

# 蒸汽鍋爐高效率作業技術手冊

中技社節能技術發展中心

中華民國八十九年十月

## 目 錄

|                   |    |
|-------------------|----|
| 一、前言.....         | 1  |
| 二、鍋爐性能研判基準.....   | 3  |
| (一)負載及效率定義.....   | 3  |
| (二)燃料及燃燒特性.....   | 4  |
| 三、高效率鍋爐作業.....    | 10 |
| (一)設備影響效率項目.....  | 11 |
| (二)操作影響效率項目.....  | 13 |
| 四、智慧型鍋爐功能.....    | 15 |
| (一)監管系統程序模式.....  | 15 |
| (二)監管系統改善應用.....  | 23 |
| 五、蒸汽鍋爐特性.....     | 26 |
| (一)蒸汽鍋爐作業現況.....  | 26 |
| (二)蒸汽鍋爐作業案例.....  | 31 |
| 六、日本鍋爐作業規範.....   | 36 |
| (一)能源使用合理化要項..... | 36 |
| (二)鍋爐作業基準和目標..... | 39 |
| 七、替代燃料鍋爐系統.....   | 41 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| (一)混合燃燒鍋爐之發展..... | 41 |
| (二)製造業廢熱鍋爐實例..... | 44 |
| 八、結論.....         | 48 |
| 九、編後語.....        | 50 |

## 一、前言

我國因無自產能源，在力求經濟成長之同時，尤其應該警覺到能源的重要性，除積極謀求開發新替代方案外，更要提升能源的使用效率。工業化的結果，蒸汽成為最主要的熱動力來源，能源危機以後，鍋爐製造大都在能源效率方面力求改進。目前國內工業鍋爐產生中、低壓蒸汽以供製程加熱，使用燃料以燃料油居多，構造主要分為煙管及水管型式。一般鍋爐在不同負載操作狀況下，空氣比值相異以致效率有別。改善鍋爐效率須因應製程需量變化，掌握鍋爐系統各裝置的功能限制，所以負載範圍內之操作條件分析必須逐一完成。出入熱法和熱損失法的合併應用，不但可協助了解系統的特性，還能依據充分的測試數據，探討設備的損壞及缺失，再藉由電腦程式模擬研判燃燒及熱傳動力，進一步從操作調整的手段進行效率提升。

有鑑於公設電廠備載容量不足，產業自設汽電共生廠除能抑低尖峰用電壓力，避免限電的生產損失外，更能獲得售電收益。欲使產業能源使用效率提升，故推行合格汽電共生系統，評估能源效率指標為總熱效率和有效熱能產出比率，以達到減輕設置大規模電廠負擔的目的。汽電廠設置以高壓蒸汽為使用條件，大規模市場採用蒸汽渦輪機發電，目前能源消費成本訴求選擇燃煤鍋爐為主，因熱電需求不同使總熱效率及有效熱能產出比變化極大。汽電共生系統的設置對產業界而

言有經濟利益之正面效果，但對燃料的節省方面，仍有改善鍋爐效率的空間。

當前國際面臨的環保問題之一是要將溫室氣體的濃度，穩定在一個不會危及大氣系統的水平。締約國會議已訂定具有法律效力之溫室氣體減量議定書，管制時程將以2010年為減量目標年。在「氣候變化綱要公約」列管氣體中，使用能源排放的二氧化碳列為主要管制項目，預料該公約將對產業經濟造成強力的衝擊，使得工業體系變革勢在必行。目前各國務實的作法和減量原則多為強調節約能源、提高能源使用效率、燃料替換和再生能源的利用等。再生能源方面僅以生活週遭所見，利用廢棄物當比其他自然能源實際而迫切。產業選擇減廢、再製的投資及技術之後，多數有機可燃性廢棄物採焚化方式處理，是目前國內唯一的出路。廢棄物處理如欲兼得能源、二氧化碳減量的最佳效益，則廢熱鍋爐的燃料混燒、燃燒效率、廢熱回收等，均是較為重要的應用技術項目。

產業能源消費方面，依據能源委員會1996年能源平衡表，工業部門消費燃油佔工業總能源81.8%，扣除工業爐消費量，其中79.7%可視為投入鍋爐。工業部門消費燃煤佔總進口量22.6%，扣除工業爐消費量，其中49.0%將投入鍋爐。發電部門1996年投入燃油燃煤是工業部門鍋爐能源之2.5倍。

產業經濟產值方面，經濟部工業統計調查聯繫小組1995年統計95,941家報告，正常營運廠數81,982家，產品總銷售金額新台幣5.14兆元。從工業總產值和能源(不含發電部門)比例計算，鍋爐燃料熱約提供產值791元/L燃料油。

溫室氣體排放方面，環保署"因應氣候變化綱要公約資訊速報8"顯示，我國1996年工業部門使用燃料及電力排放CO<sub>2</sub>量佔全國總量52%。依據IPCC計算燃料排放CO<sub>2</sub>建議轉換係數，則工業部門鍋爐年排放量佔能源排放CO<sub>2</sub>工業總量24.1%，全國總量12.6%。其中工業部門之燃油鍋爐排放量佔能源排放CO<sub>2</sub>工業總量15.7%，全國總量8.2%。

基於蒸汽鍋爐、發電鍋爐、廢熱鍋爐在製造業大量的應用，能源、環保、經濟訴求又是如此之高，所以本文以鍋爐之操作、調整、監管技術作為指引重點。

## 二、鍋爐性能研判基準

### (一)負載及效率定義

#### 1.鍋爐容量： $Q_{max}=[S_{tm}*(H_{stm}-H_{wat})]d_{sn}$

以539kcal/kg蒸發熱表示相當蒸發量，當產出蒸汽條件偏離1atm、100 愈多時，愈難代表鍋爐真正容量。本文取常溫給水和設計溫度壓力蒸汽熱焓差距下，額定蒸汽產量所載熱能之最大負載量定義為鍋爐容量。

2.鍋爐負載： $Load=[Stm*(Hstm-Hsat)+Wat*(Hsat-Hwat)]/Qmax$

具有節熱器的場合鍋爐給水已獲得部份燃氣熱能，在實際給水溫度和操作蒸汽溫度壓力之熱焓差距下，產生蒸汽量所載熱能加上洩放水量所載熱能是實際換熱量。其與鍋爐容量之熱能比值定義為鍋爐負載。

3.燃料熱量： $Qin=Fuel*NHV$

燃料燃燒生成氣所載熱能為實際釋放熱量，以總發熱值為基準計算各階段燃氣的溫度時，對於含濕份較高的燃料將出現明顯的誤差。淨發熱值意指已扣除燃料內含水份汽化及氫元素氧化所吸收熱量，計算燃氣溫度平衡時較能符合反應現象，因此取淨發熱值和實際燃料量之乘積定義為鍋爐燃料熱量。

4.鍋爐效率： $b=Stm*(Hstm-Hwat)/Qin$

鍋爐本體換熱量加上節熱器換熱量是鍋爐負載熱量，扣除洩放水量所載熱能才是有效產出熱量，其與燃料熱量比值定義為鍋爐效率。由於投入燃料熱量扣除有效產出熱的無效熱量就是能源損失，加總所有的損失熱量其與總投入熱量的差值也能計算鍋爐效率。

## (二)燃料及燃燒特性

### 1.燃料之熱值

燃料油方面，依據1999年4~6月取樣18筆檢驗分析報告，結果顯示我國低硫燃料油組成差異不大，除含硫份區分0.5%及1.0%外，約含碳87%、氫12%，淨發熱值約10,000kcal/kg，比IPCC所取9,600kcal/kg可提高幅射熱傳能力甚多。影響燃燒效率的因素首重燃燒器操作條件，燃料霧化粒徑需要適當的爐膛滯燒時間，以達到粒徑燃盡的效果，供給適當過量空氣才能確保氧化反應完全。IPPC採多國燃料燃燒數據，以線性迴歸方法計算燃料油之碳元素氧化率為99%，換算我國燃料熱值相當於燃燒效率99.3%。

燃料煤方面，進口因產地及價格不同，業界使用的品質差異很大，一般而言表層水5~8%、內含水3~4%、揮發份25~35%、固定碳40~50%、灰份12~20%、熱值6,000~6,800kcal/kg。粉煤或塊煤因前處理程序不同，進料時可燃份組成和熱值會因表層水份變化而調整。

表2.1. 我國燃料熱值比較

| 燃料<br>類別 | w.t% (濕基) |      |      | 熱值                      | 淨發熱量    |
|----------|-----------|------|------|-------------------------|---------|
|          | C         | H    | C/H  | **                      | Kcal/ka |
| 液化天然氣    | 66.4      | 20.8 | 3.2  | 9900kcal/m <sup>3</sup> | 12400   |
| 柴油       | 83.2      | 12.8 | 6.5  | 8800kcal/L              | 10300   |
| 0.5%S燃料油 | 87.4      | 11.8 | 7.4  | 9400kcal/L              | 10000   |
| 1.0%S燃料油 | 86.8      | 11.9 | 7.3  | 9200kcal/l              | 10000   |
| 燃料煤      | 66.0      | 4.4  | 14.9 | 6400kcal/kg             | 6200    |

資料來源:中油公司及產業檢測數據.\*\*\*"臺灣能源平衡表",能源委員會 2000/4.



表2.2. IPCC建議燃料特性值

| 燃料類別      | 煤炭      | 燃料油   | 柴油    | 天然氣                 |
|-----------|---------|-------|-------|---------------------|
| 熱值單位      | kcal/kg |       |       | kcal/m <sup>3</sup> |
| 總發熱量(GHV) | 6483    | 10104 | 10804 | 12485               |
| 淨發熱量(NHV) | 6159    | 9599  | 10349 | 12137               |
| 碳元素氧化率    | 0.98    | 0.99  | 0.99  | 0.995               |

資料來源：1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

## 2. 燃料燃燒氣之O<sub>2</sub>

燃燒氣組成分析第一項值得注意的是排氣含O<sub>2</sub>%，一般從氣體分析儀測得的O<sub>2</sub>%值是濾掉冷凝水份乾基狀態，實際濕基O<sub>2</sub>%值比較低，約是檢測值的83~92%，這一點在調整到低過量空氣比時不得不謹慎，以免燃料燃燒不完全。一般選擇簡易公式換算空氣比和排氣含O<sub>2</sub>%的關係，忽略助燃空氣中微量H<sub>2</sub>O直接定義空氣比=21/(21 - O<sub>2</sub>%\*100)實則無誤，問題還是出在O<sub>2</sub>%取儀測乾基值，實際濕基空氣比值約是檢測值的93~98%。這個結果意指使用空氣比值表示過量空氣，比用排氣含O<sub>2</sub>%值引發的爭議小很多，也許就是日本訂定鍋爐能源使用合理化作業規範中採用空氣比值的原因。

表2.3. 燃料燃燒氣之摩爾氧量及空氣比值

| 燃料          |     | 排氣含O <sub>2</sub> % |       |       | 燃燒空氣比 |       |       |
|-------------|-----|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 檢測值(乾基)     |     | 3.0%                | 5.0%  | 7.0%  | 1.17  | 1.31  | 1.50  |
| 實際值<br>(濕基) | 天然氣 | 2.5%                | 4.2%  | 6.0%  | 1.14  | 1.25  | 1.40  |
|             | 燃料油 | 2.6%                | 4.5%  | 6.3%  | 1.14  | 1.27  | 1.43  |
|             | 燃料煤 | 2.7%                | 4.6%  | 6.4%  | 1.15  | 1.28  | 1.44  |
| 實際值/檢測值     |     | 86.7%               | 88.7% | 89.0% | 97.7% | 96.7% | 94.9% |

### 3. 燃料燃燒氣組成

各種燃料組成中由於C、H含量不同，燃燒反應所需要的理論空氣量會有差異，燃料物性、形狀導致燃燒反應速率的不同進一步影響過量空氣需求量。即使以理論空氣量參與燃燒反應，當氧化反應完全時，空氣質量流率仍然高達燃料質量流率的10倍以上，約是天然氣的15倍、燃料油的14倍、燃料煤的11倍，這個數據意指空氣扮演著極為穩定的熱載體角色，O<sub>2</sub>參與放熱反應不是熱載體，實際上由燃燒氣中佔70~75%摩爾百分比的N<sub>2</sub>發揮功能。

天然氣和燃料油燃燒氣中H<sub>2</sub>O的摩爾生成量幾乎完全受燃料中H含量影響，燃料煤燒氣中H<sub>2</sub>O的摩爾生成量則深受燃料H<sub>2</sub>O份影響遠甚於H份影響。從燃燒氣組成分析H<sub>2</sub>O的摩爾百分比，天然氣約16%、燃料油約11%、燃料煤約9%，吸熱成熱載體後始終處於氣體狀態，因為沒有釋出潛熱的機會所以提供鍋爐換熱的功能有限。

表2.4. 天然氣之燃燒氣摩爾組成

| O <sub>2</sub> %檢測值(乾基) |                  | 3.0%  | 5.0%  | 7.0%  |
|-------------------------|------------------|-------|-------|-------|
| 實際值(濕基)                 | N <sub>2</sub>   | 70.9% | 71.5% | 72.2% |
|                         | CO <sub>2</sub>  | 8.9%  | 8.1%  | 7.2%  |
|                         | H <sub>2</sub> O | 17.7% | 16.2% | 14.6% |

表2.5. 燃料油之燃燒氣摩爾組成

| O <sub>2</sub> %檢測值(乾基) |                | 3.0%  | 5.0%  | 7.0%  |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-------|
|                         | N <sub>2</sub> | 73.6% | 74.0% | 74.4% |

|  |     |       |       |      |
|--|-----|-------|-------|------|
|  | CO2 | 11.9% | 10.7% | 9.5% |
|  | H2O | 11.8% | 10.8% | 9.8% |

表2.6. 燃料煤之燃燒氣摩爾組成

|            |     |       |       |       |
|------------|-----|-------|-------|-------|
| O2%檢測值(乾基) |     | 3.0%  | 5.0%  | 7.0%  |
| 實際值(濕基)    | N2  | 73.5% | 73.9% | 74.4% |
|            | CO2 | 14.2% | 12.7% | 11.2% |
|            | H2O | 9.5%  | 8.7%  | 7.9%  |

#### 4.燃料燃燒氣溫度

取常態環境條件及以燃燒氣濕基3.5%O2作為助燃空氣基準，分析燃料燃燒氣組成載熱能力，首先比較不同溫度下主要成份的比熱值，對應溫度均幾近於線性關係增加。大摩爾比例的N2與其較為穩定的比熱相乘積代表燃燒氣整體摩爾比熱變化有限，天然氣、燃料油、燃料煤之燃燒氣在鍋爐換熱全程200~1,400 可能範圍，一次方溫度效應使摩爾比熱維持在7.7~9.3kcal/kgmolK以內。當二次方溫度函數的摩爾熱焓值被使用於熱載量計算時，摩爾熱焓值約在3,650~15,700kcal/kgmol間。這個結果意指燃燒氣載熱量大小將敏感的反應在溫度上，所以燃料燃燒釋出的淨發熱量才能平衡各階段換熱後溫度檢測值，而且助燃空氣也提供了熱量參與燃燒反應，25 環境溫度 3.5%O2排氣含氧狀況下，其所載熱量約2,084kcal/kgmol應該不計算於排氣熱損失中。

表2.7. 燃料燃燒氣組成之摩爾比熱值

| 主要成份    |      | O2              | N2  | CO2  | H2O  |
|---------|------|-----------------|-----|------|------|
| 氣體溫度( ) |      | 比熱(kcal/kgmolK) |     |      |      |
| 參考      | 25   | 7.0             | 7.0 | 8.9  | 8.0  |
| 燃燒位置    | 1400 | 8.8             | 8.3 | 14.0 | 11.4 |
| 爐膛位置    | 800  | 8.2             | 7.8 | 12.6 | 9.9  |
| 排氣位置    | 200  | 7.5             | 7.2 | 10.9 | 8.6  |

表2.8. 濕基3.5%O2燃燒氣之摩爾比熱及摩爾熱焓值

| 比熱及熱焓   |      | Cp (kcal/kgmolK) |     |     | H(kcal/kgmol) |       |       |
|---------|------|------------------|-----|-----|---------------|-------|-------|
| 氣體溫度( ) |      | 天然氣              | 燃料油 | 燃料煤 | 天然氣           | 燃料油   | 燃料煤   |
| 空氣      | 25   | 7.0              | 7.0 | 7.0 | 2084          | 2084  | 2084  |
| 燃燒位置    | 1400 | 9.3              | 9.3 | 9.4 | 15629         | 15617 | 15706 |
| 爐膛位置    | 800  | 8.6              | 8.6 | 8.6 | 9194          | 9216  | 9276  |
| 排氣位置    | 200  | 7.7              | 7.7 | 7.8 | 3647          | 3660  | 3681  |

