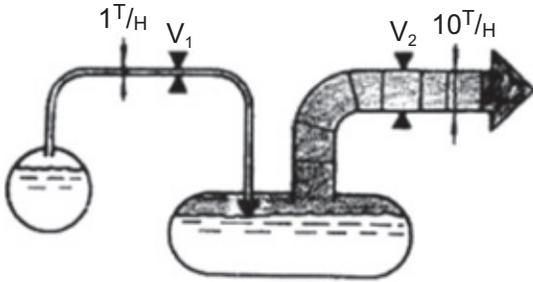
- ⑧ 每週休假 2 日制或深夜可停用鍋爐，而浴室急救手術、早產兒暖氣、動物舍暖氣等的小量蒸汽全部由蓄熱器來供給。



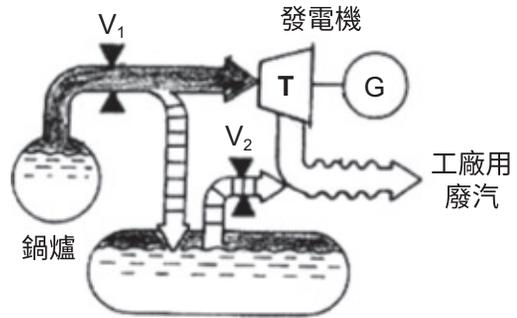
- ⑨ 用大型鍋爐來供應夜間少量蒸汽時，可以短時間運轉鍋爐蓄積於蓄熱器，使鍋爐長時間停止而以蓄熱器來連續供應消費。



- ⑩ 斷續供應多量的蒸汽消費時，可連續運轉鍋爐把蒸汽蓄積於蓄熱器而間歇供應大量的蒸汽消費。



- ⑪ 自備發電機之工廠，使用透平發電機與蓄熱器併用，發電機廢汽之消費變動時由蓄熱器來補充，鍋爐負荷與發電是保持一定。

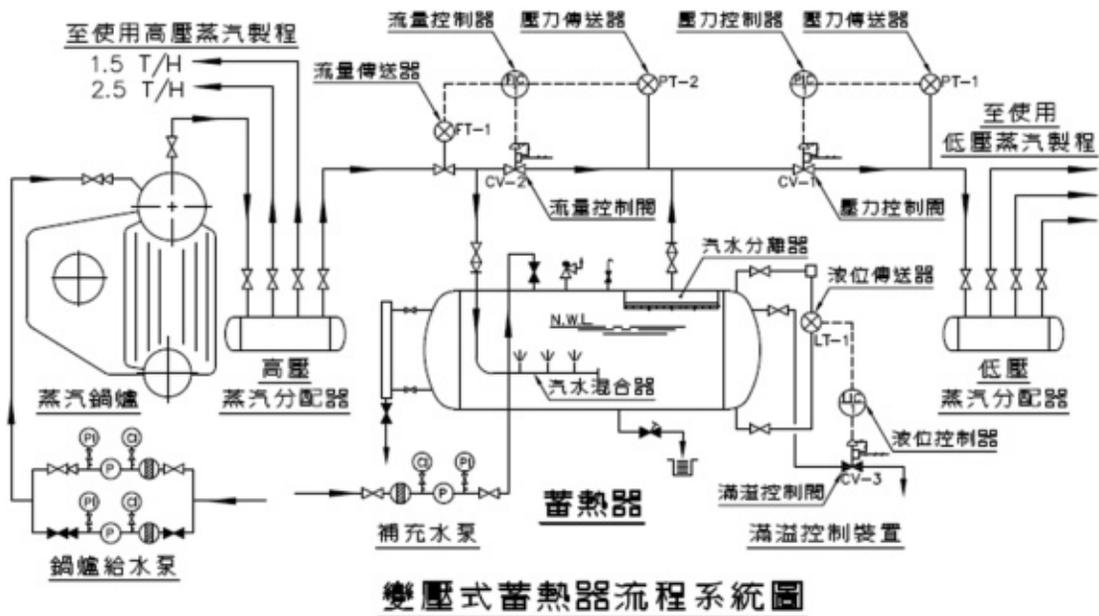


#### 四、蒸汽蓄熱器的形式

蒸汽蓄熱器的形式有變壓式及定壓式兩種，說明如下：

##### (一) 變壓式蒸汽蓄熱器：

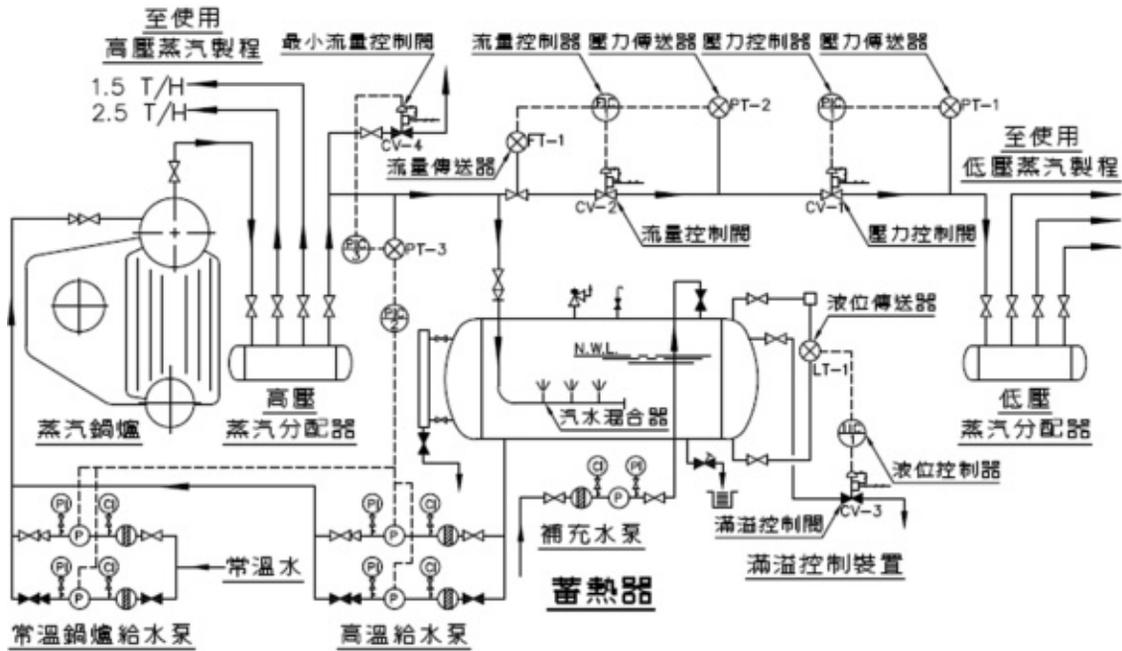
把現場使用剩餘的蒸汽噴入設於蒸汽系統中的蒸汽蓄熱器裡面的水中，以飽和水的形態把熱量儲存下來，在必要時降低壓力使儲存的熱能揮發產生蒸汽者，由於壓力改變故稱之變壓式，其系統流程如下圖所示。



##### (二) 定壓式蒸汽蓄熱器：

把現場使用剩餘的蒸汽噴入設於給水系統中的蒸汽蓄熱器裡的水中，以飽和水的形態把熱量儲存下來，在必要時將此高溫的飽和水直接注入鍋爐，使快速增加蒸

汽蒸發量；由於只是給水溫度不同而壓力與鍋爐相同，故稱之為定壓式，其系統流程如下圖所示。

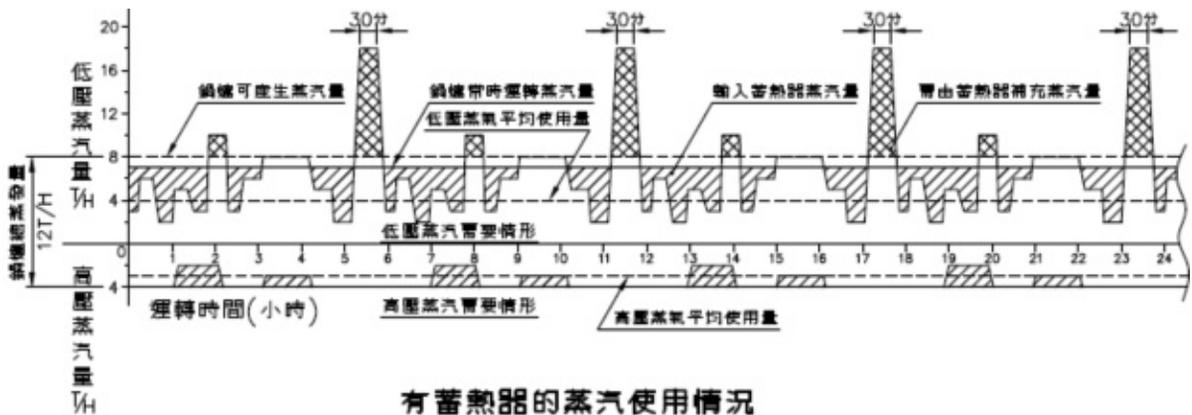


定壓式蓄熱器流程系統圖

### 五、蓄熱器容量的規劃

#### (一) 蒸汽需求情況

設有一企業其現場製程使用  $22\text{kg}/\text{cm}^2$  的高壓蒸汽各為  $1.5\text{T}/\text{H}$  及  $2.5\text{T}/\text{H}$ ，共為  $4\text{T}/\text{H}$ ，平均為  $3\text{T}/\text{H}$ 。而另有製程僅需蒸汽壓力  $8\text{kg}/\text{cm}^2$ ，其使用蒸汽量常在  $3\sim 5\text{T}/\text{H}$  之間，甚至有時低至  $2\text{T}/\text{H}$  時刻，平均為  $4\text{T}/\text{H}$  但現場製程每隔 6 小時會有約 30 分鐘須用量達  $18\text{T}/\text{H}$ ，其使用情況紀錄週期如下圖所示有蓄熱器第蒸汽使用情況。



有蓄熱器的蒸汽使用情況

## (二)鍋爐的選擇

依現場使用情況高壓蒸汽消耗量平均於 3T/H，其餘是低壓 8kg/cm<sup>2</sup> 的蒸汽使用於 2T/H~18T/H，大部份時間平均為 4T/H，也就是鍋爐平常時平均用量為高壓 3T/H+低壓 4T/H=7T/H，最大量供應現場為高壓 4T/H+低壓 18T/H=22T/H。最小量是高壓 2T/H+低壓 2T/H=4T/H。