## 5.燃料燃燒之SO2

我國燃料油分0.5%S及1.0%S等級，與1987年含硫2.0%、1990年含硫1.5%之燃料油相較，燃氣中硫氧化物較少所以露點溫度也低，露點限制的放寬可以提高尾氣熱回收能力很多。天然氣可被視為不含硫份。燃料煤之含硫份受不燃份稀釋，重量百分比1.0%S已屬相當高的品質，只有可燃成份參與反應得到的燃燒氣，SO2%含量大幅度提高正常約在760~850ppm間，因此均配置脫硫設備以避免環境污染。

從燃燒氣組成分析SO2含量是很值得注意的，一般從氣體分析儀測得的SOx值是濾掉冷凝水份的乾基狀態，此過程導致部分SOx隨抽氣管中冷凝水析出，燃氣中硫氧化物檢測值比較低，約是實際值的60%~

80%，SO<sub>2</sub>濃度在考慮設計換熱器回收廢熱時不得不謹慎，以免露點效應腐蝕管材。過量空氣比值變化對燃燒氣SO<sub>2</sub>濃度具有極大的影響力，過量空氣增加的N<sub>2</sub>發揮稀釋SO<sub>2</sub>濃度的功能，濕基O<sub>2</sub>值從3.0%上升到7.0%時足可降低SO<sub>2</sub>濃度22.8%，這種情形經常出現在低負載操作的燃油蒸汽鍋爐。增加空氣比雖然能使排氣熱回收裝置避免露點腐蝕的寬裕度更大，可是直接增耗能源降低鍋爐效率，經濟上並不合算。唯在流體順向換熱設計熱回收裝置的場合，有時必須考慮這項操作技巧。另外以蒸汽先加熱常溫給水再泵入節熱器的場合，適切增加空氣比可以考慮切斷預熱用蒸汽，減少無效熱能損失率。

表2.9. 燃料燃燒氣之摩爾硫氧化物量

| 燃料wt%S   | O <sub>2</sub> %濕基值  | 3.0%   | 5.0%   | 7.0%   |
|----------|----------------------|--------|--------|--------|
| 燃料油0.5%S | SO <sub>2</sub> %濕基值 | 0.025% | 0.022% | 0.020% |
| 燃料油1.0%S |                      | 0.051% | 0.045% | 0.039% |
| 燃料煤1.0%S |                      | 0.085% | 0.076% | 0.066% |

## 6. 燃料油燃燒氣之露點

依據Walter R. Niessen, "Combustion and Incineration Process"，SO<sub>2</sub>至SO<sub>3</sub>的轉化率在2.5 ~ 3.5%之間，我國低硫燃料油在不同空氣比狀態下燃氣之露點範圍，以及燃氣側熱管中心和內壁之溫度差，顯示可能造成腐蝕的燃氣露點上限對於0.5%燃料油約95℃，對於1.0%燃料油約120℃。因此回收廢熱裝置可以考慮適當的最終排放燃氣溫度，對

於0.5%燃料油在130 以上，對於1.0%燃料油在160 以上，最重要的是燃氣熱回收裝置不可用安全係數採過大設計。

表2.10. 我國0.5%含硫燃料油燃氣露點作業範圍

|           |      |         |         |         |         |         |
|-----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 排氣<br>Oe% | 排氣溫度 | 110     | 120     | 130     | 140     | 150     |
|           | 內壁溫度 | 82      | 88      | 95      | 102     | 108     |
| 3.0%      | 上下限  | 95 ~ 73 | 94 ~ 73 | 94 ~ 72 | 93 ~ 72 | 92 ~ 72 |
| 5.0%      | 上下限  | 92 ~ 71 | 91 ~ 71 | 91 ~ 71 | 90 ~ 70 | 90 ~ 70 |
| 7.0%      | 上下限  | 89 ~ 69 | 88 ~ 69 | 88 ~ 69 | 87 ~ 69 | 87 ~ 68 |

表2.11. 我國1.0%含硫燃料油燃氣露點作業範圍

|           |      |          |          |          |          |          |
|-----------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 排氣<br>Oe% | 排氣溫度 | 140      | 150      | 160      | 170      | 180      |
|           | 內壁溫度 | 102      | 108      | 115      | 122      | 128      |
| 3.0%      | 上下限  | 118 ~ 87 | 117 ~ 86 | 116 ~ 85 | 115 ~ 85 | 114 ~ 84 |
| 5.0%      | 上下限  | 112 ~ 83 | 111 ~ 83 | 110 ~ 82 | 109 ~ 82 | 108 ~ 81 |
| 7.0%      | 上下限  | 107 ~ 80 | 106 ~ 79 | 105 ~ 79 | 104 ~ 78 | 103 ~ 78 |

## 7. 燃料燃燒之CO<sub>2</sub>

第三屆「氣候變化綱要公約」締約方會議，以2010年前後為溫室氣體減量目標管制時程。主要抑制對象在化石能源燃燒所排放的二氧化碳，我國政府於1998年發佈能源新政策，推動國內企業廠商參與抑制溫室氣體排放改善工作。鍋爐排放CO<sub>2</sub>量與燃料燃燒發生直接關係，最有利的解決方案就是提高能源使用效率，進一步措施是低碳燃料的替代，因此有必要了解各種燃料燃燒排放CO<sub>2</sub>的換算方式。

表2.12. 我國燃料排放二氧化碳值

|      |            |   |
|------|------------|---|
| 數據來源 | IPCC統計燃料 * | 國內燃料 #                                  |
| 燃料特性 | 碳排放因子      | ton CO <sub>2</sub> /10 <sup>12</sup> J |
|      |            | CO <sub>2</sub> 淨排放換算                   |

|     |      |      |      |                       |
|-----|------|------|------|-----------------------|
| 天然氣 | 15.3 | 55.8 | 49.0 | 2.0 kg/m <sup>3</sup> |
| 柴油  | 20.2 | 73.3 | 70.0 | 2.6 kg/L              |
| 燃料油 | 21.1 | 76.6 | 75.8 | 3.0 kg/L              |
| 燃料煤 | 25.8 | 92.7 | 89.4 | 2.4 kg/kg             |

資料來源:\* 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

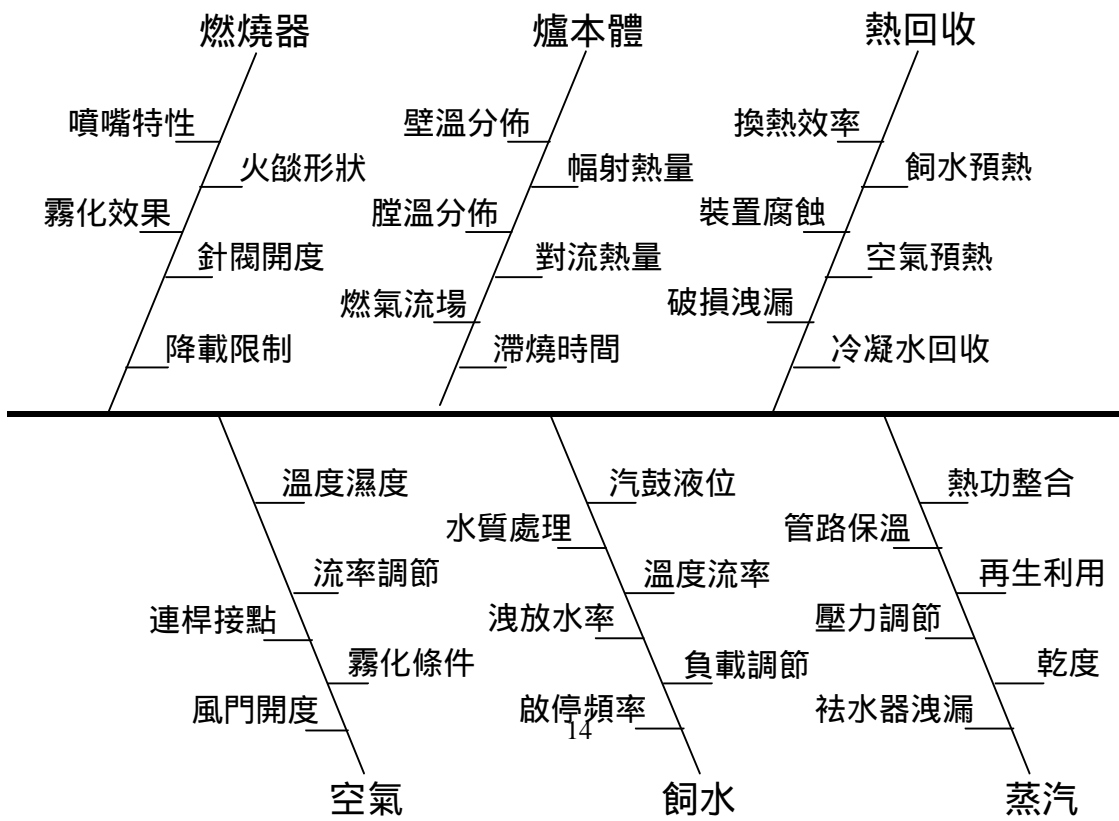
#中技社節能技術發展中心.



### 三、高效率鍋爐作業

通常新鍋爐驗收的功能測試基準與實際作業條件並不一致，即使高效率鍋爐產品也可能發生低效率運轉結果，其原因在於整體系統整合功能不理想，燃料、給水、空氣、蒸汽、洩放水、冷凝水等相關系統的處理裝置、管理控制、回收利用等都會影響鍋爐系統效率。以成本經濟為訴求的高效率不再只針對鍋爐本體，整體系統作業應該是關注對象，換言之，因應高油價或高價燃料時代的來臨，可折舊的鍋爐初設固定成本將愈不及長期的燃料使用變動成本重要。所以欲達到高效益目標，除了在選購鍋爐系統設備方面能符合高效率的需求，系統運轉操作條件方面也應該給予適當的調整。影響鍋爐系統效率的相關作業項目圖示如下，行業別使用蒸汽的環境差異很大，整體系統提升效率的細節必須個案探討，重點項目可分設備和操作部分說明於後。

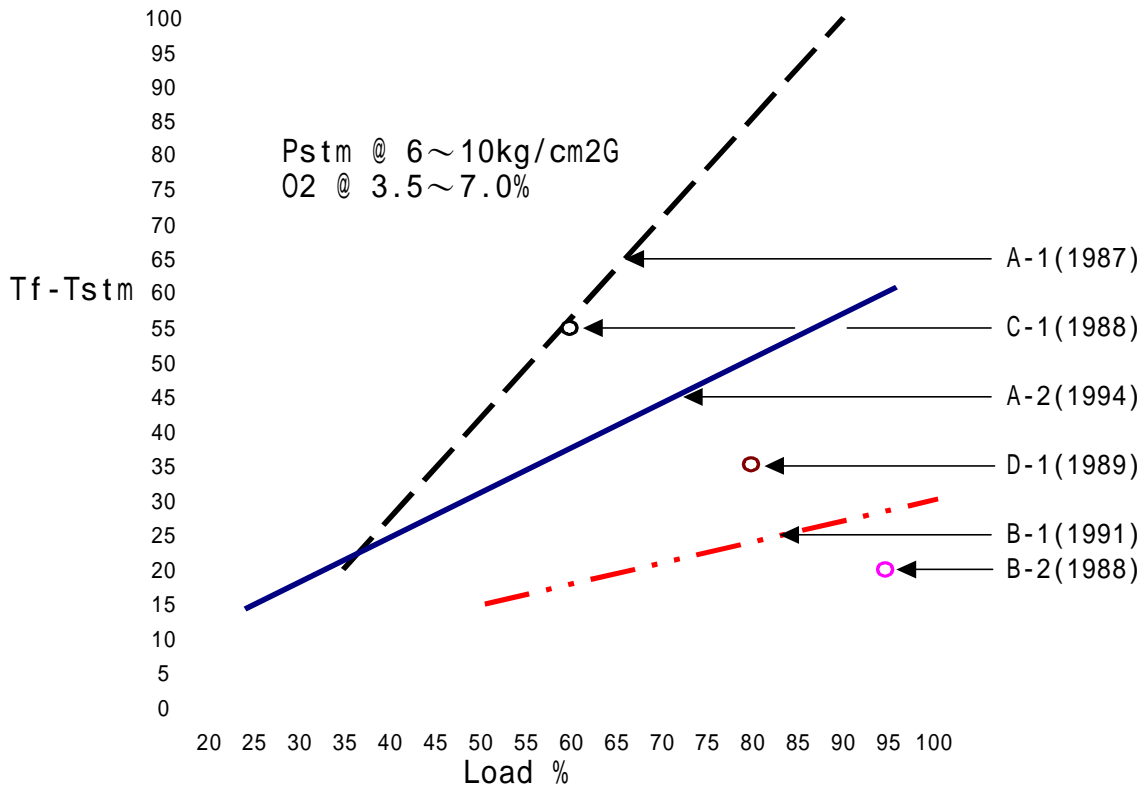
圖3.1. 蒸汽鍋爐系統影響效率項目



## (一)設備影響效率項目

鍋爐負載提高時需要提高燃油供給量，燃氣體積增加使流速加快，在一定受熱面積下吸收燃氣熱量的速率提升有限，通常負載愈高排氣溫度愈高，排氣總量及溫度增加使得損失之熱量增加，因此有些鍋爐在負載上升至某一階段，達到換熱面積功能瓶頸以致效率開始下降。鍋爐傳熱面積的設計影響排氣與蒸汽溫度差距，排氣溫度是決定鍋爐效率的重要因素，檢測國內無熱回收裝置的煙管鍋爐數例，4種廠牌、6種規格均操作於10kg/cm<sup>2</sup>G以下，其傳熱面積和負載變化導致鍋爐本體效率差異很大。傳熱面積的設計依幅射區、對流區的換熱比例出現兩種極端，由於價格差異也是市場考量重要因素，因此不易分析個別設計的優劣。從排氣與蒸汽溫度差距圖認識到低負載作業可以彌補傳熱面積不足的缺憾，只要空氣比調整適當仍然可以獲得理想的鍋爐效率。

圖3.2. 燃油煙管鍋爐無熱回收排氣溫度



### 1. 傳熱面積：

水管式鍋爐連接水鼓與汽鼓之產汽爐管數量決定鍋爐蒸發能力。燃燒熱大部分輻射至爐膛之排管受熱面，少部份在後續管群以對流和傳導方式進行熱交換。足夠的受熱面積可使燃氣離開本體之溫度降低至符合省能的目的。

煙管式鍋爐輻射區至對流區由於採端板設計，轉折點通常不超過800，因此輻射熱傳量受到相當限制，在同樣的蒸汽需求壓力下，對流區煙管數列之多寡，成為排氣溫度高低的決定因素，管群以多迴數方式排列增加受熱面，可同時減少煙管兩端溫差。

### 2. 複熱器：

以空氣預熱方式回收排氣熱使助燃空氣溫度上升，送入爐膛可直接減少燃料量，對於水側負載並無影響。裝置空氣預熱器之優點包括：回收排氣熱量減低熱損失、使燃料更易於完全燃燒、爐膛溫度較高可增加輻射傳熱速率。正常排氣溫度高於350 的場合，管端熱應力不均可能變形裂隙。

### 3.節熱器：

以節熱器回收排氣熱使給水溫度上升，是因水側熱負載下降節省燃料用量，爐膛溫度及傳熱速率並無改變。裝設節熱器之優點包括：回收排氣熱量減低熱損失、蒸汽給水溫差小可減少爐管變形裂隙機會。對於回收冷凝水或蒸汽脫氧的場合，給水溫度若高於100 以致升溫空間有限，加上水與燃氣體積量比約1:1300，將使熱管不易設計。

### 4.控氣風門：

一般鍋爐燃燒器多採燃油連控空氣風門方式，操作負載大小會改變空氣比值及燃氣總量，造成幅射區溫度及對流區熱傳速率變化，影響鍋爐主體換熱功能使得排氣溫度會有差異。

## (二)操作影響效率項目

以效率87%鍋爐為例，尾氣排放熱損約佔9～11%，燃燒熱損、爐壁熱損、洩水熱損3項合計4～2%，所以改善重點通常放在空氣比和尾氣溫度上。鍋爐操作須因應製程蒸汽需量變化，蒸汽需求壓力或過熱

溫度仍然是決定排氣溫度高低的主要因素。

通常負載減少50%使排氣溫度下降30~50℃，具有節熱器或複熱器的場合，高低負載之尾氣溫度差異會縮小到10~25℃，是另一項影響效率變數。節熱器提高給水溫度使能量負載需求降低，燃料用量節省卻不一定反應在鍋爐效率提升，複熱器提高空氣溫度作為輔助能源節省燃料用量，能量負載需求不變卻一定提升鍋爐效率，故在負載變化較大區間不能僅以尾氣溫度、含氧量判讀正確的負載效率特性。

#### 1. 燃燒熱損率： $c=1-K_{com}$

燃燒效率直接反映鍋爐效率而不受負載變化影響。足夠的滯燒時間依賴爐膛設計，適當的霧化粒徑、過量空氣依賴操作技能。低燃燒率表示伴隨飛灰的未燃碳粒，進入對流管群貼附管壁降低換熱能力值得顧慮。燃燒熱損率一般在0.5~1.0%間。

#### 2. 爐壁熱損率： $w=(H_{rad}+H_{cov})\cdot A_{wal}/Q_{in}$

爐壁損失熱量因素有四：爐殼保溫層厚度、室外風速影響、火焰偏向受熱不均、爐管變形使斷熱層破裂。正常狀況爐壁溫度變化很小，煙管鍋爐尤其穩定，因此負載愈低爐壁熱損比例愈高，一般在1.0~2.0%間。

#### 3. 洩水熱損率： $d=(W_{at}-S_{tm})\cdot(H_{sat}-H_{wat})/Q_{in}$

鍋爐洩放水量取決於水質處理的程度，在實際溫度給水和蒸汽溫度

飽和水之熱焓差距下，連續洩放水量所載熱量，其與燃料投入量之熱能比值，定義為洩放熱損率，一般在0.5~1.0%間。

4.尾氣熱損率： $g=(G*H_{gas}-A*H_{air})/Q_{in}$

常溫空氣也具有熱焓參與燃燒反應，如果為求簡化設定為0kcal/kgmol，加上氣體組成比熱對溫度的非線性變化，計算誤差將導致高溫階段燃氣實際溫度偏差50 左右，影響對於管材熱應力破壞及露點腐蝕的判斷。同時在計算尾氣熱損失率時是以燃料熱量為基準，僅考慮尾氣溫度之熱焓而忽略常溫氣體熱焓基準，會高估尾氣熱損失量，故定義尾氣熱損量應扣減助燃空氣熱量。

#### 四、智慧型鍋爐功能

能源使用合理化影響鍋爐高效率作業目標的達成，變動成本上升的趨勢突顯運轉操作需要適當管理的重要。國內汽電高壓蒸汽鍋爐及較大型中壓蒸汽鍋爐已具備智慧型作業功能，在安全顧慮下設計自動監控系統，維持效率目標配置數據監錄系統，為了環保目的連續偵測排氣系統，如能再加強自主分析能力的專家系統，將可引導改善方案的可行性評估。國內蒸汽鍋爐產能20噸/hr、壓力30kg/cm<sup>2</sup>以下的數量最多，由於附加智慧型監管系統的初設費用比例過高而未裝設，但是缺乏完整的操作條件數據和分析改善能力，實在不易達到降低運轉成本的訴求。針對智慧型監管系統投資的經濟效益是有必要加以探討，而應用現代化經營管理模式的觀念仍需要宣導認同。

##### (一)監管系統程序模式

###### 1.連續偵測的效益

藉偵測異常數據分析作業缺失的影響程度，可以儘速維修避免設備損壞及污染排放。蒸汽鍋爐監管系統程序模式中最嚴謹的步驟在負載特性模式測試，適當的參數依分析校驗輸入，才能獲得正確的輸出結果，即時顯示鍋爐運轉狀況。

採連續自動監錄結合即時警訊分析、指引故障排除的電腦系統，其優點包括：

- (1)免除作業人員累積異常處理壓力換取正確操作經驗
- (2)協助維修人員釐清故障發生原因快速完成排除行動
- (3)提供管理人員易於判讀操作記錄統計能源成本效益
- (4)電腦化運算顯示即時效率縮短異常持續時間和損失
- (5)資訊化數據顯示歷史記錄節省人工抄錶時間和失誤
- (6)最適化分析顯示標準偏差評估異常影響安全和環保

圖4.1. 蒸汽鍋爐監管模式

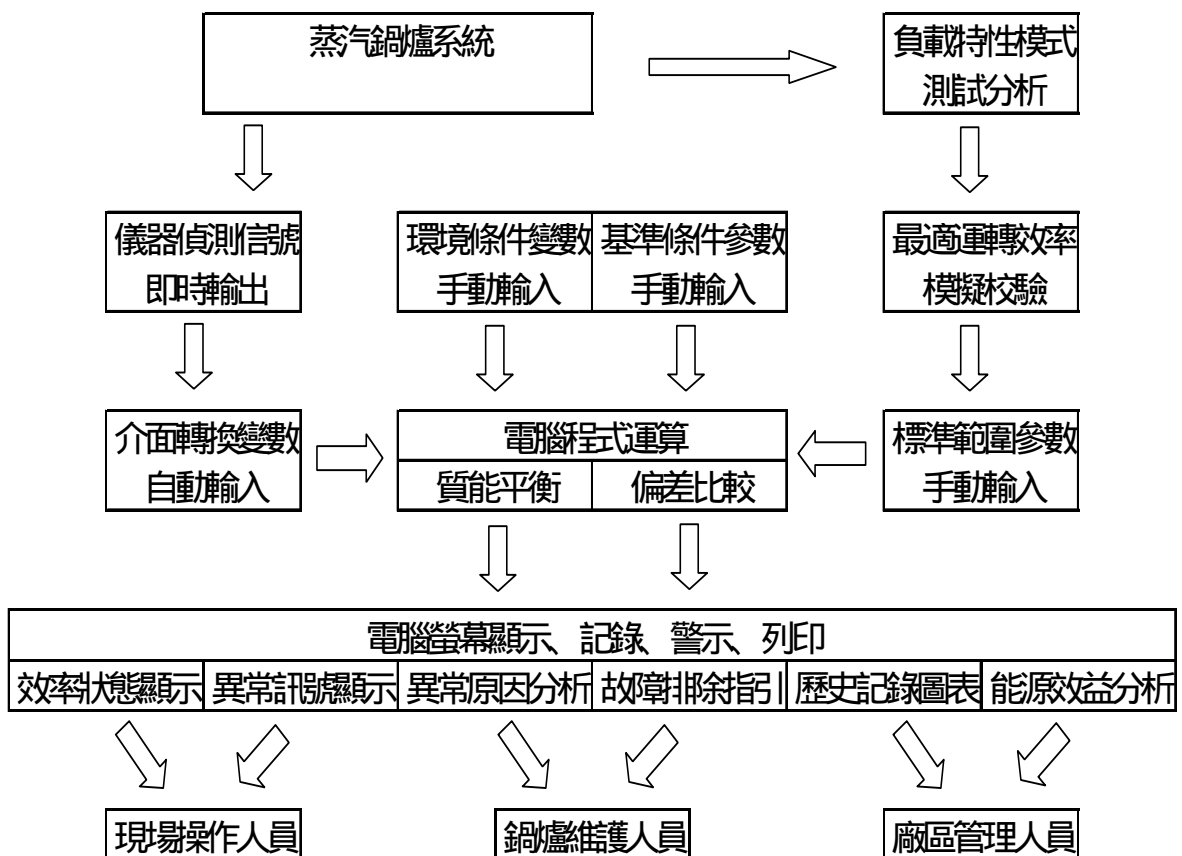
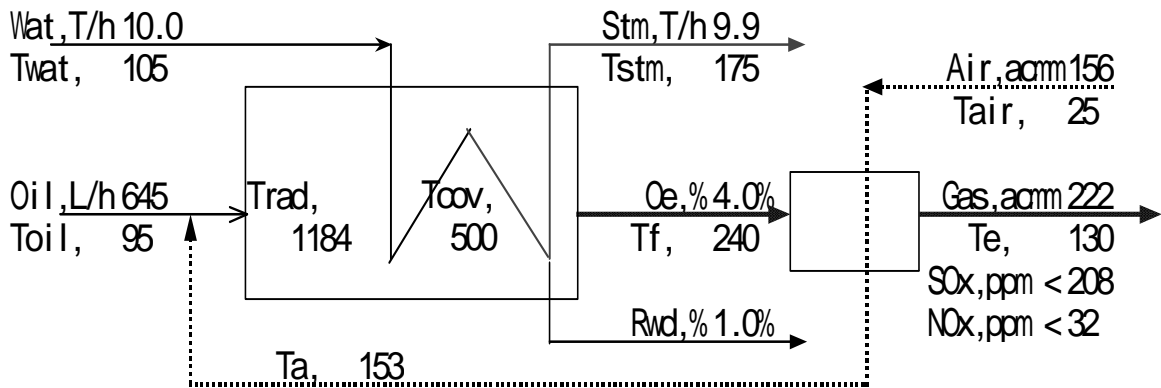




圖4.2. 鍋爐運轉即時顯示狀況



| 鍋爐負載  | 燃燒熱損 | 爐壁熱損 | 洩放熱損 | 尾氣熱損 | 鍋爐效率  |
|-------|------|------|------|------|-------|
| 72.0% | 1.0% | 1.9% | 0.1% | 7.0% | 90.0% |

## 2.效率提升工作流程

對於蒸汽鍋爐效率提升的改善工作步驟,首先是操作負載特性檢測,根據鍋爐特性的分析結果擬定最適方案。改善工作最終是達成最適化作業目標,無論是單純的調整操作條件或是增改汰換硬體裝置,運用電腦評估模式模擬結果,將可節省試誤法的時間及避免誤判導致的失敗。

圖4.3. 鍋爐效率提升工作流程

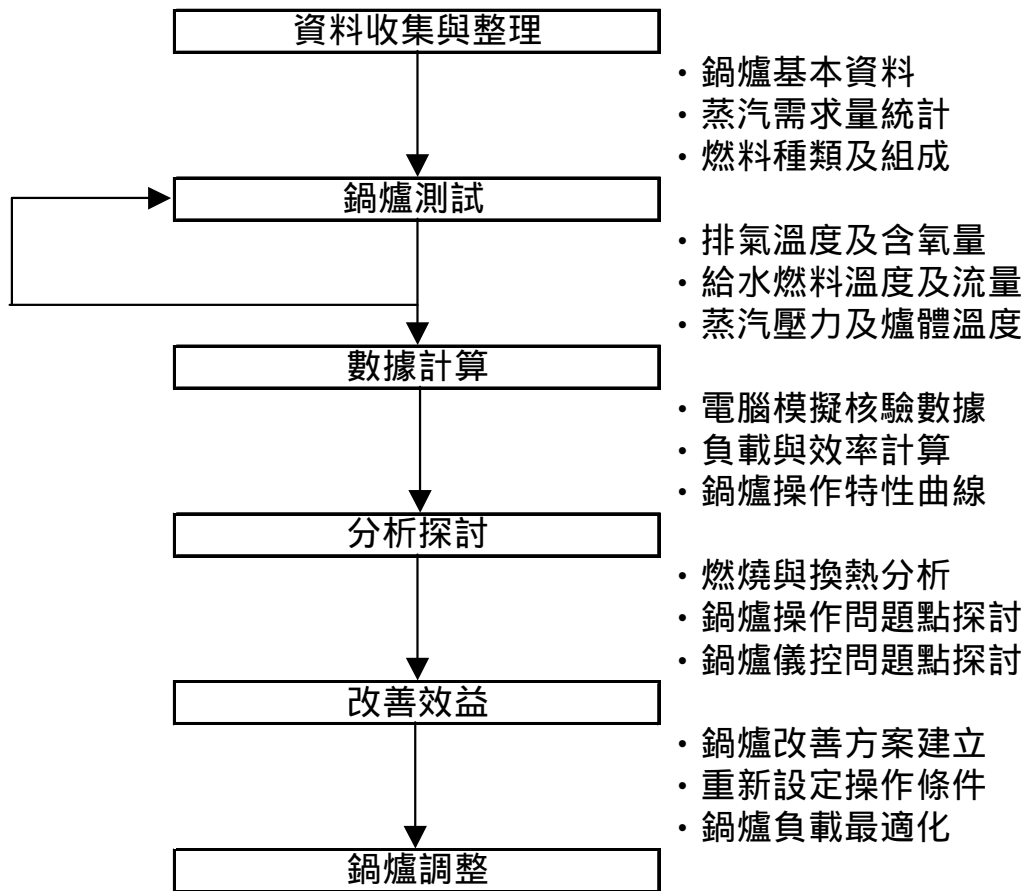
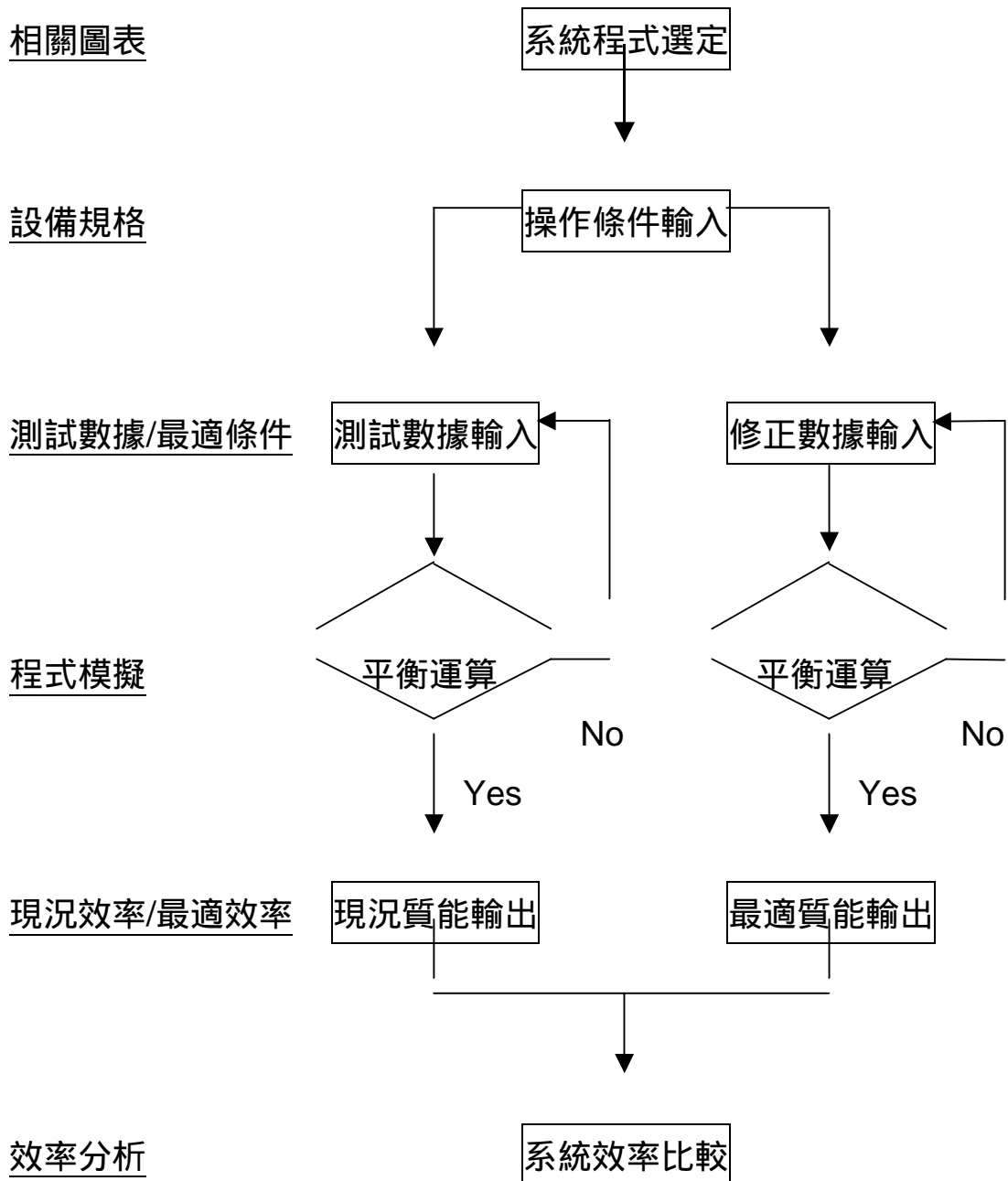