### 1. 以最大使用量考量

以最大使用量考量去購買鍋爐，則需選擇 22T/H × 10% 餘裕 = 24.2T/H，則鍋爐應選擇蒸發量 25T/H 及設計壓力 25kg/cm<sup>2</sup>。但低壓蒸氣絕大部分用於 4T/H 左右，即鍋爐常用於平均用量高壓 3T/H + 低壓 4T/H = 7T/H，則此鍋爐常處於 7T/H ÷ 25T/H = 28% 左右的低負載運轉；最小量是偶而用 2T/H + 2T/H = 4T/H，最小量則處於 4T/H ÷ 25T/H = 16% 的極低負載，此種情形是常超出鍋爐自動控制比例範圍 (Turndown ratio) 而時常停機 (一般燃油自動控制範圍約 4:1，即最小量控制在 25T/H ÷ 4 = 6.25T/H)，故鍋爐及附屬設備效能太低且設備費用高，頗不適宜。

### 2. 選用二台各為 15T/H 的鍋爐

選用兩台各為 15T/H 的鍋爐，其中常時運轉一台另一台於最大負載時補助運轉，此種情形常時鍋爐運轉於平均用量 7T/H ÷ 15T/H = 46.6% 負載，最小負載 4T/H ÷ 15T/H = 26.6%。此種情形也是屬於中低負載運轉，鍋爐及附屬設備效能也低且需二套設備，設置費用高，也需要有較大的場地。而補助鍋爐啟動時需要前排氣再點火再逐漸加大燃料才能達到最大蒸發量。這段時間恐緩不濟急，難於配合現場急激需要蒸氣的需求。

### 3. 採用一台鍋爐及蓄熱器補助

若選用一台 12T/H 的鍋爐，則鍋爐除供給常用 7T/H 外尚有 5T/H 可儲存熱能於蓄熱器。常時依現場所需平均蒸汽量鍋爐必須負載 7T/H ÷ 12T/H = 58.3% 負載，最小量 4T/H ÷ 12T/H = 30% 負載，高於鍋爐自動控制比例範圍無停機之慮；而最大蒸氣消耗量為高壓 4T/H+低壓 18T/H=22T/H，尚待補充蒸氣量=最大消耗量 22T/H - 鍋爐蒸發量 12T/H = 10T/H，此週期為六小時，設在三至四小時內應將不足蒸氣補入蓄熱器儲存，若以三小時計則鍋爐應補入蓄熱器之蒸氣量 = 10T/H ÷ 3 = 3.35T/H，所以鍋爐常時應運轉之實際負載 = (7T/H+3.35T/H) ÷ 12T/H = 85.6%。若加上鍋爐本身及附屬設備所需的消耗蒸汽約 5~10% 計，則近於滿載運轉；又若以四小時計則鍋爐應補入蓄熱器之蒸氣量 = 10T/H ÷ 4 = 2.5T/H，所以鍋爐常時應運轉之實際負載 = (7T/H+2.5T/H) ÷ 12T/H = 79.1%。所以此情況的規劃，鍋爐常運轉於最經濟且最佳的高負載，鍋爐及附屬設備效能都高。

### 4. 最佳的選擇

由上述可知以蒸發量 12T/H × 設計壓力 25kg/cm<sup>2</sup> 的鍋爐+蓄熱器的組合是最適

宜的選擇。鍋爐常在最經濟高負載運轉除效率高外，因僅購買一台設備費用低，然需要增設蓄熱器即蓄熱器容量大小以鍋爐最大蒸發量 12T/H，其餘不足之蒸汽由蓄熱器補充之方式規劃。

(三)蓄熱器容量大小的決定

1. 變壓式的規劃

依照蒸汽使用情況為每六個小時一個週期，其低壓蒸汽最大使用量為 18T/H，時間為 30 分鐘，而現場使用高壓蒸汽最大 4T/H，鍋爐蒸發量 12T/H，只能供應到低壓蒸汽 = 12T/H - 4T/H = 8T/H，故低壓蒸汽尚待補充量 = 18T/H - 8T/H = 10T/H，但低壓最大耗用量時間為 30 分鐘，實際待補充之量 = 10T/H × 1/2 = 5T/H = 5000kg/H，蓄熱器於 22kg/cm<sup>2</sup> 飽和蒸汽熱焓為 668.5kcal/kg，飽和水熱焓為 223.7kcal/kg，密度 0.842kg/L；8kg/cm<sup>2</sup> 飽和蒸汽熱焓 661.9kcal/kg，飽和水熱焓 176.5kcal/kg，飽和水壓力由 22kg/cm<sup>2</sup> 降至 8kg/cm<sup>2</sup> 時，每 m<sup>3</sup> 所能釋出熱焓 = (223.7kcal/kg - 176.5kcal/kg) × 1000L × 0.842kg/L = 39742kcal/m<sup>3</sup>

每 m<sup>3</sup> 飽和水能釋出蒸氣

$$= 39742\text{kcal/m}^3 \div (668.5\text{kcal/kg} - 176.5\text{kcal/kg})$$

$$= 80.7\text{kg/m}^3 \times 97\% \text{ (蒸氣濕度係數以 3\% 計)}$$

$$= 78.2\text{kg/m}^3 \text{ 取 } 78\text{kg/m}^3 \text{，每 m}^3 \text{ 飽和水產生蒸汽如下表之蓄熱表所示}$$

$$\text{蓄熱器必要儲水量} = 5000\text{kg/H} \div 78\text{kg/m}^3 = 64.1\text{m}^3$$

$$\text{蓄熱器採用臥式儲槽，蓄水量約在 } 75\sim 80\% \text{ 為宜，故容量} = 64.1\text{m}^3 \div 0.75 = 85.4\text{m}^3 \times 1.1 \text{ (餘裕 10\% 計)} \div 94\text{m}^3$$

故此蓄熱器容量選擇 95~100m<sup>3</sup> 為佳

蓄熱表 熱水每 1m<sup>3</sup> 的蒸汽發生量 kg/m<sup>3</sup>

蓄熱器的最高壓力 kg/cm <sup>2</sup> G	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	22	24	
蓄熱器的最低壓力 kg/cm <sup>2</sup> G	2	66	74	81	87	99	110	115	119	127	136	143	149
	3	48	57	65	71	84	95	99	104	113	121	127	134
	4	33	42	50	57	69	81	86	91	100	108	116	122
	5	22	31	39	46	59	70	76	80	90	97	106	112
	6			28	34	47	59	65	69	78	87	95	102
	7					38	50	56	61	70	78	86	92
	8						43	47	53	63	71	78	84
	9								44	55	63	70	76
	10									47	56	64	70
	11										49	57	63
	12										43	50	56

## 2. 定壓式的規劃

當低壓蒸汽需要量大致高壓蒸汽由  $22\text{kg}/\text{cm}^2$  降至設定壓力  $21\text{kg}/\text{cm}^2$  時，則啓動高溫熱水泵，將蓄熱器內的高溫水輸入鍋爐，並將低溫的給水泵停止運轉。若鍋爐常用給水溫度  $25^\circ\text{C}$ ，熱值  $25\text{kcal}/\text{kg}$ ，蒸汽  $22\text{kg}/\text{cm}^2$  之飽和熱焓為  $669.1\text{kcal}/\text{kg}$ ，則鍋爐蒸發量  $12\text{T}/\text{H}$  時需要輸出熱量 =  $(669.1\text{kcal}/\text{kg} - 25\text{kcal}/\text{kg}) \times 12000\text{kg}/\text{H} = 7,729,200\text{kcal}/\text{H}$

當壓力降至  $21\text{kg}/\text{cm}^2$  時，蓄熱器內飽和水熱焓為  $h_1 = 221.2\text{kcal}/\text{kg}$ ，蒸汽熱焓  $h_2 = 668.4\text{kcal}/\text{kg}$ ，其蒸汽之潛熱值  $r = 668.9 - 221.2 = 447.7\text{kcal}/\text{kg}$ ，密度 =  $0.845$ ，故需要送入鍋爐之熱水量

$$\begin{aligned} &= 7729200\text{kcal}/\text{H} \div 447.2\text{kcal}/\text{kg} = 17283\text{kg}/\text{H} \div 0.845\text{kg}/\text{L} \\ &= 20.453\text{L}/\text{H} = 20.45\text{m}^3/\text{H} \end{aligned}$$

因此，高溫水泵揚量若加 10% 則揚量 =  $20.45\text{m}^3/\text{H} \times 1.1 = 22.5\text{m}^3/\text{H}$

而蓄熱器蓄水量以 75% 為準且考量是高溫水泵，故正水頭壓力要足夠不要變動太大故餘裕取 50% 則蓄熱器之大小 =  $(20.45\text{m}^3/\text{H} \div 75\%) \times 1.5 = 40.9\text{m}^3$ ，取 50~55 為宜。

定壓式若高壓側壓力不能低於  $22\text{kg}/\text{cm}^2$  時，則常用壓力調高為  $22.5\text{kg}/\text{cm}^2$  或鍋爐及蓄熱器的設計壓力用  $28\text{kg}/\text{cm}^2$ ，常用壓力為  $25\text{kg}/\text{cm}^2$  經減壓為  $22\text{kg}/\text{cm}^2$  入高壓側，鍋爐壓力降至  $23\text{kg}/\text{cm}^2$  即可啓動高溫熱水泵。

### (四) 蓄熱器應有的設備（變壓式及定壓式）

#### 1. 液位計：

指示蓄熱器所儲有的水量，便於知道所儲有的水量不足時由補充水泵補給。

#### 2. 汽水分離設備：

與水管鍋爐上汽胴內部的汽水分離設備相似，使揮發出來的蒸汽能有較佳的乾度，此為變壓式必備設備。

#### 3. 滿溢水控制裝置：

由於蒸氣不斷的加入，水位會逐漸上升，水位若過高時則過量的水由此排出。變壓式一般設定於全容量的 85% 左右，而定壓式可設於 90% 左右；此設備含液位傳送器 (LT-1)、液位控制器 (LIC-1)、滿液控制閥 (CV-3)。

#### 4. 高壓側蒸氣壓力控制設備：

讓鍋爐與蓄熱器入口端的蒸汽壓力保持高壓於一定的壓力，方便供高壓側使用及蓄熱器儲存熱能；其設備含高壓傳送器 (PT-2)、流量控制器 (FIC-1)、壓力控制器、流量控制閥 (CV-2)。

#### 5. 流量控制器：

由於低壓側使用瞬間的蒸氣需要量甚大，為應付現場大量的需求流量控制閥會大開或全開，導致高壓側的壓力遽降會影響高壓側製程的生產，或因壓力遽降致蒸發量大的結果使水位劇降至極低水位，而引起自動燃燒連鎖控制熄火；有此流量傳送器（FT-1）檢出信號，將流量控制器（FIC-1）設定於一定值如最大不超過鍋爐蒸發量的 1.1 倍，使流量控制閥（CV-2）開度受限制，則可限制由鍋爐補充的最大蒸氣量，不足的蒸汽才由蓄熱器補充供給。

#### 6. 低壓側減壓設備：

為配合低壓側流程之使用，將高壓蒸汽變為低壓蒸汽且需大量使用時，可由蓄熱氣所儲的熱能閃發出蒸汽。其設備含低壓傳送器（PT-1）低壓壓力控制器（PIC-1）低壓壓力控制閥（CV-1）。

#### 7. 汽水混合器：

由鍋爐產生的高壓蒸汽進入蓄熱器所儲的水中時，藉混合器的作用將蒸汽擴散於水中，避免蒸汽對水產生衝擊（Water harmer）。

#### 8. 補充水水泵：

蓄熱器有時也需排放以清除陳積泥垢或因偶而的水份攜帶致水位降低，則需靠補充水泵給水補充、唯其揚量不必大但揚程需高於蓄熱器的設計壓力。

#### 9. 高溫熱水供給泵：

此高溫熱水供給泵為定壓式必備設備，必需要耐高溫及低淨水頭壓力功能，故造價高。當低壓蒸汽用量大且超過鍋爐最大蒸發量，致高壓蒸汽壓力經由高壓傳送器（PT-3）檢出降至壓力控制器（PIC-2）設定壓力時，高溫熱水供給泵啟動並停止常溫鍋爐給水泵，因熱水所帶進的熱量讓鍋爐的蒸發量快速增加至現場所需的蒸發量，但此泵揚量要超過現場最大需要量且揚程需大於鍋爐設計壓力 1 kg/cm<sup>2</sup> 以上。但此設備變壓式不需要。

#### 10. 最小蒸汽流量設備（即蒸汽壓力超壓防止設備）：

當蒸汽負載有低於自動所能控制範圍（即超出 turndown ratio 範圍）的時段，則鍋爐壓力會超高而自動熄火，若有此情況以使用變壓式為宜，因當鍋爐熄火無蒸氣產生時，所需蒸汽可由蓄熱器閃化出的蒸汽供給補充。定壓式蓄熱器則無此功能；鍋爐必須不停地運轉，所多出的蒸汽要以最小流量排放設備將之排出至儲水槽，以免排至大氣造成能源浪費。故此設備為定壓式所必須有。其設備含壓力傳送器（PT-3）高壓壓力控制器（PIC-3）高壓壓力控制閥（CV-4）。

## 11. 壓力記錄器 (PR-1) 或液位記錄器 (LR-1) :

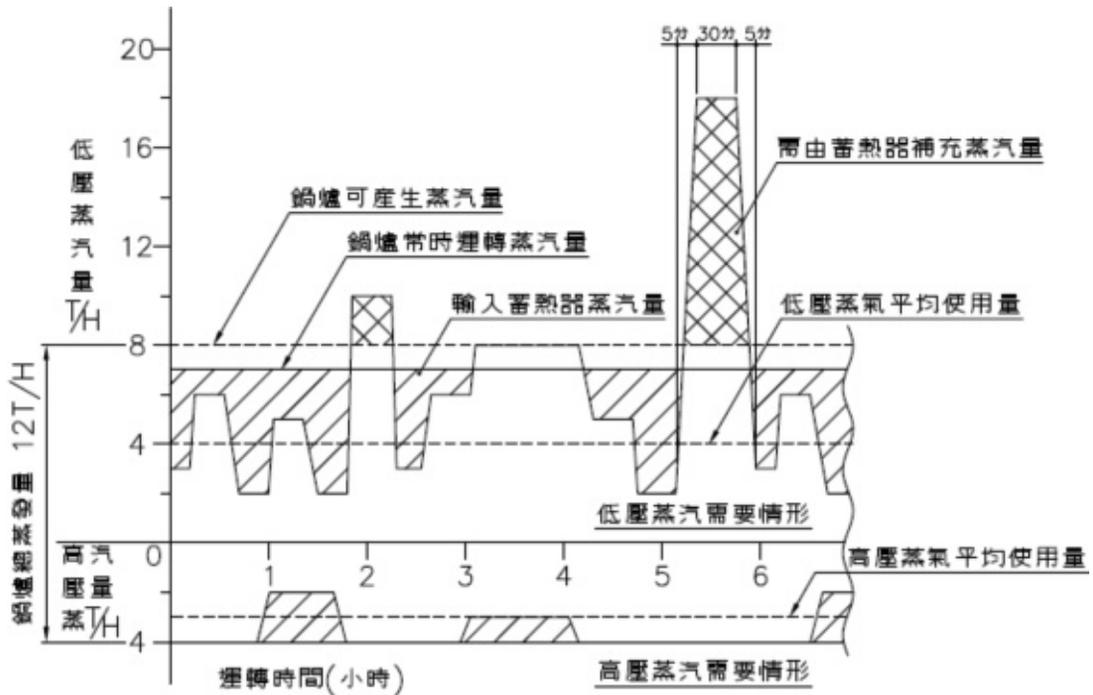
由於儀器設備的發達及自動控制乃至於管理的方便，依情形必要時要裝低壓力側記錄器及高壓力側記錄器或是液位記錄器等三筆或多筆記錄器，由使用者依實際需要而決定筆數。

## 六、變壓式與定壓式使用上之比較與選擇

變壓式與定壓式何者較適用，要以蒸氣使用狀況及空間而定。

### (一) 使用蒸氣量是否瞬間大幅起落

若是有瞬間大幅起落以使用變壓式為佳。因變壓式所蓄熱水可瞬間釋出熱量閃化出蒸氣。而定壓式則須將熱水經高溫熱水泵送入鍋爐，再由燃燒機輸入熱量將之轉化為蒸氣，產生蒸氣過程緩慢恐緩不濟急，如下圖所示。



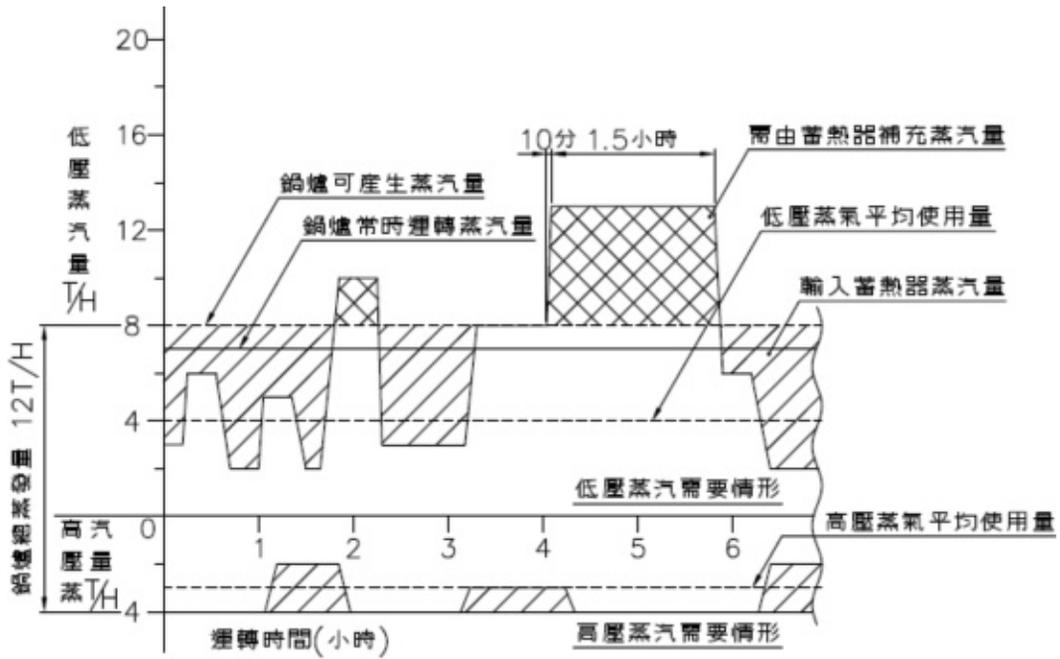
**適用變壓式蓄熱器的蒸氣使用情況**

### (二) 大量蒸氣使用時間長或短

若僅是短時間（約半小時以內）需要大量蒸氣，則以變壓式為宜。

若大量蒸氣長時間需要（半小時以上）則以定壓式較佳。

因定壓式可依所需時間設定儲水量，只要儲水量超過該大量時段所需以上且有餘裕便可。如下圖所示。



適用定壓式蓄熱器的蒸汽使用情況

(三)場地及蓄熱器之大小

變壓式蓄熱器需要儲高溫飽和熱水較多，故蓄熱器容積要較大，所占空間較多，造價較高但較能適應變化。

定壓式所需容積較少，同樣的所占場地較少，造價較低但需高溫熱水供給泵及最小蒸汽流量設備，而高溫熱水供給泵造價卻不低且運轉需冷卻水及保養。

(摘自本會鍋爐知識第 41 期)

別讓您的權利睡著了！  
新購鍋爐時，別忘了  
委託本會作鍋爐“燃燒效率”  
及“蒸汽乾度”檢測

本會技術服務項目

- 鍋爐燃燒效率及蒸汽乾度檢測。
- 丙類危險性工作場所審查及檢查（含每 5 年重評）輔導。
- 危險性機械、設備型式檢查申請輔導，法規諮詢。
- 固定式起重機竣工檢查、定期檢查申請輔導。



# 國產生質顆粒燃料可行性評估

徐英綺、施雅婷、林彥伶、李志杰〔本會資料室〕

## 一、前言

由於石化資源有限且全球面臨氣候變遷之問題，促使各國發展再生能源，其中生質能具備開發成本低（古森本，民 87）、可儲存與非間歇性之優勢，已為各國發展再生能源中之重點。生質能為以動植物為原料，直接燃燒為固體燃料或經轉換為氣體、液體燃料（Energy Information Administration, 2018），工業鍋爐所使用之木質顆粒燃料即為固體生質燃料之一，另外本土農業與林業剩餘資材如竹、廢棄菇包與果樹修剪枝條等，亦屬於生質能之範疇，具備製成生質顆粒燃料之潛力。由於生質顆粒燃料燃燒階段為碳中和因此排碳量為零（Sikkema, R., 2010），且具低硫氧化物、氮氧化物排放（Sjaak V. L., 2008）之優勢，因此自環保署 107 年發布「鍋爐空氣污染物排放標準」後，生質顆粒燃料開始受到重視，並為國內業者採用。