圖4.4. 電腦評估模擬模式



### 3. 質能平衡運算

改善鍋爐效率須因應製程需求量變化，掌握鍋爐系統各裝置的功能缺失。了解鍋爐系統在負載範圍內各階段之燃氣溫度，可以掌握燃燒殘碳發生率、對流管板受熱應力、熱回收露點效應，所以操作條件測

試和鍋爐特性分析必須逐一完成。

以出入熱法計算鍋爐效率是探討燃料投入熱量和有效蒸汽產出熱的關係，多數鍋爐因為欠缺準確的燃料、給水流量計，所以在應用上頗為困難。以熱損失法計算鍋爐效率是探討燃料投入熱量和各項無效熱損失的關係，排氣含氧、溫度容易測量影響熱損失也最大，但是誤用燃料熱值及空氣熱量基準，還是會導致效率的偏差。

出入熱及熱損失法如果併用進行質能平衡運算，由於兩者總值為100%故能確認儀錶的誤差，因此獲得可信度較高的平衡數據。藉程式模擬數據研判燃燒及熱傳效率，可協助了解系統的特性、限制，從操作調整的手段進行效率提升。

表4.1. 質能計算符號定義

|         |                   |                         |        |                    |                |
|---------|-------------------|-------------------------|--------|--------------------|----------------|
| 低發熱量    | NHV               | kcal/kg                 | 最大蒸汽產能 | Std                | 噸/hr           |
| 理論空氣    | Ao                | Nm <sup>3</sup> /kg     | 鍋爐最大負載 | Qmax               | Mcal/hr        |
| 理論排氣    | Go                | Nm <sup>3</sup> /kg     | 鍋爐周界風速 | Vwin               | m/s            |
| 空氣比     | m                 |                         | 爐壁面積   | A <sub>WL</sub>    | m <sup>2</sup> |
| 實際排氣    | G                 | Nm <sup>3</sup> /kg     | 幅射受熱面積 | A <sub>RD,eq</sub> | m <sup>2</sup> |
| 排氣含氧量   | Oe                | Nm <sup>3</sup> /kg     | 對流換熱面積 | A <sub>CV,eq</sub> | m <sup>2</sup> |
| 排氣含氧率   | O <sub>2</sub> %  | %                       | 空氣相對濕度 | RH                 | %              |
| 對流熱傳係數  | h <sub>CONV</sub> | kcal/hrm <sup>2</sup> K | 空氣絕對濕度 |                    | kg/kg          |
| 幅射熱傳係數  | h <sub>RADI</sub> | kcal/hrm <sup>2</sup> K | 空氣乾球溫度 | Td                 |                |
| 空氣摩爾熱含量 | C <sub>p,a</sub>  | kcal/kgmol              | 基準參考溫度 | Tref               |                |
| 燃氣摩爾熱含量 | C <sub>p,m</sub>  | kcal/kgmol              | 進入空氣溫度 | Tair               |                |
| 爐壁熱損失量  | Q <sub>WL</sub>   | kcal/hr                 | 預熱空氣溫度 | Ta                 |                |
| 鍋爐產汽熱換量 | Q <sub>HE</sub>   | kcal/hr                 | 鍋爐爐膛溫度 | Tc                 |                |
| 幅射區熱交換量 | Q <sub>RD</sub>   | kcal/hr                 | 節熱前燃氣溫 | Tf                 |                |
| 對流區熱交換量 | Q <sub>CV</sub>   | kcal/hr                 | 節熱後燃氣溫 | Tg                 |                |

|        |       |                      |        |                  |
|--------|-------|----------------------|--------|------------------|
| 操作蒸汽壓力 | Pstm  | kg/cm <sup>2</sup> G | 飼水溫度   | T <sub>H2O</sub> |
| 最大蒸汽壓力 | Pstd  | kg/cm <sup>2</sup> G | 預熱飼水溫度 | T <sub>H</sub>   |
| 飼水進量   | W     | 噸/hr                 | 燃油溫度   | Toil             |
| 燃油進量   | Oil   | kg/hr                | 操作蒸汽溫度 | Tstm             |
| 蒸汽產量   | Stm   | 噸/hr                 | 熱交換溫差  | Tm               |
| 燃燒反應率  | Kcomb | %                    | 鍋爐周界溫度 | Ts               |
| 洩放水率   | Rwd   | %                    | 鍋爐爐壁溫度 | T <sub>WL</sub>  |

表4.2. 程式模擬基本公式

|         |  |
|---------|--|
| 理論需氧量   | $O_2 = \text{燃油組成燃燒反應平衡計算}$  |
| 理論排氣量   | $G_o = \text{燃油組成完全燃燒反應平衡計算}$  |
| 理論乾空氣   | $A_{do} = (1 + 3.762) * O_2$   |
| 空氣絕對濕度  | $= 0.622 * \frac{P_{RH} * (\text{EXP}(18.5815 - 3987.1 / (T_d + 233.7)))}{(760 - P_{RH} * (\text{EXP}(18.5815 - 3987.1 / (T_d + 233.7))))}$              |
| 理論濕空氣量  | $A_o = A_{do} * (1 + 28.84 * \text{濕度} / 18)$  |
| 實際排氣含氧率 | $O_2\% = (m - 1) * O_2 / [G_o + (m - 1) * A_o]$  |
| 空氣比     | $m = G_o * O_2\% / (O_2 - A_o * O_2\%) + 1$  |
| 實際濕空氣量  | $A = m * A_o$  |
| 實際濕排氣量  | $G = G_o + (m - 1) * A_o$  |
| 空氣摩爾熱含量 | $C_{p,a} = \sum Y_i * C_{p,i}(T)$  |
| 燃氣摩爾熱含量 | $C_{p,m} = \sum Y_j * C_{p,j}(T)$  |
| 空氣熱含量   | $H_a(T) = \int_{T_1}^{T_2} C_{p,a} dT$   |
| 燃氣熱含量   | $H_g(T) = \int_{T_1}^{T_2} C_{p,m} dT$   |
| 蒸汽操作溫度  | $T_{stm} = \{3795.53 / [11.6693 - \ln(P_{stm} + 1)]\} - 226.18$  |
| 爐壁熱損失量  | $Q_{WL} = (h_{CONV} + h_{RADI}) * [2 + 0.4 * (V_{win} - 1)] * A_{WL} * (T_{WL} - T_s)$   |
| 燃油進量    | $Oil = (Q_{HE} + Q_{WL}) / [NHV * K_{comb} + A * \int_{T_{ref}}^{T_a} C_{p,a} dT + S_{oil} * (T_{oil} - T_{ref}) - G * \int_{T_{ref}}^{T_g} C_{p,m} dT]$ |
| 蒸發潛熱    | $V_{ap} = 606.126 - 0.75851 * T_{stm} + 1.55845 * 10^{-3} * T_{stm}^2$   |
| 鍋爐熱交換量  | $Q_{HE} = S_{tm} * 1000 * (V_{ap} + T_{stm} - T_{H_2O}) + (W - S_{tm}) * (T_{stm} - T_{H_2O})$   |
| 鍋爐產汽熱量  | $Q_{eff} = S_{tm} * 1000 * (V_{ap} + T_{stm} - T_{H_2O})$  |
| 鍋爐輸入熱量  | $Q_{in} = Oil * NHV$   |
| 鍋爐操作效率  | $b = Q_{eff} / Q_{in}$   |
| 最大蒸汽溫度  | $T_{std} = \{3795.53 / [11.6693 - \ln(P_{std} + 1)]\} - 226.18$  |
| 最大蒸發潛熱  | $V_{max} = 606.126 - 0.75851 * T_{std} + 1.55845 * 10^{-3} * T_{std}^2 - 6.7249 * 10^{-6} * T_{std}^3$   |
| 最大負載熱量  | $Q_{max} = S_{td} * 1000 * (V_{max} + T_{std} - T_{H_2O})$   |
| 鍋爐操作負載  | $Load = Q_{HE} / Q_{max}$  |

#### 4. 環保訴求目的

針對燃氣排放管制的SOx、NOx環保項目，監管系統只能提供記

錄追蹤的功能，但在鍋爐安全和效率維持方面扮演積極糾正的角色，因此可以避免粒狀物、黑煙及CO的環保污染項目。分析爐膛滯燒時間，得以即時預測未燃碳形成的可能，技術上比加裝CO分析儀推算粒狀

$$t_b = \frac{1}{P_{O_2}} \left\{ \frac{\text{反應動力}}{\text{擴散速率}} \right\}$$

$$t_b = \frac{1}{P_{O_2}} \left\{ \frac{d_o}{0.13 \exp \left[ \left[ \frac{-35700}{R} \right] \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{1600} \right] \right]} + \frac{d_o^2}{4.35 \times 10^{-6} T^{0.75}} \right\}$$

物的方法經濟有效。燃燒反應動力及擴散速率如Field et al.半經驗公式，估算燃料相當粒徑在固定爐膛的允許燃盡時間，往往能夠更有效的提供調整改善方向。

- 其中， $t_b$ ：燃盡時間, sec
- $P_{O_2}$ ： $O_2$ 成份分壓, atm
- $R$ ：1.986, kcal/kg-mol $^{\circ}K$
- $T$ ：火燄溫度,  $^{\circ}K$
- $d_o$ ：相當粒徑, cm

## 5.安全訴求目的

常發生的鍋爐嚴重損壞包括內壁受熱不均破裂 爐管灰垢阻塞腐蝕、管群變形塌陷、管群端板破裂。這些項目平時難以觀察，也要持續相當時期的異常運轉才會突顯出來。藉由安全操作經驗參數比對各階段燃氣溫度偏差範圍，得以及早修正作業條件，技術上比經常停爐檢修的方法方便有效。

## 6.效率訴求目的

影響鍋爐負載效率的主要因素是燃燒熱損、爐壁熱損、洩水熱損、尾氣熱損。以0.5%含硫燃料油之蒸汽鍋爐為例，說明如下：

- (1)調整燃料霧化條件：飛灰殘碳 1.0%，鍋爐效率 0.8%~1.0%。
- (2)調整空氣比控制器：排氣含氧 1.0%，鍋爐效率 0.4%~0.6%。
- (3)調整給水穩定液位：變動範圍 5.0%，鍋爐效率 0.1%~0.2%。
- (4)控制爐水減量排放：洩放水量 1.0%，鍋爐效率 0.1%~0.2%。
- (5)檢修加強爐體保溫：爐壁溫度 10℃，鍋爐效率 0.3%~0.5%。
- (6)阻隔強風或冷氣流：爐壁風速 1m/s，鍋爐效率 0.3%~0.4%。
- (7)排氣廢熱回收裝置：排氣溫度 10℃，鍋爐效率 0.5%~0.6%。
- (8)增加冷凝水回收率：給水溫度 10℃，鍋爐負載 1.0%~1.2%。
- (9)多台鍋爐併聯分配：視個別鍋爐負載特性影響總效率提升程度。
- (10)避免換熱管群破裂：視本體及熱回收特性影響總效率損失程度。



## (二)監管系統改善應用

前述高效率指硬體的設計應儘量降低燃燒、爐壁、尾氣熱損失，定義智慧型監管系統為合理的作業應經常符合高效率、安全、環保訴求。監管系統之硬體基本配備包括：數位輸出之供水流量計、供油流量計、蒸汽壓力計、燃氣溫度計、熱回收流體溫度計、信號轉換器、桌上型電腦及印表機。監管系統可以適用於固體、液體、氣體燃料，飽和及過熱蒸汽、煙管及水管構造、節熱及複熱型式之鍋爐操作。

因鍋爐效率為燃料發熱量與蒸汽吸收熱量之比，故欲提高鍋爐效率，除使燃料中之熱量盡量發揮外，並需使燃料產生之熱盡量為爐水所吸收。對於單一鍋爐，可以從操作調整著手，改善負載範圍內之效率特性。對於多台併聯鍋爐，則可以在各鍋爐負載效率改善後，依製程需量整合各別鍋爐之特性曲線，找出系統發揮最佳效率的負載分配方式，分別設定其操作條件，以獲得整體最大效益。監管系統提供資訊直接有助於鍋爐效率的改善。

### 1.關小調風器風門

高燃燒負載時，液體燃料的廢氣含氧量標準為3~4%，但在低燃燒負載時，則應以較高的空氣量輔助噴燃器霧化效果之下降。排氣溫度偏高時，降低空氣比以節省排氣熱能損失的效果雖然顯著，爐膛溫度過高卻可能影響鍋爐本體之應力破壞。對操作性能的變數採用電腦

模擬分析，可以節省調整時間，並避免實作試誤造成的熄火、黑煙，甚至硬體損害。

## 2.調整燃油空氣連動器

一般鍋爐之空氣進量依附燃油閥門動作，顯示出兩種特性，一為低負載下排氣含氧量較高負載時高，另一為低負載時排氣溫度較高負載時低，兩種效應對效率而言似有衝突，然而絕大多數鍋爐的總特性是低負載呈現較低的效率。由於爐本體的輻射熱傳面在負載和爐膛溫度變化時，主導了傳熱速率的改變，造成溫度效應不及含氧量重要。

控氣連桿的調整可以將負載 - 效率特性曲線的斜率改變。當負載改變時，空氣與燃油的比例通常不是固定的，這個觀念應用在製程需量不穩定的場合相當重要。藉由連桿調整將操作範圍之曲線特性，改變成在運轉頻率較高的區段僅量提高效率，以達到最適化負載操作的省能目的。

## 3.調整燃燒機霧化條件

對於既有鍋爐的燃燒效率好壞，通常可以從火燄亮度、炭粒火星、集塵數量、飛灰色澤、煙囪排放等直接目視判斷，一旦發現飛灰殘炭即顯示不完全燃燒現象。當鍋爐操作於低負載狀態，多數是燃燒機霧化條件不佳，依據燃燒機特性設定燃料油和霧化媒體的溫度或壓力、燃料煤粒徑大小或送風壓力，經常可以獲得很好的效果。當鍋爐操

作於高負載狀態下，可能還需要分析鍋爐爐膛容量的限制。估算燃料粒徑在爐膛的滯燒時間，與爐膛的允許燃盡時間比較，能夠有效的提供調整改善方向。

#### 4.加裝空氣預熱器或節熱器

鍋爐各項熱損失中，以排氣熱損失比例最大，除降低空氣比外，降低排氣溫度是另一改善方向。清除水側鍋垢、火側積灰，可以提高熱傳導率，使鍋爐多吸收一部份熱量，降低排氣溫度。不過傳導所佔熱交換比例較之幅射、對流差距甚多，傳熱面積設計不足的情況下，裝設空氣預熱器或節熱器，以增加傳熱面積回收排氣熱量較為有效。

#### 5.檢修爐體保溫

爐體表面熱損失量因保溫狀況及外氣溫度、風速而定，因為以定值之熱量流失於大氣，故對入熱量言，低負載情況下爐體表面熱損失率增加很多。爐體表面溫度偏高應加強保溫，局部溫度過高則應檢修爐內耐火材。環境風速偏大時應設法遮隔。

#### 6.爐水排放控制及冷凝水回收

鍋爐給水經過軟化、脫氧處理，為避免發生結垢、汽水共騰、起  
泡、腐蝕、苛性脆化等現象，汽鼓及水鼓仍須排放少量爐水。蒸汽冷  
凝水具有純水一樣的水質，回收再用除了節省熱量外，也允許再降低  
爐水的排放量，減少洩放熱損失。

## 7.避免間歇運轉

燃油燃燒器有一定的最小油量調節限制，與最大值的比例約在1：4～1：6間，通常蒸汽用量低至鍋爐容量的20%左右將會熄火，待汽鼓蒸汽壓降至設定值時鍋爐再啟動點火。如果蒸汽需求量經常處於鍋爐的低負載運轉，燃燒器之噴嘴又未加以適當更換，燃燒器啟停操作將極為頻繁，持續的爐體散熱損失加上點火前的爐膛預通風和熄火後的後通風熱損失，造成無效燃燒的燃料浪費很大。比較合理的改善當從製程蒸汽需量管理著手，統計批次加熱設備耗用蒸汽的高低和時段，考慮最大總量移轉並設定最小基本量，可以獲得有效的結果。