國內本土農業與林業剩餘資材具成為生質顆粒燃料潛力，相關再利用法規亦逐漸放寬，根據農業事業廢棄物再利用管理辦法，禽畜糞、廢棄菇包、禽畜屠宰下腳料、果樹殘渣等，皆可再利用為再生能源之原料或燃料；但因農林剩餘資材收集成本高、含水量高及產量不穩定，造成回收再利用不符經濟效益。現今農林剩餘資材如稻草、廢枝條已不允許採取露天焚燒方式去化，甚至任意丟棄山林與河川，依據廢清法將面臨行政罰鍰與入監服刑之處分，因此農林剩餘資材開始交付處理業者進行去化，如廢棄菇包交付堆肥場、果樹修剪枝條需交付廢棄物清運公司處理。此社會型態轉變，幫助農林剩餘資材集中，甚至清運業者可獲得收益，因此國內農林剩餘資材再利用不再遙不可及；因此筆者輔導業者將清運集中之廢棄菇包、竹屑與廢枝條，經加工處理製成生質顆粒燃料供應國內能源市場，不但提升剩餘資材再利用量能與效益，降低農民廢棄物處理成本，並為國內能源使用者提供環保低碳國產生質顆粒燃料，創造工業、農業與林業三贏永續發展新頁。

## 二、國內生質顆粒料源介紹

國內能源市場龐大，其中木質顆粒燃料於 2017 年進口約 217 萬噸，棕櫚殼進口 35 萬噸。經筆者統計國內文獻與統計資料，國內具能源應用潛力之農林剩餘資材，如廢棄菇包、稻草、稻殼、果樹廢枝條及漂流雜木等，年產量高達約 304 萬公噸（如表 1）（農委會，民 107；蔡佳儒等人，民 105；錢建嵩，民 105），相當於 2017 年生質燃料進口量之 1.2 倍。而上述農林剩餘資材經破碎、乾燥、造粒之加工，即可成為商業用生質顆粒燃料，提升國內生質顆粒供應量。

表 1 潛力能源應用農林剩餘資材產量  
(農委會, 民 107; 蔡佳儒等人, 民 105; 錢建嵩, 民 105)

項目	料源	產量 (公噸 / 年)	占比 (%)
農產剩餘資材	廢棄菇包	121,983	4.01
	稻草稻殼	2,339,755	76.91
	雜糧作物剩餘資材	259,591	8.53
	果樹剪定枝	256,732	8.44
林產剩餘資材	林木剩餘資材	312	0.01
	竹林剩餘資材	53,198	1.75
	漂流雜木	10,688	0.35
總計		3,042,259	100

上表 1 之料源中，已有文獻及數據證實廢棄菇包與竹屑具製成顆粒燃料之潛力 (Hiroshi YAGITA et al., 2017; 林裕仁, 2014)，因此筆者統計國內菇包顆粒燃料與竹屑顆粒燃料之特性，並與市售進口木質顆粒燃料進行比較 (如表 2)。由於國內針對生質顆粒燃料標準尚處於訂定階段未正式公告，因此先以德國木質顆粒燃料標準 DIN 51731 進行比較。以熱值而言菇包顆粒燃料熱值約為 4,468-4,620 kcal/kg (龍璞綠能, 民 108; 超吉公司, 民 108; 本團隊實測)；而竹顆粒燃料之熱值約為 4,100-4,300 kcal/kg (林裕仁, 民 103; Scurlock et al., 2000)；而進口木質顆粒燃料其熱值約為 4,200-4,800 kcal/kg (溢豐綠能, 民 105; 金鼎綠能, 民 109)，其三者熱質表現均不低於德國木質顆粒燃料標準 4,182-4,660 kcal/kg (German National Standard, 1996)，且熱值分析結果顯示，廢棄菇包與竹顆粒燃料熱值皆位於進口木質顆粒燃料熱值區間內，因此具取代進口木質顆粒燃料之潛力。而灰分部分，廢棄菇包顆粒燃料灰分約為 4.81-11.1%；而竹顆粒燃料之灰分 $<1.0\%$ ；而進口木質顆粒燃料其灰分約為 1.41-3.39%；而德國木質顆粒燃料標準則規範灰分 $<1.5\%$ ，其分析結果顯示僅竹顆粒燃料可完全符合德國木質顆粒燃料灰分標準，由於竹顆粒燃料屬於低灰分之燃料，工業應用上可降低灰渣處理成本，因此低灰分燃料也將取得較高市場價格，而廢棄菇包顆粒燃料與進口木質顆粒燃料亦可使用於國內生質燃料鍋爐，惟高灰分將提高爐渣產量，進而增加爐渣處理成本，以及增加爐體吹灰之清潔之工序。含水率部分，廢棄菇包顆粒燃料與進口木質顆粒燃料，皆低於德國木質顆粒燃料水分 ( $<12\%$ ) 之標準，然而竹顆粒燃料尚缺乏水分數據，但因含水率可透過乾燥製程進行調整，因此可將任一生質料源調整至符合能源應用需求條件。含硫量部分，廢棄菇包顆粒燃料含硫量約為 0.03-0.23%；而竹顆粒燃料之含硫量約為 0.03-0.05%，而進口木質顆粒燃料其含硫量約 $<0.1\%$ ；而德國木質顆粒燃料含硫量規範 $<0.08\%$ ，僅竹顆粒燃料之含硫量低於德國木質顆粒燃料含硫量標準，其餘料源之含硫量可能高於標準，但上述料源之含硫量仍低於甲種低硫

燃料油之 0.5 % 含硫量，顯示生質料源具備低含硫量之優勢。

針對上述燃料特性分析，其結果顯示菇包顆粒與竹顆粒可作為能源應用，其中竹顆粒具低灰分與低含硫量之高品質燃料特性，而菇包顆粒灰分與含硫量較高，採用時將負擔較高之灰渣處理成本，然而可製成生質顆粒燃料之料源不僅限於廢棄菇包與竹屑，未來不同料源經燃料特性分析後，亦可以複合料源形式進行燃料料源供應，增加料源穩定性與成分調整之彈性。

表 2 生質顆粒燃料成分特性分析

料源	熱值 (kcal/kg)	總灰分 (%)	含水率 (%)	含硫量 (%)	參考文獻
菇包 顆粒燃料	4,468-4,620	4.81-11.10	5.96-7.41	0.036-0.23	龍璞綠能，民 108 超吉公司，民 108 本團隊實測
竹 顆粒燃料	4,100-4,300	<1.0	-	0.03-0.05	林裕仁，民 103 Scurlock et al., 2000
進口木質 顆粒燃料	4,200-4,800	1.41-3.39	3.40-7.05	<0.1	溢豐綠能，民 105 金鼎綠能，民 109
德國木質 顆粒燃料標準 DIN 51731	4,182-4,660	<1.5	<12	<0.08	German National Standard, 1996

### 三、菇包顆粒燃料可行性評估

#### (一) 菇包顆粒燃料於 15 噸鏈排蒸汽鍋爐實際試燒成果

國內種菇產區集中且菇產能逐年提高，因此菇包顆粒燃料其料源充足及具高集中性，且經燃料特性分析有低硫高熱值之特性（徐英綺，民 108），故筆者輔導業者建置生質顆粒燃料生產系統，收取國內菇包進行菇包顆粒燃料應用，以 15 噸鏈排蒸汽鍋爐進行燃燒測試並將其底灰進行八大重金屬檢測。

將菇包顆粒燃料以 15 噸鏈排蒸汽鍋爐進行 8 小時試燒（如圖 1），並觀察於試燒過程中之燃燒狀態，可發現燃料能順利引燃且燃燒過程中未熄滅，其火焰、蒸汽產量及熱釋放率穩定，另可即時因應該工廠蒸汽量變化需求，維持 12 kg/cm<sup>2</sup> 蒸汽壓力。實測顯示每噸菇包顆粒燃料約可產生 5.6 噸蒸汽，以每噸蒸汽市場價格約為 700-1,000 元計算（蔡采蕓，民 106），每噸菇包顆粒燃料可創造 3,900-5,600 元收入。將試驗之燃燒底灰進行八大重金屬檢測（汞、砷、鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎘），其分析結果如表 3，由表中可得知其重金屬含量皆符合土壤管制標準，對土壤與生物無危害，並可提供植物生長所需微量元素如鈣、鎂等，有利於申請事業廢棄物個案再利用，將菇包顆粒燃料底灰應用於肥料，以期大幅降低灰渣處理成本，估計一年可節省 600 萬元灰渣處理費用（以 15 噸蒸汽鍋爐，每日運轉 24 小時計）。

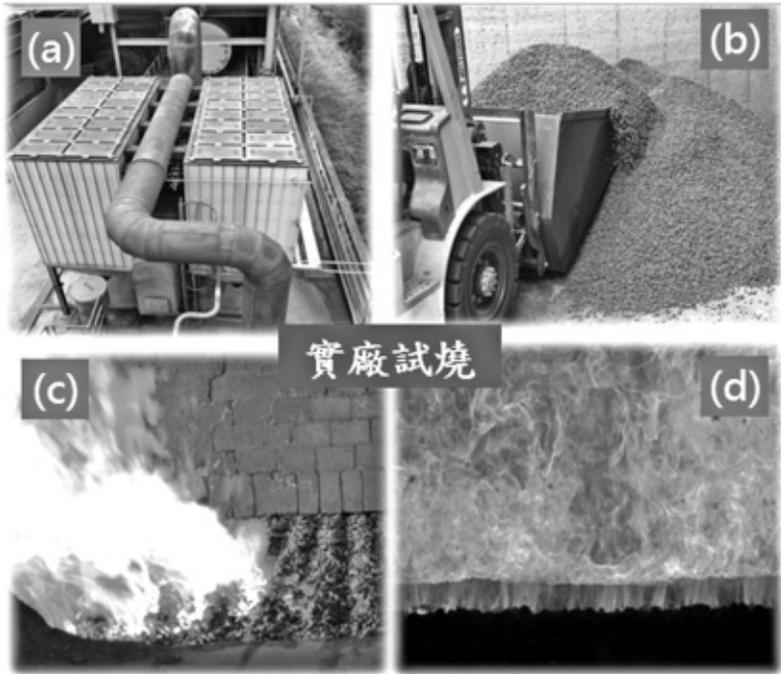


圖 1 菇包顆粒燃料實場燃燒測試

(a)於 15 噸鏈排蒸汽鍋爐試燒測試 (b)菇包顆粒燃料進料  
(c)鏈排鍋爐火焰側視實景 (d)鏈排鍋爐火焰前視實景

表 3 燃燒底灰之八大重金屬濃度 (ppm)

	汞	砷	鉛	銅	鉻	鋅	鎳	鎘
濃度	ND	ND	68	80	77	172	59	ND
土壤污染管制標準 (一般 / 食用作物農地標準)	20/5	60	2,000/500	400/200	450	2,000/600	200	20/5
備註	皆符合土壤管制標準，利於後續再利用。							

(二) 菇包顆粒燃料與重油及天然氣經濟效益比較

近年來因環保與空污問題，煤炭使用開始受到限制，因此許多燃煤業者評估更換燃料之可行性，因此以每小時 15 噸之蒸汽量及一年以運轉 360 天，每日運轉 24 時作為計算依據，菇包顆粒燃料、重油燃料及天然氣燃料之成本比較（如下表 4），表中計算成本包含燃料費、燃料運輸費、電費、人員操作、維護保養及底渣處理費等（不含燃料運輸費及空污相關設備處理費且不考慮熱傳及燃燒效率），使用菇包顆粒燃料年總成本為 8,959 萬元，每噸蒸氣成本為 691 元；採用天然氣年總成本為 12,851 萬元，每噸蒸氣成本為 992 元（皆不含天然氣管路設置費用）；採用重油總成本為 15,477 萬元，每噸蒸氣成本為 1,194 元，由分析可知菇包顆粒燃料相較天然

氣節省 30 % 能源成本，與中油相比節省能源成本 42 %（成本比較皆受當下公告之燃料價格影響）。顯示菇包顆粒燃料除具備環保與低成本之誘因，亦可為國內農林剩餘資材廢棄菇包、果樹修剪枝條等，創造能源應用之再利用管道，使產業發展與環境永續取得平衡。

表 4 菇包顆粒燃料與重油燃料及天然氣燃料成本比較表

	重油	天然氣	菇包顆粒燃料	參考資料 / 備註
燃料熱值 (kcal/kg)	9,840 <sup>(1)</sup>	9,900 <sup>(1)</sup>	4,234 <sup>(2)</sup>	(1) 中油燃料特性表 (2) SGS 檢測資料
年燃料 消耗量	8,401 (公秉 / 年)	8,116,364 (Nm <sup>3</sup> / 年)	18,978 (噸 / 年)	(1) 提供 15 噸蒸汽鍋爐所需之總 熱量 9.3 × 10 <sup>6</sup> kcal/hr (2) 以運轉 360 天，每日運轉 24 小時計。
燃料單價	17,538 <sup>(1)</sup> (元 / 公秉)	15.5 <sup>(2)</sup> (元 / Nm <sup>3</sup> )	4,000 <sup>(3)</sup> (元 / 噸)	(1) 重油以 2020 年 3 月 6 日中油 公告燃料油參考牌價（含貨 物稅）。 (2) 天然氣以 2019 年 12 月 2 日 欣雲天然氣公告氣價。 (3) 國內廠商提供。
燃料費 (萬元 / 年)	15,158	12,605	7,591	
總耗電功率 (kW)	40	15	40	
電費 (萬元 / 年)	104	39	104	每度電以 3 元計算
人員操作 (萬元 / 年)	203	203	203	以每班 8 小時，三班制，年薪 15 個月計
維護保養 (萬元 / 年)	10	5	8	
灰分 (%)	0.05 <sup>(1)</sup>	0	11.1 <sup>(2)</sup>	(1) 中油燃料特性表 (2) SGS 檢測資料
底渣處理費 (萬元 / 年)	2.1	0	1,053	(1) 底渣處理費以每噸 5,000 元計 (2) 重油比重為 0.972 噸 / 公秉
總成本 (萬元 / 年)	15,477	12,851	8,959	不含燃料運輸費及空污相關設備 處理費。
蒸汽成本 (元 / 噸)	1,194	992	691	

#### 四、生質顆粒燃燒設備介紹

生質顆粒燃料可直接應用於現行燃燒設備中，如：爐排鍋爐 (Stokers)、流體化床 (Fluidized-bed)；而粉煤鍋爐 (Suspension furnace) 為高熱釋放率載體，可採取生

質顆粒與煤炭進行混燒；部分中、小型重油鍋爐使用者（每小時蒸汽產量小於15噸），可採取更換生質顆粒燃燒機進行燃料調整。以下針對各式燃燒設備進行原理簡介，以及更換生質顆粒燃料燃燒系統參數調整建議，幫助業者使用生質顆粒可達到環保、低成本與高燃燒效能之目標。

### (一)生質顆粒燃燒機

生質顆粒燃燒機之開發為配合現行燃油鍋爐改燒生質顆粒燃料而產生，更換燃料過程為降低硬體更新成本，因此以更換燃燒機不更換爐體方式進行調整。而生質粒燃燒機構造類似小型爐排鍋爐，具備自動給料與除渣功能，而在燃燒機中僅進行燃料氣化，因此一次風機給風量僅維持生質顆粒氣化條件溫度（300-500℃），使生質顆粒氣化之可燃氣體結合二次空氣形成擴散火焰（diffusion flame），二次空氣供應形成之火焰為主要熱釋放區，產生熱能供應爐體進行熱交換產生蒸汽。

目前生質顆粒燃燒機以應用於臥式鍋爐為最大宗，當臥式鍋爐進行生質粒燃燒機更換時，需注意燃燒機與鍋爐是否匹配，因生質顆粒燃料熱釋放率較煤炭低，因此燃燒溫度較低使得熱傳效率較差，因此需增加傳熱面積以維持相同蒸汽供應量。若燃燒機具冷卻水迴路，可與鍋爐爐體串連，將燃燒機產生熱能回收，此配置類似節煤器，可用以提升鍋爐效率。

生質顆粒燃燒機一次空氣與二次空氣風量最佳化調整建議如下：一次空氣以維持燃燒機氣化室 300-500℃溫度為目標，當氣化室溫度超過目標溫度，則需下降一次風機進風量。固定一次空氣進風量後，進行二次空氣進風量調整，二次空氣進風量需提供可燃氣體燃燒所需空氣量，並避免過多過剩空氣降低爐體溫度，因此調整時可搭配爐體溫度與監測煙道氣體進行調整。實務上爐體溫度應高於燃燒機氣化室 150℃以上，避免燃料於氣化室完全燃燒，並維持高鍋爐效率。

### (二)爐排鍋爐 (Stokers)

爐排鍋爐 (Stokers) 為使用機械爐排餵飼燃料之鍋爐型式，機械爐排有：振動式爐排、鏈排式爐排與噴燒式爐排。振動式爐排鍋爐示意圖如下圖 2 所示，透過傾斜燃料床連接振動產生器產生週期性機械運動，將燃料往燃料床傾斜方向移動至燃燒室內，固體燃料經高溫氣化而產生燃燒反應，燃燒後殘餘爐渣藉由燃料床持續震動移出燃燒室，並將燃燒後爐渣排出，降低人力排渣與進料之成本。鏈排式鍋爐示意圖如圖 3 所示，利用循環連排將固體燃料輸送至燃燒室，完成燃燒反應後之灰渣由除渣板 (clinker dam) 刮除，至灰渣室集中。噴燒式爐排為擴散加煤機與振動式爐排或鏈排式爐排複合使用，擴散加煤機將固體燃料透過投擲轉子擊出 (overthrow rotor) (如圖 4 所示)，燃料擊出後將分佈於燃料床中開始進行燃燒反應，而透過震動式爐排或鏈排式爐排將燃燒灰渣移出燃燒室。

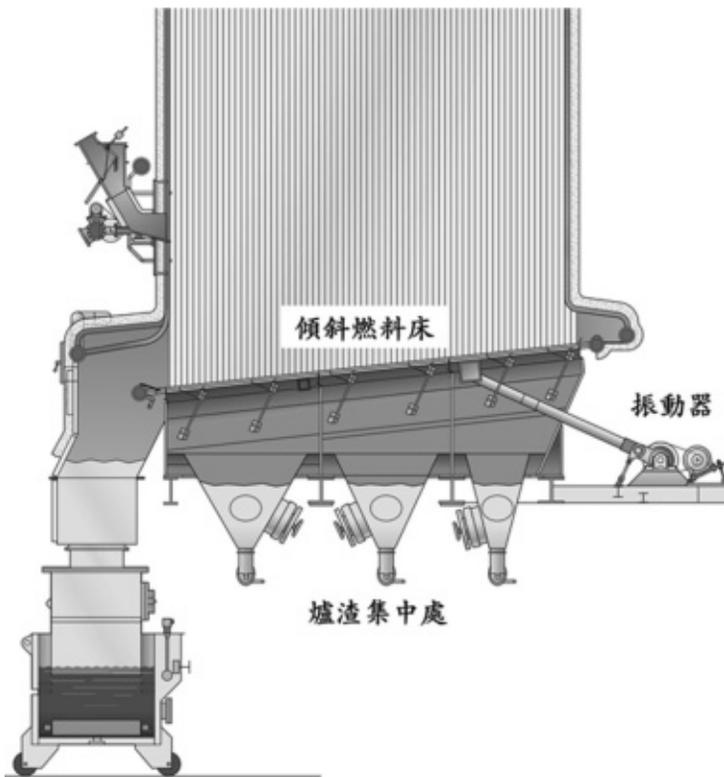


圖 2 振動式鍋爐示意圖 (J.B. Kitto et al., 2005)

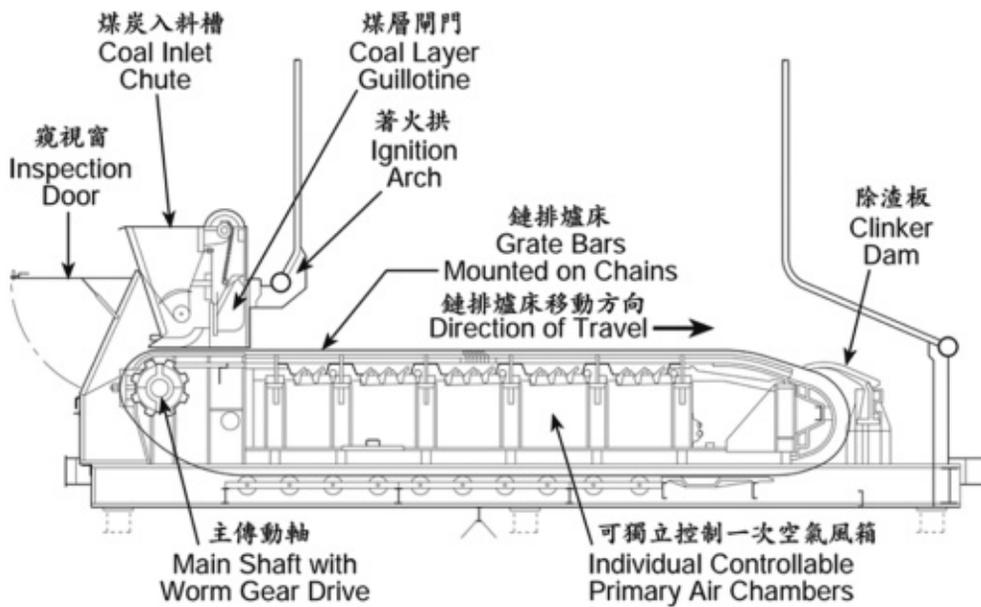


圖 3 鏈排式鍋爐示意圖 (J.B. Kitto et al., 2005)