## 8.穩定進水量控制

針對進水量控制使水位穩定，除了避免隨伴水滴，也穩定蒸汽壓力趨使火焰變化起伏減小，進而排氣熱損失得以降低。鍋爐通常以水位控制進水量，製程蒸汽需求不穩定時，水位變化起伏大。如單以進水泵維持一定進水速率，則泵之開停操作將極頻繁，信號傳輸與系統之時間延遲更可能導致水位變化跳脫控制範圍。當製程蒸汽需求變化處於有限範圍的狀況下，可以從統計蒸汽需量著手，評估汽鼓水位允許變動上下限，計算適當進水速率，調整給水閥開度獲得較佳的結果。

。

## 五、蒸汽鍋爐特性

### (一)蒸汽鍋爐作業現況

檢測國內業界現況運轉之各類煙管及水管燃油鍋爐105座，統計多數鍋爐作業分佈範圍：爐壁溫度55~60、排氣溫度180~200、排氣含氧5~7%、負載50~80%、效率85~86%。取平均操作數據：煙管鍋爐負載61%、效率82%、爐壁溫度59、排氣溫度210、排氣含氧6%，水管鍋爐負載61%、效率85%、爐壁溫度61、排氣溫度211、排氣含氧6%。煙管及水管燃油鍋爐呈現非常相近的平均值，無法輕易比較其間差異，因此再進一步分析於後以供業界參考。大體上可以了解造成鍋爐效率差異的主要因素是排氣溫度和排氣含氧，所以在最適化操作方面加以改善，仍有相當大的節能空間。

圖5.1. 蒸汽鍋爐作業爐壁溫度分佈統計

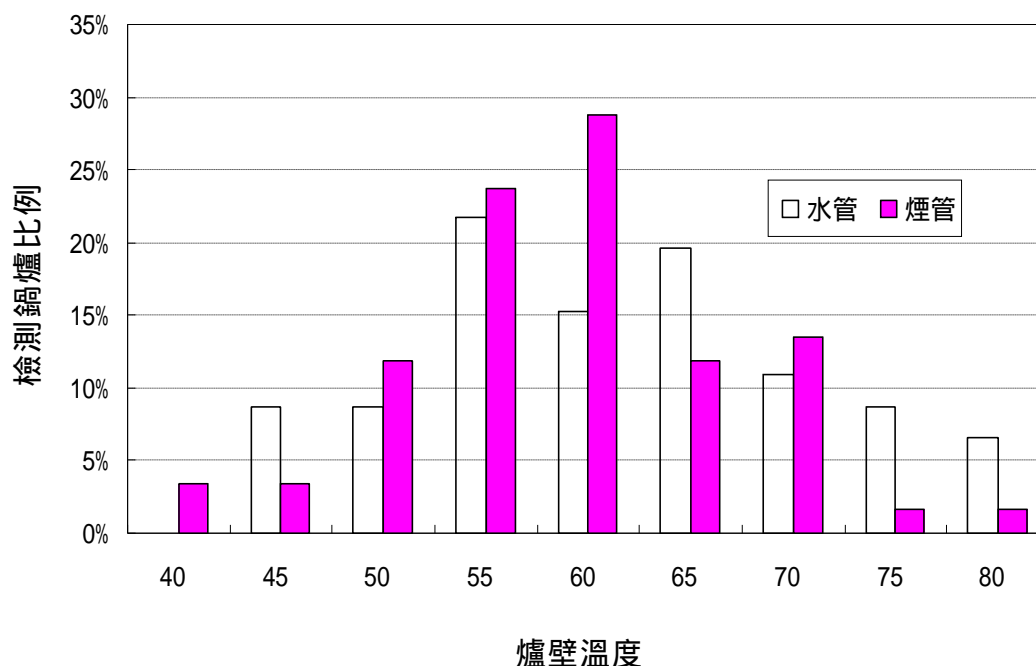


圖5.2. 蒸汽鍋爐作業排氣溫度分佈統計

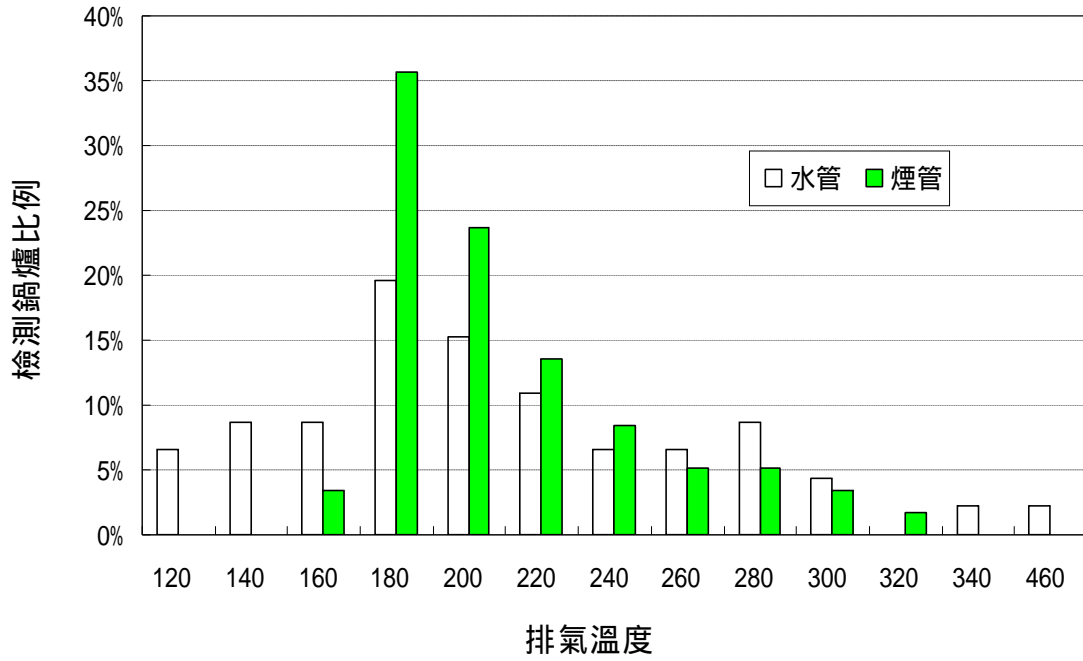


圖5.3. 蒸汽鍋爐作業排氣含氧分佈統計

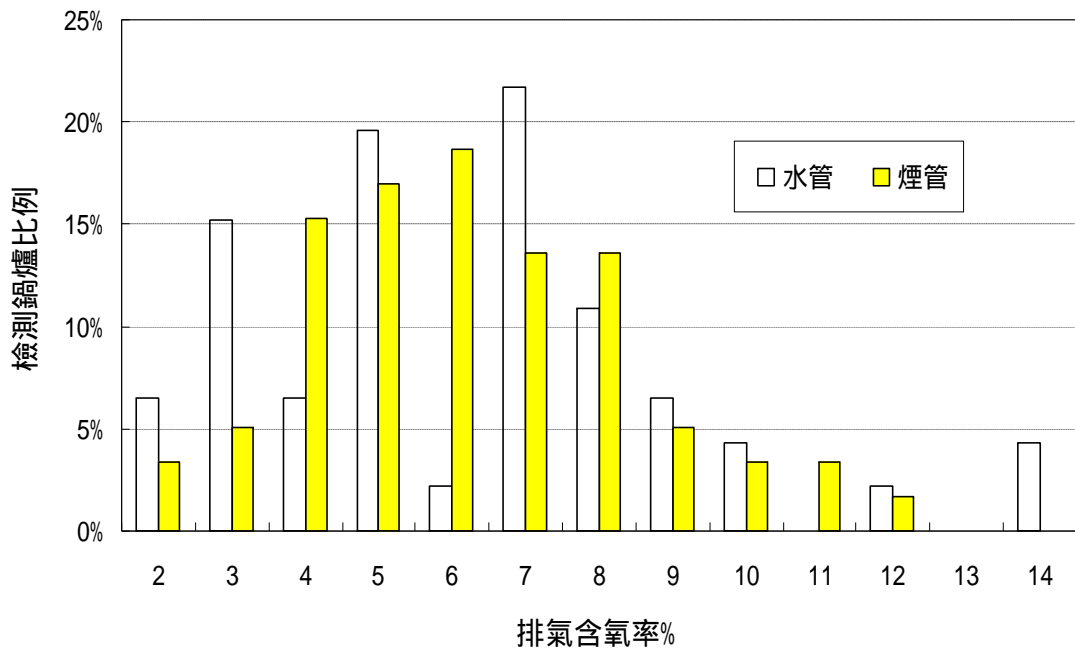


圖5.4. 蒸汽鍋爐作業負載分佈統計

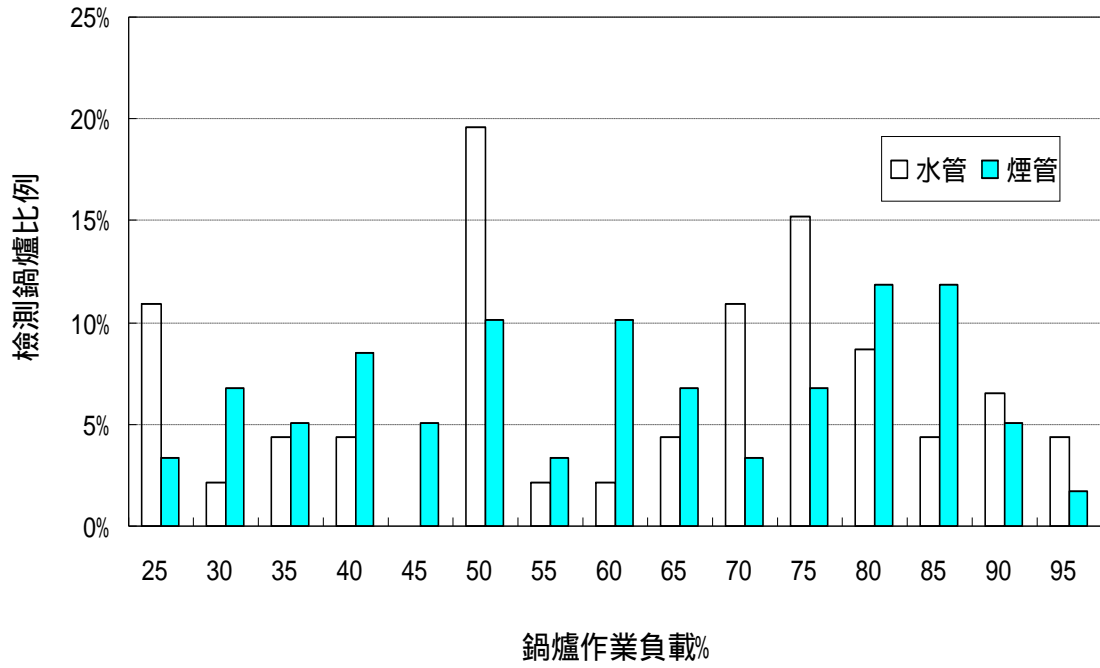
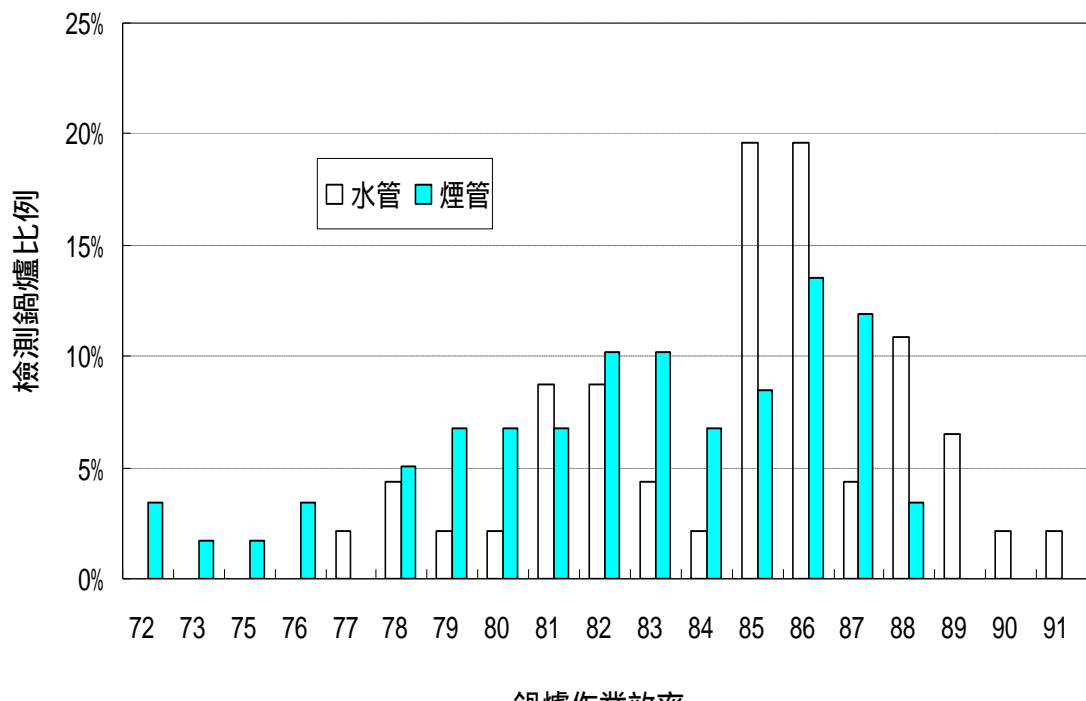


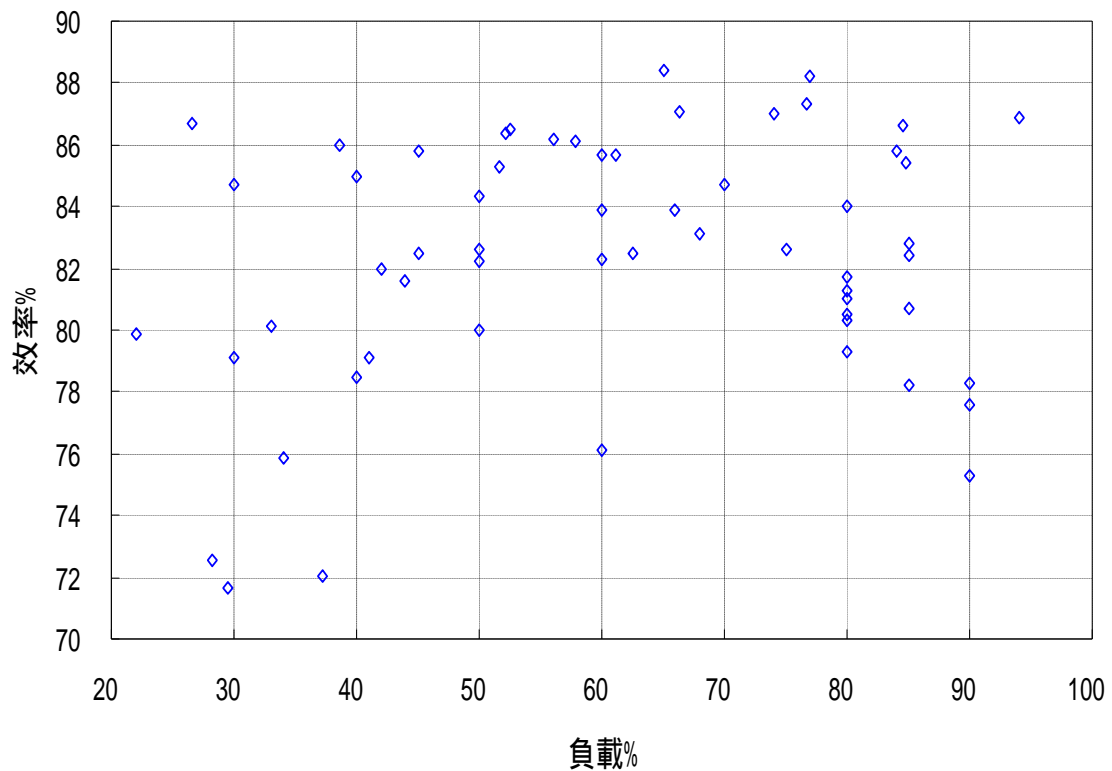
圖5.5. 蒸汽鍋爐作業效率分佈統計



## 1.煙管鍋爐作業現況

統計煙管鍋爐59座檢測數據，規格10噸/h(含)以下佔49%，其中三迴煙道型式48座、四迴煙道型式11座，負載25~95%、效率72~88%、爐壁溫度40~80、排氣溫度160~320、排氣含氧2~12%。其中附設排氣熱回收者只佔9%：節熱器2座、複熱器3座，蒸汽系統執行冷凝水熱回收者已達75%。