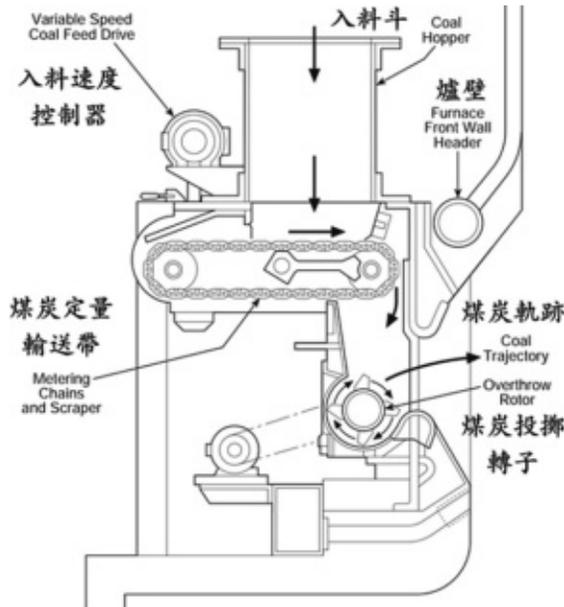


圖 4 噴燒式爐排擴散加煤機示意圖 (J.B. Kitto et al., 2005)

爐排鍋爐因燃燒系統單純，可使用固體燃料廣泛，如：煤炭、生質顆粒、木片、稻草、咖啡渣、果殼等。然而使用不同燃料時，因燃料熱質、含水量、密度、氣化速率不同，鍋爐系統控制參數將隨之調整，以維持所需輸出熱能。爐排鍋爐主要操控參數為：空燃比、燃料厚度、爐排移動速度（或震動頻率），以使用煤炭之爐排鍋爐改採生質顆粒燃料為例，以下提供各項控制參數調整建議：空燃比調整而言，一般理論上最佳空燃比為使燃料完全燃燒之空氣量，或稱定當量（Stoichiometry），然而實際燃燒系統操作上，因空氣與反應物並非完美混合，因此需提供過量空氣（excess air），幫助燃燒室內反應物完全燃燒。下表 5 所示為不同型式爐排鍋爐與不同燃料所需過剩空氣量，樹/樹皮為燃料之過剩空氣需求為 20-25 % (J.B. Kitto et al., 2005)，小於使用煤炭之 25-35 % (J.B. Kitto et al., 2005)，由於過剩空氣量降低，因此燃煤爐排鍋爐改採生質顆粒燃料時，可調降鼓風機轉速，避免過多過剩空氣降低燃燒室溫度，進而降低熱傳效率而產生熱損失。空燃比最佳化可透過調整鼓風機轉速，同時可監測煙道 CO 排放濃度與爐體溫度達成，當尾氣 CO 濃度提高，則進氣量過低需提升鼓風機轉速，當鼓風機轉速過高爐體溫度將降低，由此可達最佳進氣量。

表 5 不同型式爐排鍋爐與不同燃料所需過剩空氣量表 (J.B. Kitto et al., 2005)

	振動式鍋爐所需 過剩空氣 (wt %)	鏈排式鍋爐所需 過剩空氣 (wt %)	噴燒式爐排所需 過剩空氣量 (wt %)
煤炭	25-35	25-35	25-35
樹 / 樹皮	20-25	20-25	-

爐排鍋爐操作透過控制燃料進料厚度與爐排移動速度（或震動頻率）進行燃料進料量控制，若於相同燃料之使用情況下，進料量控制需依據每批燃料之熱值，進行微幅比例調整，然而當使用不同燃料時，燃料預熱溫度、揮發速率皆須列入考量。以無煙煤熱值為 7,100 kcal/kg，生質顆粒燃料熱質約為 4,200 kcal/kg 而言，若以燃料熱值角度計算，以生質顆粒燃料取代無煙煤，則進料量需提升 1.7 倍，方能滿足蒸發量所需熱供應量。進料速度之控制需考慮燃料預熱溫度與揮發速率，由於固體燃料之可燃物並無法馬上與氧氣結合，大多需經過熱裂解（pyrolysis）產生揮發氣體而離開固體燃料（devolatilization），而揮發氣體再與空氣結合形成擴散火焰，以煤炭而言溫度需達 700-900°C 方開始進行快速氣化反應，溫度達 900°C 以上可完全氣化（K.W. Ragland, 2011）；而生質顆粒燃料氣化溫度與煤炭差異甚大，半纖維素氣化溫度為 225-325 °C，纖維素氣化溫度為 325-375 °C，木質素氣化溫度為 300-500 °C（K.W. Ragland, 2011），簡言之以生質顆粒燃料而言 500 °C 以上可完全氣化，因此生質顆粒燃料於進入燃燒室中即快速氣化進行燃燒反應，因燃料須預熱時間短，因此爐排移動速度（或震動頻率）需提升，以免生質顆粒燃料於燃燒室前端即完成燃燒反應，造成熱能吸收不均而降低鍋爐效率。另一方面生質顆粒燃料氣化速率遠高於煤炭（K.W. Ragland, 2011），以上因素皆顯示使用生質顆粒燃料，相較於煤炭以較高之進料速度進行操作。而進料速度最佳化操控，可透過窺視孔觀察擴散火焰位置，是否位於鍋爐體熱交換管中央，進行控制。

### （三）流體化床燃燒法（Fluidized-bed combustion）

流體化床為利用固體顆粒沙床作為熱載體，因固體顆粒可提供優於氣體之熱傳速度，因此當燃料進入爐體內接觸固體顆粒，可快速到達氣化溫度而進行燃燒反應。當一次空氣由下而上穿過固體顆粒，並提供固體顆粒抬升力，當固體顆粒之重力與氣體抬升力達力平衡時，固體顆粒將產生懸浮。由於其過程為空氣通過固體顆粒沙床，使得沙床表面如同沸騰液體般，因而得名流體化床，流體化床示意圖如下圖 5 所示。大量之固體顆粒形成高熱容量沙床，因此當高含水量、低熱值燃料進入爐體，即可維持爐體氣化溫度，使流體化床具備高料源之接受度，可用於燃燒低級燃料、高含水率與高灰分之固體廢棄物。流體化床因透過加熱固體顆粒維持爐體溫度 800-950 °C（K.W. Ragland, 2011），因此可避免火焰高溫產生氮氧化物（Thermal NO<sub>x</sub>），並可透過固體顆粒中添加吸附劑（如：氧化鈣），降低硫氧化物（SO<sub>x</sub>）之產生，因此為許多大型能源系統與垃圾焚化爐所採用。

當使用不同燃料進行流體化床操作時，以維持爐體溫度與蒸氣壓力進行相關操作參數調整，當使用低等燃料（低熱質、高含水量）時需提升進料速率，並暫停沙床冷卻水系統，透過一次風送風量進行沙床溫度控制；使用高等燃料時，除啟動沙床冷卻系統外，因高等燃料氣化可燃氣體增加，需增加二次空氣進氣量，以達完全燃燒與高燃燒效能之目標。

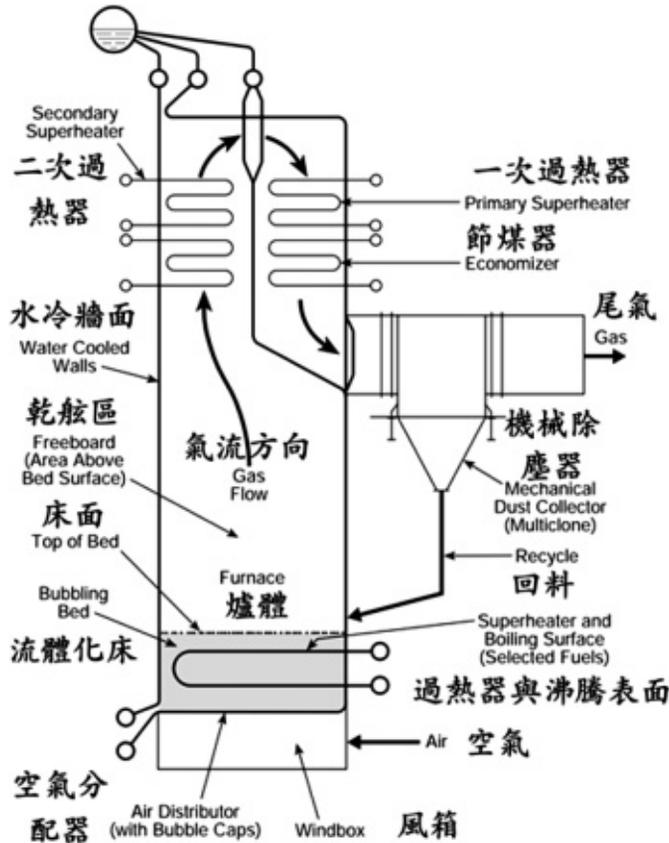


圖 5 流體化床示意圖 (J.B. Kitto et al., 2005)

#### (四)粉煤鍋爐 (Suspension furnace)

粉煤鍋爐為將固體燃料粉碎，並與空氣混合藉由燃燒機進行燃燒，如下圖 6 所示為粉煤噴嘴燃燒機，其燃燒機型式與氣體燃料類似，透過粉末狀之固體燃料，增加空氣與燃料接觸面積，並透過一次空氣預混提升燃燒效率。透過多組粉煤噴嘴燃燒器排列，可大幅提升熱釋放率，滿足每小時供應百噸級蒸氣量之目標，因此多為大型鍋爐與發電廠採用。此外透過燃燒器排列產生特定流場結構，如下圖 7 所示，增加氣體與流場擾動以外，更增加火焰與爐體傳熱接觸時間提升熱傳效率。

粉煤鍋爐多屬於大型熱能供應系統，為滿足高熱釋放率，因此多採用粉煤為原料，並搭配部分生質顆粒燃料混燒。為進行混燒，其生質顆粒燃料也需經過粉碎，以小顆粒型式隨一次空氣進入燃燒器中。懸浮爐所使用的粉煤為 200 目數 (mesh) 粒徑約  $75 \mu\text{m}$  (J.B. Kitto et al., 2005)，而煤因物理結構脆且可輕易粉碎，可符合前述規定，但木質顆粒燃料因具纖維質，難以破碎至此微小粒徑，又因其氣化溫度相較煤炭低，且氣化速率較煤炭高 (J.B. Kitto et al., 2005)，因此可採取較大之粒徑進行混燒。

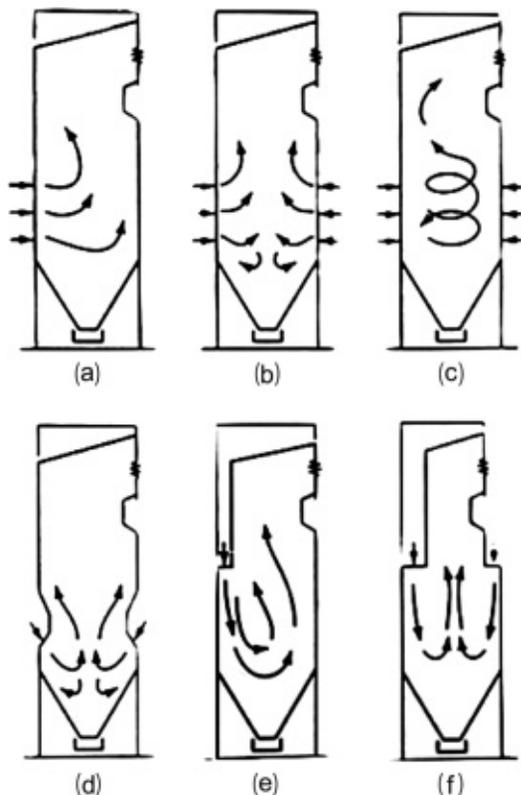


圖 6 粉煤噴嘴燃燒機示意圖  
(K.W. Ragland, 2011)

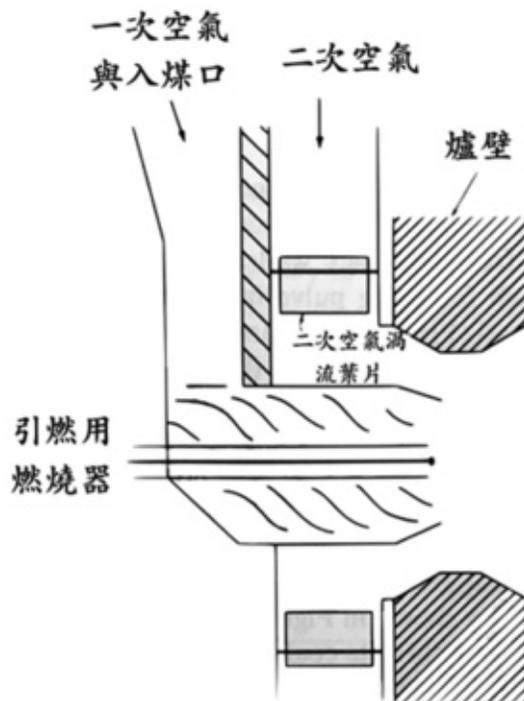


圖 7 懸浮爐不同火焰流場設計  
(K.W. Ragland, 2011)

## 五、結論

工業、農業與林業生產皆面臨廢棄物處理與污染物排放之環保挑戰，然而於生質能發展下，產業發展與環境永續將可同時並進，而國內農林剩餘資材進行生質燃料再利用即為最佳印證。經本篇分析國內農林剩餘資材具燃料供應潛力，如廢棄菇包與竹屑經燃料特性分析可作為商用生質燃料應用，因此輔導業者進行生質顆粒燃料生產，並將菇包顆粒燃料以 15 噸鏈排蒸汽鍋爐試燒，經實測蒸汽供應量可符合產能需求，且每噸菇包顆粒燃料約可產生 5.6 噸蒸汽，經濟效益極高。而經細部分析菇包生質燃料運轉成本，較天然氣節省 30 % 能源成本，與中油相比節省能源成本 42 %，極具經濟優勢。

目前國內生質顆粒燃料技術已可市場化，國內農林剩餘資材再利用法規也已放寬調整，因此筆者團隊希冀協助建立國內生質顆粒燃料產業鏈，並協助規劃相關政策配套提升生質顆粒燃料應用利基，期盼幫助國內產業以可負荷之成本使用更環保與環境永續的能源，並且幫助國內農林業創造衍生收益，與解決農林剩餘資材處理問題。

# 高壓鍋爐水側腐蝕原因及對策

李永海、盧彥良

寧夏吳忠市鍋爐壓力容器檢驗所

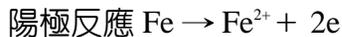
高壓鍋爐的給水經過預處理和離子交換等工藝過程後，水中的懸浮物、膠體及溶解性鹽類均已除去，但水中還溶解有少量氧氣和二氧化碳仍能引起鍋爐給水系統的腐蝕。腐蝕不僅造成經濟上的損失，同時腐蝕產物進入鍋爐水中，使水中雜質增多，加劇了鍋爐受熱面的結垢，影響其傳熱效果，並且還會促使水側的腐蝕。

## 一、高壓鍋爐水側腐蝕的原因

高壓鍋爐水側腐蝕主要有溶解氧腐蝕、沉積物腐蝕、酸性腐蝕、鹼性腐蝕、鹼性脆化腐蝕、銅氨化合物腐蝕、停用腐蝕、衝擊腐蝕等。下面就不同的腐蝕分析其原因。

### (一)溶解氧腐蝕

溶解氧腐蝕是一種電化學腐蝕，鐵和氧形成 2 個電極，組成腐蝕電池，電極反應如下：



在腐蝕電池中鐵的電位總是比氧的電極電位低，所以鐵是電池的陽極，而遭到腐蝕。由於這些生成物比較疏鬆，沒有保護性，一但在金屬表面的某一點發生腐蝕，就會持續下去。

究其原因：一方面是氧化鐵保護膜中產生的一種酸性溶液，加速了鐵的溶解；另一方面生成氧化鐵膜，腐蝕產物阻止了氧的擴散。在腐蝕產物下形成缺氧的陽極區，外部便形成了富氧的陰極區，從而構成了 1 個濃差電池。兩部分的差異，加速了腐蝕反應。溶解氧腐蝕隨著水中的溶氧量的增加和水溫的提高，腐蝕性也就愈強。當 pH 值小於 4 或大於 14 時，腐蝕會加大。當 pH 值小於 4 時，金屬表面不易形成保護膜；當水的 pH 值介於 4 和 9 之間時，金屬表面形成一種緻密的氫氧化物保護膜，所以腐蝕速度會降低；當 pH 值大於 14 時，由於  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  保護膜在鹼性溶液中溶解，腐蝕速度會重新上升。

在密閉的給水系統中或爐本體中，一般溫度越高，金屬的腐蝕速度越快。在敞開式系統中，水溫升高，水中氧的含量降低，因此氧在這種系統中對金屬的腐蝕速度大約在 80℃ 時最大。

水中離子的化學組成不同，溶解氧的腐蝕速度也有所不同。如水中含有  $\text{Cl}^-$  ( $\text{Cl}^-$  有破壞保護膜的能力)，因而會促進腐蝕。含有溶解氧的水進入鍋爐後，大部分的氧氣將閃化進入蒸汽，而在汽包的水線和給水進入汽包空間產生特定的孔蝕。另外後爐膛水冷壁也可能有嚴重的局部腐蝕。隨著給水速度的提高和鍋爐熱負荷的增加，溶解氧腐蝕也會隨之加劇。

## (二) 沉積物腐蝕

在正常的運行情況下，爐水的 pH 值保持在 9~11 之間，這時在金屬表面形成了一層緻密的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  保護膜，因此不會發生嚴重的腐蝕現象，但當鍋爐受熱面上沉積物存在時，因傳熱不良而使沉積物下金屬管壁的溫度升高，並使沉積物下的爐水蒸發濃縮，就會產生沉積物下的腐蝕。

從某電廠熱力設備的大修，檢查結垢、積鹽的形態、顏色、成分分析、腐蝕狀況來看，易發生沉積物腐蝕的部位主要是：汽包、二級過熱器、低溫再熱器。

1. 垢下酸性腐蝕，爐水中含有較多的強酸弱鹼鹽，如  $\text{CaCl}_2$  或  $\text{MgCl}_2$  等時，這些鹽類隨爐水不斷滲入沉積物下，被蒸發濃縮，發生水解反應：



生成物中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉積物，此時濃縮的爐水就形成了強酸 ( $\text{HCl}$ ) 溶液，沉積物下積累起濃度很大的  $\text{H}^+$ 。這樣，在沉積物下便發生了酸性水對金屬的腐蝕，陽極反應為  $\text{Fe} - 2\text{e} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ，陰極反應為  $2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$ 。由於陰極反應也是在沉積物下進行的，生成的  $\text{H}_2$  受到沉積物的阻礙不能很快擴散到水汽中去。當  $\text{H}_2$  越來越多時，就有一部分  $\text{H}_2$  向鋼組織的內部擴散，和金相組織中的滲碳體發生反應：

$\text{Fe}_3\text{C} + 2\text{H}_2 = 3\text{Fe} + \text{CH}_4$  造成了金相組織的脫碳，使金相的機械強度下降。另外生成的  $\text{CH}_4$  及  $\text{H}_2$  在金屬內部產生了巨大的壓力，使金屬組織產生了裂紋，最終使這部分金屬變脆。

2. 垢下鹼性腐蝕。當爐水中有較多碳酸鹽和磷酸鹽時，會產生游離  $\text{NaOH}$ ，爐水中的游離  $\text{NaOH}$  在沉積物下濃縮，可達到很高的濃度，這樣就使沉積物下的  $\text{OH}^-$  濃度與爐管中水汽混合去的  $\text{OH}^-$  濃度形成一個濃度差，相對來說，沉積物下的  $\text{H}^+$  濃度要比管內水汽中的  $\text{H}^+$  濃度低很多；又因沉積物下的金屬管壁的溫度相當高，使此處鐵的電極電位下降，於是，鐵易發生陽極反應： $\text{Fe} - 2\text{e} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ，在背火側因這裡管壁上沒有沉積物或沉積物最少，水汽中的  $\text{H}^+$  可在此進行去極化陰極反應： $2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$ ，生成了  $\text{H}_2$  沒有什麼阻擋直接被水汽帶走，所以  $\text{H}_2$  不會擴散進入金屬的內部。