圖5.6. 煙管鍋爐負載效率檢測統計

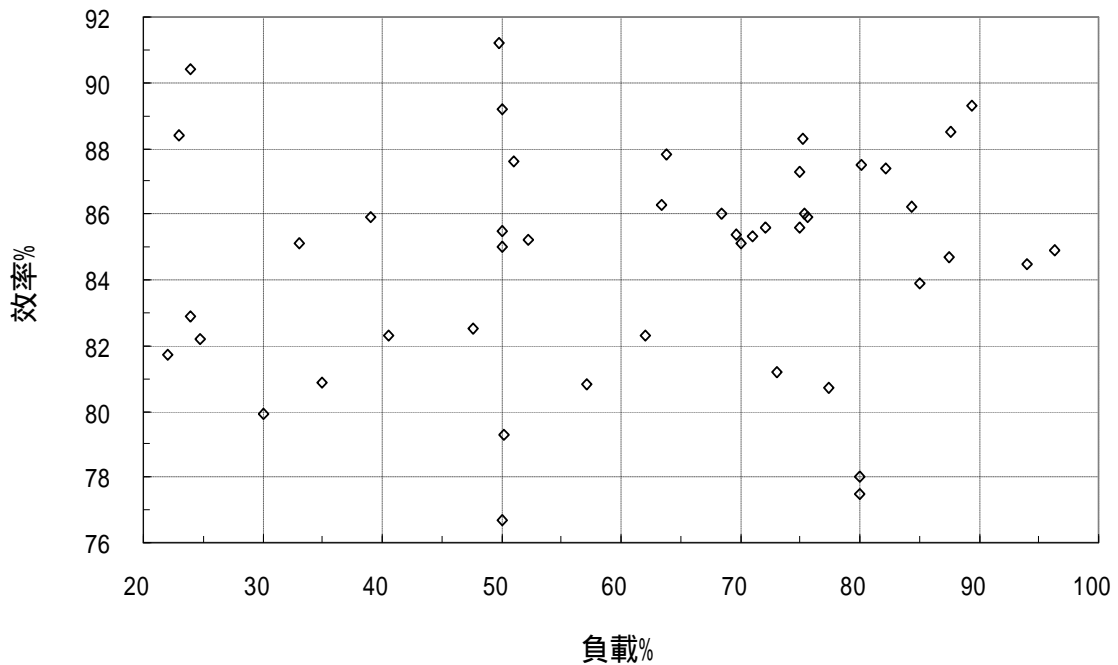


## 2.水管鍋爐作業現況



統計水管鍋爐46座檢測數據，規格20噸/h(不含)以上佔48%，其中蒸汽壓40kg/cm<sup>2</sup>G以上6座，負載22~96%、效率77~91%、爐壁溫度45~80、排氣溫度117~462、排氣含氧3~14%。其中附設排氣熱回收者已佔74%：節熱器8座、複熱器26座，蒸汽系統執行冷凝水熱回收者已達100%。

圖5.7. 水管鍋爐負載效率檢測統計



## (二) 蒸汽鍋爐作業案例

檢選國內業界現況運轉良好之各類代表性燃油鍋爐，分析其操作條件列舉負載效率實例如下以供參考。爐壁溫度低於60，排氣含氧低於3.5%。其間造成鍋爐效率差異的主要因素是排氣溫度，所以在回收排氣廢熱方面仍應加以改善。

### 1. 煙管鍋爐作業案例

#### (1) 四迴煙管鍋爐

|                         |            |             |
|-------------------------|------------|-------------|
| 10 ka/cm <sup>2</sup> G | 爐壁均溫 58    | 鍋爐負載 91.3 % |
| 12500 kg/hr             | 排氣溫度 185   | 排氣熱損 10.3 % |
| 低壓空氣霧化                  | 尾氣溫度 185   | 其他熱損 2.3 %  |
| 燃料油 1.0% S              | 排氣含氧 3.0 % | 鍋爐效率 87.4 % |

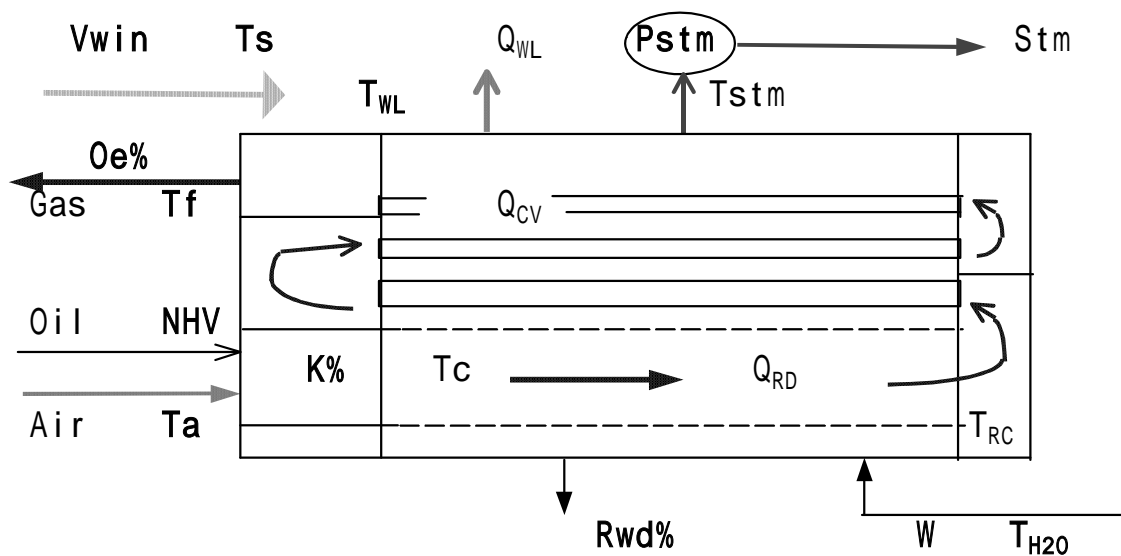


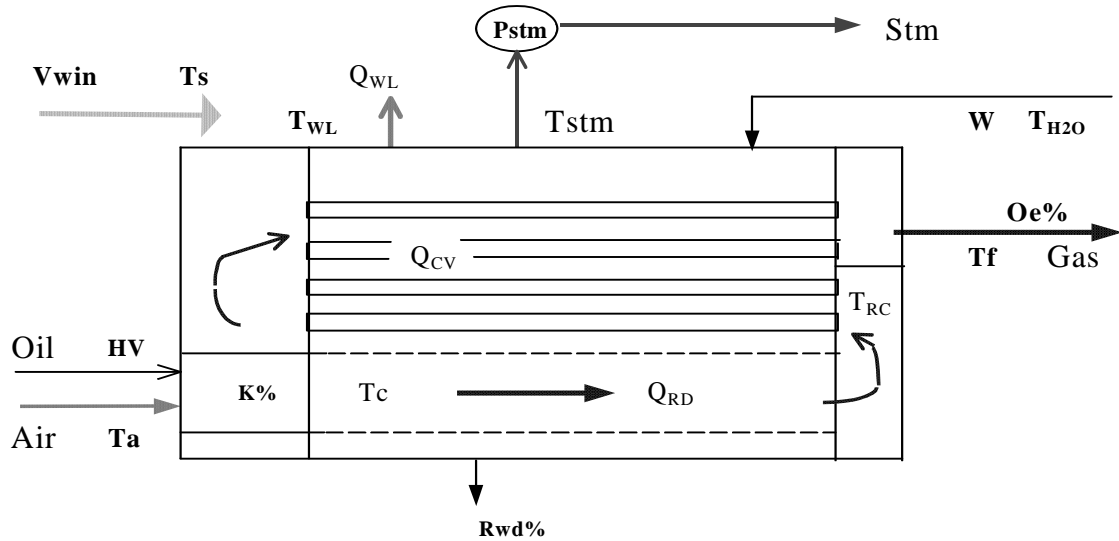
圖 5.8. 四迴煙管鍋爐

#### (2) 三迴煙管鍋爐

|                         |         |             |
|-------------------------|---------|-------------|
| 10 ka/cm <sup>2</sup> G | 爐壁均溫 55 | 鍋爐負載 74.1 % |
|-------------------------|---------|-------------|

|             |            |             |
|-------------|------------|-------------|
| 10000 ka/hr | 排氣溫度 205   | 排氣熱損 11.6 % |
| 低壓空氣霧化      | 尾氣溫度 205   | 其他熱損 2.9 %  |
| 燃料油 0.5% S  | 排氣含氧 3.5 % | 鍋爐效率 85.5 % |

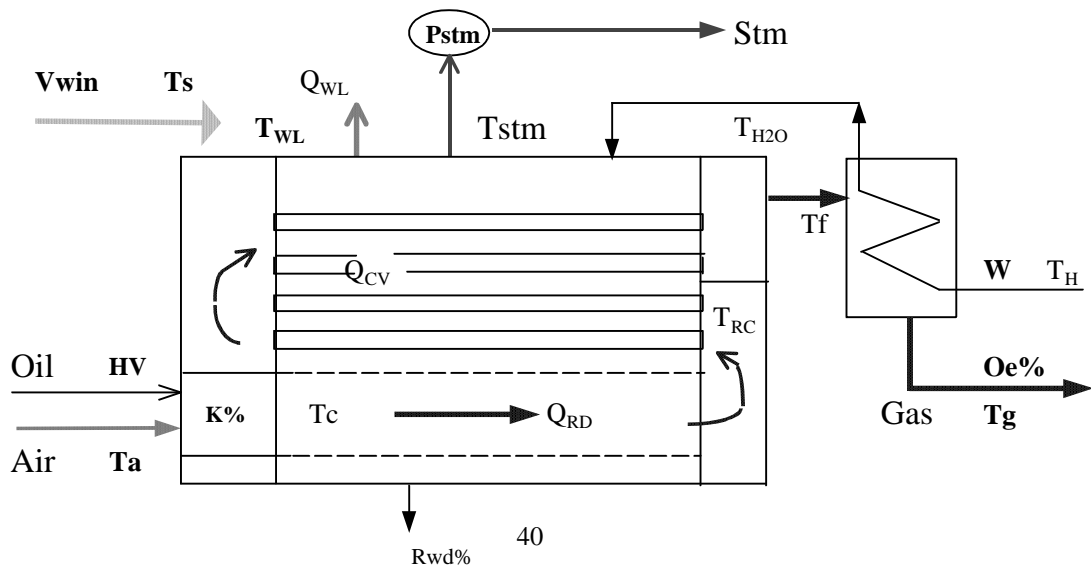
圖 5.9. 三迴煙管鍋爐



(3)三迴煙管鍋爐附節熱器

|             |            |             |
|-------------|------------|-------------|
| 10 ka/cm2G  | 爐壁均溫 47    | 鍋爐負載 64.7 % |
| 12000 kg/hr | 排氣溫度 224   | 排氣熱損 7.6 %  |
| 迴轉杯霧化       | 尾氣溫度 130   | 其他熱損 2.2 %  |
| 燃料油 0.5% S  | 排氣含氧 3.8 % | 鍋爐效率 90.2 % |

圖 5.10. 三迴附節熱器煙管鍋爐

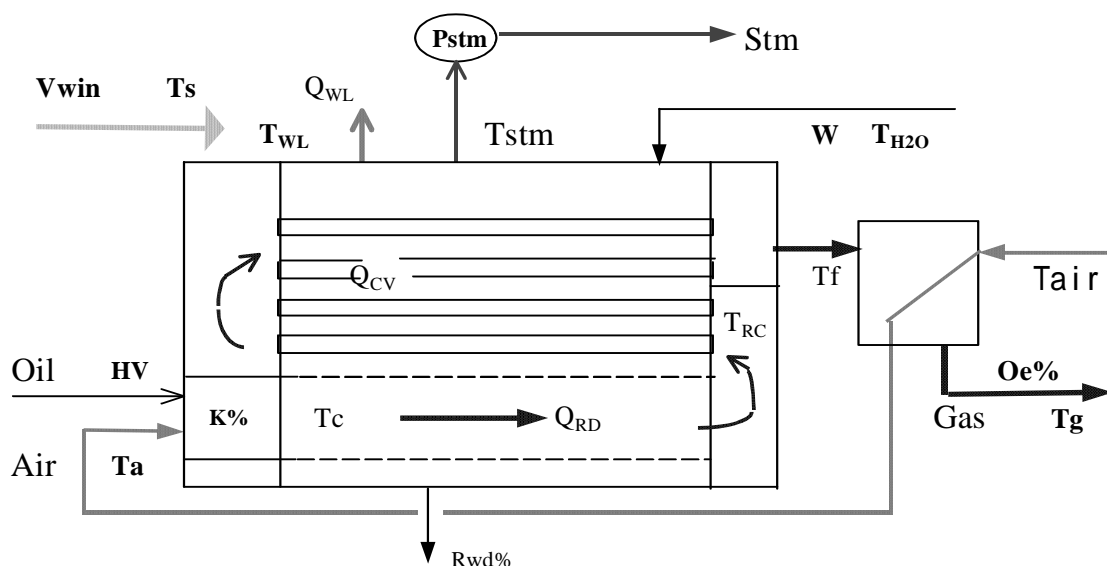




#### (4)三迴煙管鍋爐附複熱器

|             |            |             |
|-------------|------------|-------------|
| 10 ka/cm2G  | 爐壁均溫 56    | 鍋爐負載 86.9 % |
| 10000 ka/hr | 排氣溫度 240   | 排氣熱損 9.2 %  |
| 低壓空氣霧化      | 尾氣溫度 160   | 其他熱損 2.5 %  |
| 燃料油 1.0% S  | 排氣含氫 3.5 % | 鍋爐效率 88.3 % |

圖5.11. 三迴附複熱器煙管鍋爐

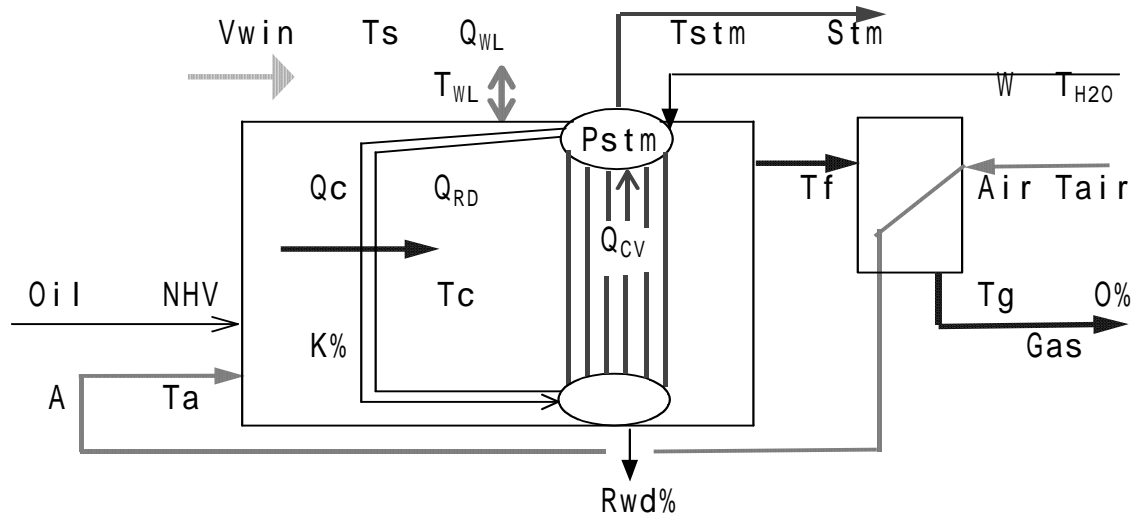


## 2.水管鍋爐作業案例

### (1)低壓水管鍋爐附複熱器

|              |            |             |
|--------------|------------|-------------|
| 10.5 kg/cm2G | 爐壁均溫 62    | 鍋爐負載 90.2 % |
| 31000 kg/hr  | 排氣溫度 312   | 排氣熱損 10.3 % |
| 低壓蒸氣霧化       | 尾氣溫度 185   | 其他熱損 1.8 %  |
| 燃料油 0.5% S   | 排氣含氫 3.0 % | 鍋爐效率 87.9 % |