鹼性腐蝕常發生在孔沉積物下麵，是由於沉積物下鹼性增強而產生的。腐蝕特徵是產生凹凸不平的腐蝕坑，坑上有腐蝕產物覆蓋，但坑下的金屬和機械性能沒有變化，故也稱延性腐蝕。

#### (三) 酸性腐蝕

在酸性水中，鐵與酸反應生成鐵離子並釋放出氫氣，同時氫原子與鋼中的碳反應生成 $\text{CH}_4$ ，脫碳會使金屬沿晶介面產生裂縫。鍋爐壓力在 $3.5\text{MPa}$ 以上時，氫離子會快速擴散進入金屬而使金屬變脆而損壞。 $\text{CO}_2$ 與蒸汽一起流經飽和蒸汽和過熱器管路、汽輪機，然後一部分被抽汽器抽走，另一部分溶入水中，形成 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 弱酸， $\text{H}_2\text{CO}_3$ 部分解析而產生 $\text{H}^+$ ，造成腐蝕。在以地表水作鍋爐補給水源時，會產生無機酸腐蝕。冷卻水因冷凝器水洩漏進入鍋爐後，爐水的 $\text{pH}$ 值會下降，形成酸蝕，特別是以揮發性處理的爐水，腐蝕會更加嚴重。一般給水 $\text{pH}$ 值在 $6\sim 7$ 之間時，碳鋼和銅合金將會受到嚴重的酸蝕，並破壞保護層。鍋爐酸洗不當，水處理樹脂再生異常，爐水中 $\text{Na}^+$ 和 $\text{PO}_4^{3-}$ 比例偏低，也會造成酸蝕。

#### (四) 鹼性腐蝕

遊離鹼會在多孔性沉積物和爐管金屬表面間濃縮，過度濃縮的鹼會溶解金屬保護膜而形成鐵酸根與次鐵酸根離子的混合物。此鹼腐蝕特別容易發生在傳熱量較大的地方和沉積物下。碳鋼與水接觸 $\text{pH}$ 值在 $8.5\sim 10.3$ 時，一般不會產生鹼性腐蝕。

#### (五) 鹼性脆化腐蝕

鍋爐金屬在殘留應力和水中苛性鈉（即 $\text{NaOH}$ ）介質的作用下，使受腐蝕的金屬發生脆化，發生脆性斷裂。形成鹼性脆化的主要原因有：

1. 鍋爐水中含有一定濃度的遊離 $\text{NaOH}$ ；
2. 金屬中存在很大的內應力或微裂紋；
3. 爐水中有爐水被濃縮的部位，如在鍋爐的鉚接處或脹接處。

這種腐蝕容易發生在鍋爐汽包的鉚接處或脹管口處，裂紋在鉚釘孔周圍呈放射狀。從金相組織上可見，裂紋是沿晶粒邊界進行的，所以使金屬變脆。

#### (六) 銅氨化合物腐蝕

在 $\text{pH}$ 值 $8.3$ 以上且含有溶解氧的情況下，氨會侵蝕以銅合金為材質的冷凝管，氨的來源主要有兩方面：脫氧劑和中和胺。

#### (七) 停用腐蝕

鍋爐停用時如不採取有效的保護措施，鍋爐水側的金屬表面會發生嚴重的停用腐蝕。產生停用腐蝕的原因主要有：

1. 水汽系統內部有氧氣。因為熱力設備停用時，水汽系統內部的壓力、溫度逐漸下降，蒸汽凝結，空氣從設備的不嚴密處大量滲入內部，氧溶解在水中。

2. 金屬表面潮濕，在表面生成一層水膜，或金屬浸在水中。因為設備停用時，有的設備內部仍然充滿水，有的設備停用時，雖然把水放掉了，但有的部位積存有水，這樣，金屬就浸在水中。積存的水不斷蒸發，使水汽系統內部濕度很大，這樣，金屬表面形成水膜。

#### (八) 衝擊腐蝕

1. 在冷凝水管中汽水混合流動速度變化激烈而在彎頭處沖刷管壁，引起沖刷處管壁變薄而導致破裂。
2. 水流流速高、流動紊亂和不斷形成湍流區的局部位置。
3. 除氧器位置太低，高溫水經給水泵會瞬間汽化，氣泡會使給水泵產生麻點般的穴蝕。

## 二、防治對策

### (一) 溶氧防治

1. 未除氧之前熱回收系統及管路，宜選擇耐腐蝕的金屬材料或保護塗層。
2. 配製合適的除氧器。常用的除氧器設備有真空除氧器、開放式除氧器、噴濕式除氧器，其中高壓鍋爐普遍採用噴濕式除氧器。
3. 採用化學除氧法。根據操作壓力和溫度，選用適當的除氧劑，一般高壓鍋爐宜選用不會增加溶存固體物的有機脫氧劑，通常選用聯氨  $N_2H_4$ ，由於聯氨毒性較高，現階段有機脫氧劑已漸漸使用較低毒性的脫氧劑代替聯氨，如對氧環己環、環己胺、乙二胺、對苯二酚、碳醯胍等。
4. 給水加氨 ( $NH_3$ ) 處理。通過加氨處理，提高給水的 pH 值應控制在 8.5~9.2 之間比較合適。

### (二) 沉積物腐蝕防治

1. 新裝鍋爐投入運行之前，必須先進行化學清洗。鍋爐運行之後，要定期清洗，以便能及時地除去金屬管壁上的沉積物和腐蝕產物。
2. 減少給水中的銅和鐵的離子含量。
3. 做好鍋爐的停用保護工作，防止停用腐蝕，以免爐管金屬表面上有腐蝕物附著。
4. 選用合適的爐水處理方式，調節爐水水質。

### (三) 酸性腐蝕防治

1. 裝設水質連續監控設備，隨時掌握水質的變化情況，以便及時採取必要的措施。
2. 添加中和胺等，抑制酸性腐蝕的發生。
3. 控制  $Na^+$  和  $PO_4^{3-}$  比例，防止酸性腐蝕。對 pH 和磷酸鹽加以控制。

### (四) 鹼性腐蝕防治

1. 嚴格控制 pH/ $PO_4^{3-}$  比例。

2. 使用適當的分散劑，以分散沉積物的產生。
3. 控制爐水遊離鹼，防止局部高濃度的遊離鹼的產生。

#### (五) 鹼性脆化腐蝕防治

1. 焊接代替脹接；
2. 保護鍋爐水的相對鹼度小於 0.2（相對鹼度 = 遊離 NaOH 量 / 總含鹽量）；
3. 選擇合理的鍋內水處理方法，協調 pH 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的量。

#### (六) 銅氨化合物腐蝕防治

1. 適當的殘餘量，以確保無溶解氧的存在。
2. 選擇熱安定性好的脫氧劑及中和胺，在飽和蒸汽中控制遊離氨在 0.3mg/L 以下。

#### (七) 停用腐蝕防治

1. 鍋爐水汽系統內部。
2. 降低水汽系統內部的濕度。如採用烘乾法、乾燥劑法等。
3. 加緩蝕劑，使金屬表面生成保護膜，或者加除氧劑，除去水中的溶解氧。

#### (八) 衝擊腐蝕防治

1. 在設計上盡可能地減少彎頭數和湍流區；
2. 改善除氧器和給水泵的位置

### 三、結束語

隨著現代化電廠大容量超高壓和亞臨界參數機組的不斷投運，熱力設備的腐蝕與防護問題越來越受到人們的重視，它直接關係到機組的使用壽命和運行可靠性。而高壓鍋爐水側腐蝕的成因錯綜複雜，如何做好高壓鍋爐水側腐蝕的防治，需要結合鍋爐的設計和運行工況，綜合分析腐蝕的根源，從溶解氧、pH 值、水溶液氧化還原電位、流速、溫度、熱負荷、水質、應力、金屬材料等諸方面著手，擬定一套行之有效的防治措施，才能確保高壓鍋爐的安全、穩定、經濟運行。

（摘自中國特種設備安全第 23 卷第 3 期）



▲ 甲級鍋爐模擬機具操作研習班

## 節能案例

〔資料來源：能源資訊網〕

◆ 廢熱回收			
行業別	不限	設備別	鍋爐系統
案例背景	某汽電廠有兩座鍋爐 90t/h×2 之連續排放水共有 1.8t/h，原設計經過閃沸槽，有回收閃沸蒸汽 0.8t/h 至脫氣塔當熱源使用及排放熱水入水溝 1.0t/h。		
建議措施	兩座鍋爐之連續排放熱水回收，以節約能源及用水。		
建議說明	<p>1. 建議兩座鍋爐之連續排放的最後排放熱水流至冷凝水槽（1.0 t/h × 172°C × 174.1 kcal/kg），此熱水可與超純水熱交換而回收熱源，以減少鍋爐飼水的加熱蒸汽量（即節省鍋爐燃煤量），冷卻後的水與純水混合去製造超純水，以減少純水製造量。</p> <p>（雖然該廠有將此熱水供應 FGD 系統泡製氫氧化鎂，但是很難操作平衡，還是先回收入冷凝水槽內，如有必要也可供應 FGD 系統泡製氫氧化鎂）</p> <p>2. 節省鍋爐燃煤計算：  <math>1.0\text{t/h} \times 1,000\text{kg/t} \times 8,200\text{h/年} \times 174.1\text{ kcal/kg (熱水焓)} - 25.1\text{ kcal/kg (超純水焓)} \div 6,200\text{ kcal/kg (煤熱焓)} \div 91\% (\text{鍋爐效率}) \times 2.2\text{ 元/kg (煤價)} = 471,239\text{ 元/年}</math></p> <p>3. 減少純水製造量計算：  <math>1.0\text{ t/h} \times 22\text{ 元/t (純水成本)} \times 8,200\text{ h/Y} = 180,400\text{ 元/年}</math></p> <p>4. <math>471,239\text{ 元/年} + 180,400\text{ 元/年} = 651,639\text{ 元/年}</math></p>		
預計效益	<p>1. 直接效益：節省燃料油  <math>1.0\text{ t/h} \times 1,000\text{ kg/t} \times 8,200\text{ h/年} \times 174.1\text{ kcal/kg (熱水焓)} - 25.1\text{ kcal/kg (超純水焓)} \div 9,800\text{ kcal/kg (油熱焓)} \div 91\% (\text{鍋爐效率}) \div 1,000\text{ L/kL} = 137.0\text{ kL}</math></p> <p>2. 投資費用：增設熱交換器和配管及保溫工程費用 = 424,000 元</p> <p>3. 回收年限：<math>424,000\text{ 元} \div 651,639\text{ 元/年} = 0.65\text{ 年}</math>。</p>		