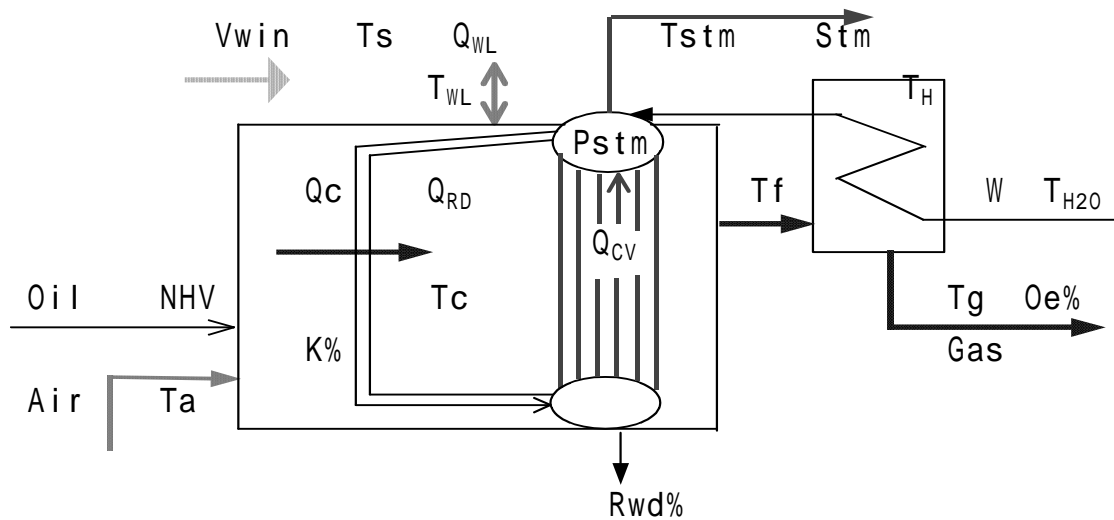
圖 5.12. 低壓附複熱器水管鍋爐



(2)中壓水管鍋爐附節熱器

|                           |            |             |
|---------------------------|------------|-------------|
| 42.5 kg/cm <sup>2</sup> G | 爐壁均溫 82    | 鍋爐負載 79.2 % |
| 32000 kg/hr               | 排氣溫度 345   | 排氣熱損 11.0 % |
| 低壓蒸氣霧化                    | 尾氣溫度 195   | 其他熱損 3.0 %  |
| 燃料油 0.5% S                | 排氣含氧 3.5 % | 鍋爐效率 86.0 % |

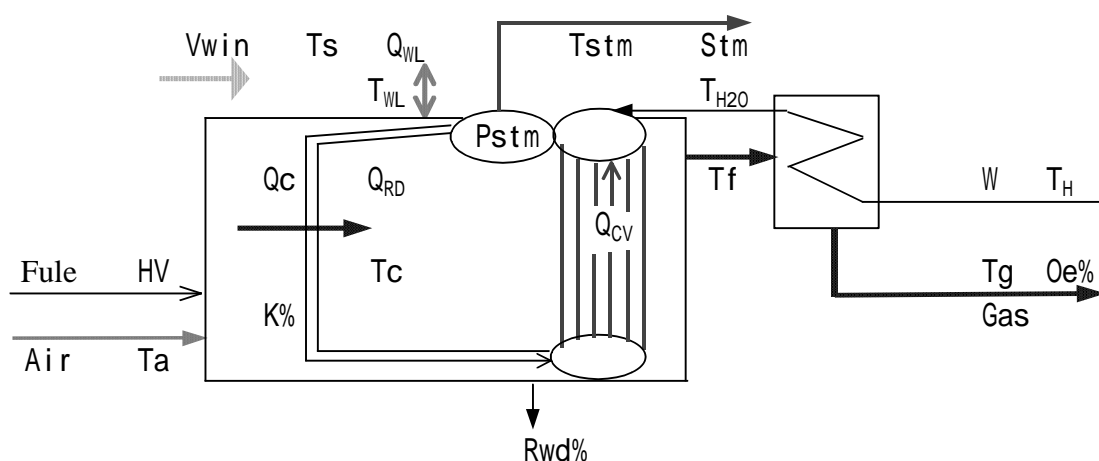
圖 5.13. 中壓附節熱器水管鍋爐



(3)過熱蒸汽水管鍋爐附節熱器

|                           |            |             |
|---------------------------|------------|-------------|
| 49.0 kg/cm <sup>2</sup> G | 爐壁均溫 55    | 鍋爐負載 86.6 % |
| 55000 kg/hr               | 排氣溫度 390   | 排氣熱損 11.7 % |
| 蒸氣過熱 90                   | 尾氣溫度 210   | 其他熱損 2.5 %  |
| 燃料油 0.5% S                | 排氣含氧 3.2 % | 鍋爐效率 85.8 % |

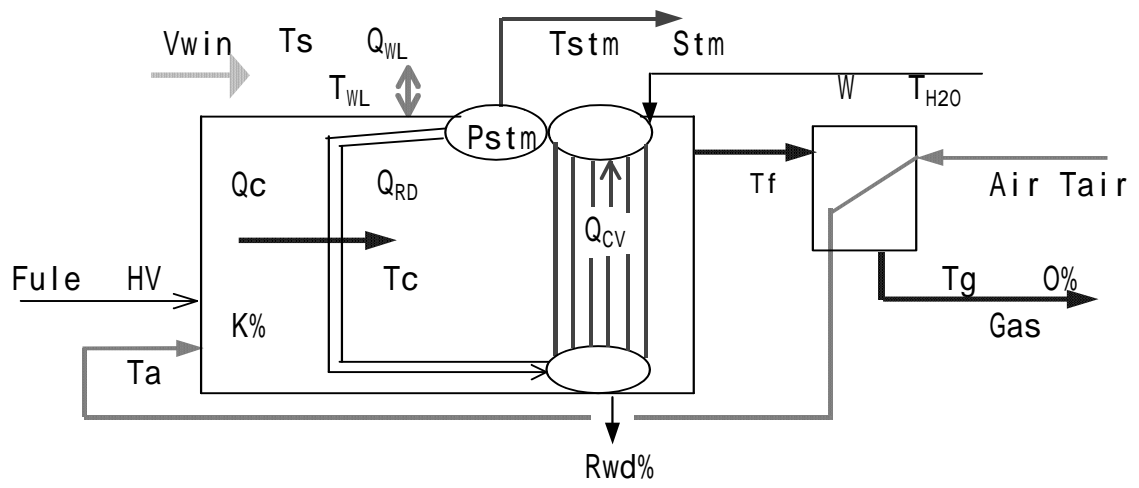
圖 5.14. 過熱蒸汽附節熱器水管鍋爐



(4)過熱蒸汽水管鍋爐附複熱器

|                           |            |             |
|---------------------------|------------|-------------|
| 33.0 kg/cm <sup>2</sup> G | 爐壁均溫 60    | 鍋爐負載 55.1 % |
| 60000 kg/hr               | 排氣溫度 310   | 排氣熱損 11.2 % |
| 蒸氣過熱 150                  | 尾氣溫度 210   | 其他熱損 3.8 %  |
| 燃料油 0.5% S                | 排氣含氧 4.0 % | 鍋爐效率 85.0 % |

圖5.15. 過熱蒸汽附複熱器水管鍋爐





## 六、日本鍋爐作業規範

日本能源結構及耗能特性與我國相似，雖然日本單位產品耗能量已優於大多先進國家，但對能源節約與提升能源使用效率之努力仍不遺餘力，因此蒐集整理其有關鍋爐之作業基準做為我國參考借鏡，以期工廠在能源使用時，能確實達到有效且合理之目標。

### (一)能源使用合理化要項

日本根據能源使用相關法律督促業者執行工廠能源使用之改善，總合能源調查會審議判斷合理化基準於1998年10月見諸通產省公報，條文分基準和目標兩階段自1999年4月1日起實施。摘譯有關鍋爐作業合理化的部分列示如下。

#### 1.能源使用合理化基準

##### 1.1.燃料燃燒的合理化

- (1)燃料燃燒管理指依據設備進行燃料燃燒以及使用燃料之種類，設定與空氣比值之管理標準，以空氣比值為基準設定降低空氣比。
- (2)使用多台燃燒設備時，以提高燃燒設備整體熱效率為目標，設定管理標準以調整各個燃燒設備之燃燒負荷。
- (3)依據燃料之性狀，可針對燃料的粒度、水份、黏度等進行適當調整，以提高燃料燃燒時的燃燒效率。

- (4)確實把握各個燃燒設備之狀況，如燃料的供給量，燃燒時排放廢氣溫度，排氣中殘留氧份量。針對燃燒處理可燃性廢棄物時產生的能源或燃料，應儘可能的回收並加以利用。使用其他燃料時，根據所需改善之項目設定管理標準，定期測量並詳細記錄結果。
- (5)購入新燃燒設備時，燃燒機等燃燒機裝置要適合燃燒設備以及燃料種類，且必需能依照其負荷與燃燒時的變化，調整燃料的供給量與空氣比值。
- (6)購入新的燃燒設備時，通風裝置要能夠調整其通風量以及燃燒室內的壓力。
- (7)鍋爐給水是根據日本工業規格B8223鍋爐給水以及爐水水質規定進行水質管理，以防止傳熱管結垢附著及泥漿、淤渣等沈澱。
- (8)進行加熱設備使用的蒸汽，應維持適當的乾度。

## 1.2.防止輻射傳導熱損失

- (1)用於輸送熱媒及製程流體的配管，與其他相關設備及用來加熱之設備的隔熱工程，依照日本工業規格A9501保溫保冷工程施工標準，及依其規格所規定之條例實施。
- (2)每一主要加熱設備都需確切把握其熱損失之情況，為達改善之目標需設定管理標準，測量爐壁外面溫度、被加熱物溫度、廢氣溫度等，並依其數值進行熱勘定等分析且記錄其結果。

(3)蒸汽祛水器是防止其因操作不良而產生蒸汽外漏所設定之管理標準，並需定期進行維修與檢查。

### 1.3.廢熱的回收利用

(1)廢氣的熱回收利用是配合排出該廢氣之設備，針對廢氣的溫度或回收率來設定管理標準。

(2)廢氣熱回收利用的管理標準，以廢氣之溫度值為基準，設定降低廢氣之溫度提高熱回收率。

(3)蒸汽冷凝水之廢熱回收利用，是針對其蒸汽冷凝水的溫度、流量及其性質之範圍，加以設定管理標準。

(4)為了加強廢熱之利用，需確實把握廢熱的溫度、熱量及排出熱媒體的成份、其他廢熱狀況等重要項目，加以設定管理標準，除定期進行測量外並詳加記錄。

(5)經過加熱後的固體、液體、氣體含有可回收利用的顯熱、潛熱、壓力及可燃成份等，根據其回收之範圍設定管理標準。

### 2.能源使用合理化目標

除了遵守上述各項基準、規則外，在技術及經濟可能範圍內，經由改善能源消耗設備、檢討熱能利用效率、活用剩餘蒸汽的方法，希望以全國能源消費原單位為對象，達成每年平均降低1%設定目標。



## (二)鍋爐作業基準和目標

以蒸發量分類鍋爐並設定空氣比、廢氣溫度的作業基準和目標。

推動主題包括：

- (1)燃料燃燒的合理化
- (2)輻射傳導等熱損失的防止
- (3)廢熱回收的利用。

表6.1. 鍋爐的基準空氣比

| 蒸發量<br>區分 | 負荷率<br>% | 固體燃料       |            | 液體燃料        | 氣體燃料       | 高爐氣其<br>他副產氣 |
|-----------|----------|------------|------------|-------------|------------|--------------|
|           |          | 固定床        | 流動床        |             |            |              |
| 發電業用      | 75 ~ 100 | -          | -          | 1.05 ~ 1.2  | 1.05 ~ 1.1 | 1.2          |
| 30噸以上     | 50 ~ 100 | 1.3 ~ 1.45 | 1.2 ~ 1.45 | 1.10 ~ 1.25 | 1.10 ~ 1.2 | 1.2 ~ 1.3    |
| 10噸 ~ 30  | 50 ~ 100 | 1.3 ~ 1.45 | 1.2 ~ 1.45 | 1.15 ~ 1.3  | 1.15 ~ 1.3 | -            |
| 5噸 ~ 10噸  | 50 ~ 100 | -          | -          | 1.2 ~ 1.3   | 1.2 ~ 1.3  | -            |
| 5噸以下      | 50 ~ 100 | -          | -          | 1.2 ~ 1.3   | 1.2 ~ 1.3  | -            |

表6.2. 鍋爐的目標空氣比

| 蒸發量<br>區分 | 負荷率<br>% | 固體燃料      |            | 液體燃料        | 氣體燃料        | 高爐氣其<br>他副產氣 |
|-----------|----------|-----------|------------|-------------|-------------|--------------|
|           |          | 固定床       | 流動床        |             |             |              |
| 發電業用      | 75 ~ 10  | -         | -          | 1.05 ~ 1.1  | 1.05 ~ 1.1  | 1.15 ~ 1.2   |
| 30噸以上     | 50 ~ 10  | 1.2 ~ 1.3 | 1.2 ~ 1.25 | 1.05 ~ 1.15 | 1.05 ~ 1.15 | 1.2 ~ 1.3    |
| 10噸 ~ 30噸 | 50 ~ 10  | 1.2 ~ 1.3 | 1.2 ~ 1.25 | 1.15 ~ 1.25 | 1.15 ~ 1.25 | -            |
| 5噸 ~ 10噸  | 50 ~ 10  | -         | -          | 1.15 ~ 1.3  | 1.15 ~ 1.25 | -            |
| 5噸以下      | 50 ~ 10  | -         | -          | 1.15 ~ 1.3  | 1.15 ~ 1.25 | -            |

表6.3. 鍋爐的基準廢氣溫度

| 蒸發量<br>區分 | 負荷率<br>% | 固體燃料 |     | 液體燃料 | 氣體燃料 | 高爐氣其<br>他副產氣 |
|-----------|----------|------|-----|------|------|--------------|
|           |          | 固定床  | 流動床 |      |      |              |
| 發電業用      | 75 ~ 10  | -    | -   | 145  | 110  | 200          |

|           |         |     |     |     |     |     |
|-----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 30噸以上     | 50 ~ 10 | 200 | 200 | 200 | 170 | 200 |
| 10噸 ~ 30噸 | 50 ~ 10 | 250 | 200 | 200 | 170 | -   |
| 5噸 ~ 10噸  | 50 ~ 10 | -   | -   | 220 | 200 | -   |
| 5噸以下      | 50 ~ 10 | -   | -   | 250 | 220 | -   |

表6.4. 鍋爐的目標廢氣溫度

| 蒸發量<br>區分 | 負荷率<br>% | 固體燃料 |     | 液體燃料 | 氣體燃料 | 高爐氣其<br>他副產氣 |
|-----------|----------|------|-----|------|------|--------------|
|           |          | 固定床  | 流動床 |      |      |              |
| 發電業用      | 75 ~ 10  | -    | -   | 135  | 110  | 190          |
| 30噸以上     | 50 ~ 10  | 180  | 170 | 160  | 140  | 190          |
| 10噸 ~ 30噸 | 50 ~ 10  | 180  | 170 | 160  | 140  | -            |
| 5噸 ~ 10噸  | 50 ~ 10  | -    | 300 | 180  | 160  | -            |
| 5噸以下      | 50 ~ 10  | -    | 320 | 200  | 180  | -            |

## 七、替代燃料鍋爐系統

國際溫室氣體減量訴求以化石能源為目標，有機及生質廢棄物採掩埋最終處置需考量逸出甲烷效應，焚化熱回收處理雖然也排放二氧化碳，但在替代化石能源之溫室氣體淨值計算上較為有利，且在經濟誘因條件下易被產業接受，因此廢棄物燃燒熱能之有效回收利用應屬可行性極高的應用方案。

廢熱鍋爐之再生能源利用基於兩項因素：工廠有熱能使用需求及可燃性廢棄物。廢棄物的熱值、數量屬於能源供應端，製程使用熱量、條件屬於能源消費端，併入既有鍋爐產能考慮，依照質能平衡計算，足以適當規劃再生能源系統。產業廢棄資源的能源利用和二氧化碳減量關係可以經由各種化石燃料和有機廢棄物的化性、熱值之比較看出，再則分析碳、氫比例及單位熱量價格以尋求成本考量的誘因，相信有助於產業另一種有利的選擇。

廢熱鍋爐系統以工廠處理之廢棄物為對象，強調回收熱能之經濟利益，在產製蒸汽的實際應用上分為兩種方向，其一是投入發電鍋爐與化石燃料混合燃燒產生蒸汽，再生能源於此作為輔助燃料，其二是將廢棄物焚化高溫廢氣導入鍋爐產生蒸汽，化石燃料於此作為輔助燃料。適當的規劃廢棄物處理方式以利用再生能源，當環保訴求可以兼具經濟效益時，則投資效益將使廢棄物處理不再只是成

本上的負擔。

## (一)混合燃燒鍋爐之發展

### 1.流體化床鍋爐的生物質與煤炭混燒

歐洲多國綱要公約(JOULE)1997年在荷蘭的一項研究計劃,是在壓力氣泡流體化床反應器(BFC)中探討生物質與煤的共氣化現象。以切碎的麥莖和其它作物為燃料,設備最大熱容量1.5MW、壓力10bar、溫度在650~900 間,流體化床高2M、直徑0.4M,後接隔熱的均態燃氣區,總裝置4M高,直徑0.5M。實驗模擬包括進料特性、操作條件和氣化效率。進料以生物質分類和調整混合比率,操作分析溫度、空燃比和空氣蒸汽比,效率分析碳素轉化率、燃燒氣組成和不穩定性。

### 2.燃煤鍋爐的生物質和粉煤混燒

美國能源部(DOE)帶動聯合能源技術中心(FETC)、電力研究所(EPRI)和其它發電機構自1997年進行的研發方案,利用現有鍋爐示範生物質與煤的共燃試驗,因為以再生資源取代部分煤燃料是降低CO<sub>2</sub>排放成本最低的方法。雖然歐洲和美國許多發電廠已經有將木材和煤混燒於鍋爐的經驗,可是操作條件數據不多、成本下降有限,因此要研究更低成本的生物質參與混燒模式。這個方案進行六項共燃試驗:

(1)石化廠一座燃煤鍋爐,木材水分45%供熱能佔2%~9%混合進料。

(2)發電廠一座粉煤鍋爐,木材含水率42%~52%佔熱率10%分開進料



◦  
(3)發電廠一座切線燃燒粉煤鍋爐，木材含水率25%~35%熱值達10%

◦  
(4)一座粉煤鍋爐，鋸木屑含水率45%提供1.5%熱值與粉煤同時進料。

(5)發電廠一座火牆式粉煤鍋爐，草類生物質與煤混燒提供熱能10%。

(6)一座大型旋風分離式鍋爐，以混合木料與煤混燒。

### 3.各類發電鍋爐的生物質和煤混燒

國際能源組織(IEA)的一項研究選定六座既有發電廠，均使用木料生物質產生30MWe電力，鍋爐型式及系統組合包括：

(1)爐篋鍋爐(grate fired boiler)

(2)氣泡流體化床(bubbling fluidised bed)

(3)IGCC(integrated gasification combined cycle)

(4)混燒於粉煤鍋爐(co-firing in pulverised coal boiler)

(5)爐篋鍋爐併聯粉煤鍋爐(GF boiler parallel with PC boiler)

(6)爐篋鍋爐併聯NGCC(GF boiler parallel with NG combined cycle)

2000年溫室氣體科技會議(GHGT-5)報告指出各國正發展電廠使用替代化石能源的近程或中程計畫，生質廢棄物替代燃料在任何發電系統下，都有降低成本的利益。從發電技術看，混燒於粉煤成本最低，IGCC因本身建廠投資和運轉維修費用太高因此獲利不明顯。較多選擇是流體

化床燃燒鍋爐，這種電廠已有22座，發電容量共800MWe、電廠熱效率僅25%、投資費用1590~1950\$/KWe、發電成本9.2~11.1c/KWh。

發電廠使用木材加工廢棄物的成本最大項目是初期投資攤提、運轉維修保養費用。1999年分析多國鋸木業、紙漿廠、紙板廠特性，計算出廢棄物收集、運輸、加工的成本仍高，目前技術著重在成本的降低。使用生物質替代化石能源的計畫取決於地區性生物質來源分佈其數量足以有效的發電。

#### 4.各類廢棄物和燃料油混燒

漿紙業將黑液當作燃料投入發電鍋爐與重油共燃的應用已是普遍且成熟的技術，以100噸/hr黑液鍋爐為例，產生410噸/hr、110kg/cm<sup>2</sup>G、510 的過熱蒸汽，發電量可達70Mw，該替代燃料供給熱源約70%。即令經濟效益如此之大，日本業界仍然努力改進其系統的高效率及省力化，如將黑液濃度自60%濃縮至85%以提升熱值，整合熱電負載變化之分配管理。

與燃料油投入鍋爐混燒的其他實例包括廢輪胎、木屑、製紙泥渣等替代燃料。日本漿紙業除了黑液燃料汽電鍋爐外，也併用飽和蒸汽鍋爐以調度製程蒸汽需量變化，許多工廠配置1座以廢棄物為主的鍋爐，燃料供給熱源比例大致為樹皮泥渣60%、廢輪胎30%、重油10%，因此使化石能源、CO<sub>2</sub>排放減量，也獲得成本降低效果。

## (二)製造業廢熱鍋爐實例

由於廢棄物替代能源產生時有變化，電腦模擬條件或試燒實測數據皆只能提供最適操作條件設定及安全操作規範之依據，藉助智慧型監管系統得以簡化變量的複雜性，廢熱鍋爐蒸汽產出必須穩定供應製程，通常需要考慮化石燃料輔助的混用燃燒。設備因有處理能力的上限，為避免燃燒不完全導致污染排放，進料操作方式須在一定的範圍內進行，而了解廢棄物和設備特性應列為第一要務，掌握系統才能獲得能源使用成本降低效益。

表7.1. 廢熱鍋爐替代能源特性參考值

| 項目   | C%   | H%   | 熱值   |
|------|------|------|------|
| 橡膠輪胎 | 77.5 | 8.5  | 6950 |
| 混合塑膠 | 76.7 | 9.4  | 7850 |
| 織品破布 | 44.5 | 5.7  | 3800 |
| 木材木屑 | 45.1 | 5.6  | 3850 |
| 混合紙料 | 39.0 | 5.2  | 3800 |
| 油脂   | 74.0 | 11.0 | 8700 |
| 麵粉   | 34.0 | 5.0  | 2600 |

### 1.橡塑膠製品業案例

#### (1)蒸汽系統整合現況

蒸汽鍋爐1座運轉300日/年、16小時/日，使用燃料油230L/hr，給水溫度70℃，生產8kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽3噸/hr，鍋爐負載60%、效率84%。焚化系統包括一次燃燒、後燃燒、旋風除塵、廢熱鍋爐，

日運轉16小時，處理橡膠、塑膠、皮革廢料108kg/hr，平均熱值5,600kcal/kg，以柴油作輔助燃料投入焚化爐25L/hr、投入廢熱鍋爐20L/hr，廢熱蒸汽鍋爐效率70%，生產8kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽1噸/hr。以柴油13元/L、燃料油7元/L單價計算，全廠總燃料費用10,536仟元/年，CO<sub>2</sub>年排放量3,874噸。

## (2) 替代能源經濟效益

焚化系統的柴油燃料用於前段焚化爐佔56%，因廢熱鍋爐啟停過程較長，加上過量空氣供給較多，效率不及正式的蒸汽鍋爐。焚化系統以柴油作輔助燃料，其價格約是燃料油的1.9倍，降低了廢料替代能源提供的效益。

廢熱鍋爐中由廢棄物燃燒之廢氣提供81%能源，產生蒸汽1噸/hr扣除柴油負擔的19%，替代能源實際有效利用521Mcal/hr熱量，約佔全廠總蒸汽熱能需求的22%。製程蒸汽如以燃料油鍋爐提高負載的方式完全供應，需要增加83L/hr燃料油支出，與廢熱鍋爐使用柴油20L/hr相較，年省燃料費用1,541仟元/年，以蒸汽鍋爐產汽4噸/hr的燃料油費為基準，燃料成本降低15%。廢熱鍋爐及蒸汽管路之投資回收約1.5年。

## (3) 替代能源環保效益

整體來看由於廢棄物減量90%以上，具有委外處理費用的間接效

益，因此總成本的降低仍然相當可觀。廢熱鍋爐合併蒸汽鍋爐系統由於柴油與燃料油用量差距，以蒸汽鍋爐產汽4噸/hr的燃料油用量為基準，可使CO<sub>2</sub>排放減量946噸/年、減率21%。

## 2. 食品製造業案例

### (1) 蒸汽系統整合現況

蒸汽鍋爐1座運轉300日/年、16小時/日，使用燃料油95L/hr，給水溫度60℃，生產8.5kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽1.2噸/hr，鍋爐負載40%、效率83%。焚化系統包括一次燃燒、後燃燒、前置燃燒、廢熱鍋爐，日運轉12小時，處理食用油脂、澱粉質廢料80kg/hr，平均熱值5,000kcal/kg，以柴油作輔助燃料投入焚化爐20L/hr、投入廢熱鍋爐18L/hr，廢熱蒸汽鍋爐效率75%，生產8.5kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽0.8噸/hr。以柴油13元/L、燃料油7元/L單價計算，全廠總燃料費用4,970仟元/年，CO<sub>2</sub>年排放量1,724噸。

### (2) 替代能源經濟效益

焚化系統的柴油燃料用於前段焚化爐佔53%，焚化系統以柴油作輔助燃料，降低了廢料替代能源提供的效益。因廢熱鍋爐操作時間比蒸汽鍋爐短4小時/日，在能源總量和成本計算時須以日運轉為比較基準。

廢熱鍋爐中由廢棄物燃燒之廢氣提供77%能源，產生蒸汽0.8噸

/hr扣除柴油負擔的23%，替代能源實際有效利用熱量4,776Mcal/日，約佔全廠16小時/日總蒸汽熱能需求的27%。製程蒸汽如以燃料油鍋爐提高負載的方式完全供應，需要增加812L/日燃料油支出，與廢熱鍋爐使用柴油216L/日相較，年省燃料費用863仟元/年，以蒸汽鍋爐產汽1.8噸/hr的燃料油費為基準，燃料成本降低18%。廢熱鍋爐及蒸汽管路之投資回收約2年。

### (3)替代能源環保效益

整體來看由於廢棄物減量95%以上，具有委外處理費用的間接效益，因此總成本的降低仍然相當可觀。廢熱鍋爐合併蒸汽鍋爐系統由於柴油與燃料油用量差距，以蒸汽鍋爐產汽1.8噸/hr的燃料油用量為基準，可使CO<sub>2</sub>排放減量516噸/年、減率25%。

## 3.造紙業案例

### (1)蒸汽系統整合現況

蒸汽鍋爐水管式2座均附空氣預熱器回收廢熱，運轉350日/年、24小時/日，合計使用燃料油2,360L/hr，給水溫度94℃，生產8kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽34噸/hr，鍋爐負載55%、效率89%。焚化系統包括流體化床燃燒、廢熱鍋爐、除塵裝置，日運轉24小時，處理廢水污泥、廢漿渣2,500kg/hr，含水率60%之平均熱值1,000kcal/kg，以燃料油作輔助燃料投入焚化爐120L/hr，廢熱蒸汽鍋爐負載52%、效

率75%，生產8kg/cm<sup>2</sup>G飽和蒸汽4.8噸/hr。以燃料油7元/L單價計算，全廠總燃料費用145,824仟元/年，CO<sub>2</sub>年排放量62,496噸。

## (2) 替代能源經濟效益

流體化床焚化系統的爐體較大導致表面熱損失超過5%，加上過量空氣供給較多致排氣含氧8%，效率不及正式的蒸汽鍋爐。焚化系統以燃料油作輔助燃料，因廢料含水率高所以降低了替代能源提供的效益。

廢熱鍋爐中由廢棄物燃燒之廢氣提供69%能源，產生蒸汽4.8噸/hr扣除燃料油負擔的31%，替代能源實際有效利用1,890Mcal/hr熱量，約佔全廠總蒸汽熱能需求的9%。製程蒸汽如以燃料油鍋爐提高負載的方式完全供應，需要增加335L/hr燃料油支出，與焚化及廢熱鍋爐使用120L/hr相較，年省燃料費用12,642仟元/年，以蒸汽鍋爐產汽38.8噸/hr的燃料油費為基準，燃料成本降低8%。流體化床焚化系統、廢熱鍋爐及蒸汽管路之投資回收約4年。

## (3) 替代能源環保效益

整體來看由於廢棄物減量90%以上，具有委外處理費用的間接效益，因此總成本的降低仍然可觀。廢熱鍋爐合併蒸汽鍋爐系統由於燃料油用量減少，以蒸汽鍋爐產汽38.8噸/hr的燃料油用量為基準，可使CO<sub>2</sub>排放減量5,418噸/年、減率8%。

## 八、結論

### 1.鍋爐效率提升仍具潛力

依據測試國內業界產汽量10~55噸範圍之我國燃油蒸汽鍋爐，經驗顯示多數鍋爐作業負載在50~80%，排氣含氧量在3~7%，排氣溫度在170~210℃，爐壁溫度在55~65℃，鍋爐效率以82~87%最為普遍，經由設備裝置及操作條件改善以求能源耗用減量仍具潛力。

### 2.排氣熱回收是改善重點

一般鍋爐排氣溫度高於蒸汽溫度30℃以上，即使作業負載很高，排氣含氧控制良好，鍋爐效率仍難超越88%。我國冬季氣溫甚少低於15℃，且燃料油含硫份已低至0.5~1.0%，應修正設計增加排氣熱回收量，使排氣溫度降為130~160℃，具有2~4%效率提升空間，高效率鍋爐目標可在87~91%範圍內依類型規格差異選定。

### 3.鍋爐作業條件最適化

由於行業差異，一樣的鍋爐設備因產汽規格、運轉特性、負載變化不同，也造成鍋爐運轉效率迥異。檢測鍋爐操作數據及環境條件，利用電腦程式模擬計算燃燒及熱傳效應，因應製程蒸汽量的需求變化，了解鍋爐系統各裝置的限制特性，分析影響效率的缺失，探討改善效率的空間，才能落實鍋爐效率提升的目的。

### 4.運用智慧型監控管理



思索影響能源使用效率的因素，安裝智慧型監控系統建立作業標準，運用實測數據即時分析指引合理作業條件，可以減少異常損失有助於降低生產成本。從管理層面發揮最適化功能之外，並且提供電腦化、資訊化、效率化的助益，持續的降低作業成本是產業積極改善的重點。

## 5. 節約能源兼得環保效益

地球溫室氣體減量是現今國際上極為重視的課題，從燃燒排放二氧化碳氣體減量獲致效果最大。以能源使用效率提升之相關措施做為二氧化碳減量原則可採行節約能源、提高設備使用效率、提升單位能源製程產量、低碳高氫之燃料替換和再生能源的回收利用等手段，因此降低能源用量也可兼顧環保效益。

## 6. 利用有機生質替代能源

國際溫室氣體減量訴求以化石能源為目標，有機及生質廢棄物當輔助燃料共燃或採焚化熱回收處理，在替代化石能源之溫室氣體淨值計算上較為有利，且在經濟誘因條件下易被產業接受。因此汽電鍋爐有效利用廢棄物燃燒熱能應屬可行性很高的方案，少量廢棄物焚化系統以廢熱鍋爐生產低壓蒸汽的效益也有極佳的評價。適當的規劃回收熱能方式，經濟利益將使焚化系統不再只是處理成本的負擔。

## 7. 燃料燃燒技術仍待改進

廢棄物進料熱值穩定性不易控制，熱值和解燃速率難以穩定，共燃

鍋爐或廢熱鍋爐系統設計之操作變化有一定的容許範圍，最適當操作條件之設立須從了解廢棄物組成、物性、化性著手，引用燃燒動力經驗數據及公式，設計電腦軟體程式設定操作條件，模擬系統設備所受影響，探討熱量分佈及環保條件，將能獲得最佳經濟效益。

## 九、編後語

中技社節能技術發展中心，主要任務是配合國家能源政策，執行各項節約能源技術服務計畫，藉由訪測、診斷找出廠商能源使用缺失，尋找節能機會，對於能源用戶提供能源效率評估、改善規劃及製程操作等服務工作外，為能源管理人員培訓人才，亦印製節約能源海報、貼紙及出版各種節能成果專刊、節能技術手冊等廣宣品，全面推廣節約能源觀念。

此手冊為本中心多年來從事鍋爐系統能源節約改善工作時，所蒐集之各項資料及現場經驗累積，其中包括高效率鍋爐作業、智慧型鍋爐功能、蒸汽鍋爐特性、替代燃料鍋爐系統及節能探討等相關資訊。

此手冊的編輯是在節能中心王主任文伯博士及翁副主任信二的指導下，由沈組長仲民負責主編，陳組長信男之彙整以及忻珮雯小姐編排，才得以完成。倉促間內容中不免有所疏漏和缺失，還望產、官、學界的各位先進不吝指正！