

行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：實習)

(裝訂線)

大型鍋爐之粉煤機細度控制與燃燒設計原理之技術

服務機關：台灣電力公司台中發電廠

出國人 職 稱：機械工程師

姓 名：邱士展

出國地區：英、德

出國日期：95/10/15~95/11/13

報告日期：96/01/05

目 次

壹、前言-----	1
貳、研習目的-----	1
參、研習過程	
一、燃燒原理及設備介紹-----	1
二、粉煤鍋爐燃燒最佳化-----	6
三、粉煤再燃降低 NOX 的技術簡介-----	13
肆、心得及建議-----	14

大型鍋爐之粉煤機細度控制與燃燒設計原理之技術出國研習報告

壹、前言

大型鍋爐之粉煤機細度控制影響鍋爐燃燒至鉅，而整個鍋爐包含粉煤機在內燃燒系統是決定鍋爐效能及排放的重要因素，因此鍋爐燃燒最佳化便成為提升鍋爐性能的重要工作。此次奉派出國研習大型鍋爐之粉煤機細度控制與燃燒設計原理之技術，實感榮幸，但因職從事鍋爐主機維修工作時間不長，且未實際參與過粉煤機的維護工作，因此倍感惶恐，惟恐有辱使命。

貳、研習目的

粉煤機的性能最佳化是燃燒最佳化成功的第一步。其亦須考慮當企圖將燃燒、整體的機組性能、操作性、可靠度及容量最佳化時粉煤機間的交互關係。

由於當今世界上許多機組面臨煤質多樣化的考驗，粉煤機的容量便成為一大考驗。對整廠性能最佳化而言，低 NOx 的燃燒以及使火焰在爐膛內以有限的時間完成燃燒是燃燒最佳化的絕對因素。當粉煤機性能不佳時，不只有爐膛出口溫度增高、結渣增加或者 LOI 增高現象外，過粗的飛灰顆粒亦會影響 ESP 的性能。

此外，如因粉煤機未做好燃煤分配的最佳化，鍋爐會產生二次燃燒、過熱器及再熱器爐管金屬溫度過高，以及水牆熱量的浪費的負面的衝擊。

典型的粉煤細度須有 70~80% 能通過 200mesh 的網目，因為根據經驗，粉煤細度不良通常伴隨而來的是灰中未燃碳增高，容易結渣，燃氣損失以及較大量的噴水減溫。所以，要達到燃燒最佳化的首要，便是先做粉煤機最佳化。

降低燃煤鍋爐 NOx 排放的燃燒技術包括選用低 NOx 燃燒器、爐內採用低過剩空氣運轉、沿爐膛高度和水平方向的空氣分級和燃料分級燃燒等

燃料分級燃燒作為降低燃煤鍋爐 NOx 排放的最為有效的爐內措施，在國外已經成功地應用於電廠鍋爐上，當以少量燃料氮的燃油和不含燃料氮的天然氣為再燃燃料(占輸入熱量的比例為 10 ~15)時，NO 排放可降低 60 以上。如日本的 Nakoso 電廠採用燃料分級燃燒後，NOx 排放量降為 120mg/Nm³；在美國也有令人滿意的結果，NO 的還原率為 58%~77%。

參、研習過程

此次出國研習由中、九十機鍋爐製造廠家 Mitsui Babcock 的專案經理 Mr. Martin Strang 以及粉煤機製造廠家 Loesche 的 Mr. Anthony Landers 接待，除討論相關議題外，並安排參觀了英格蘭地區 Tilbury、Ratcliffe-on-Soar 和 Drax 三座燃煤電廠，實際了解國外電廠的營運、鍋爐設備改善維護以及電廠環境維護的情形，作為日後設備維護的參考。

一、燃燒原理及設備介紹

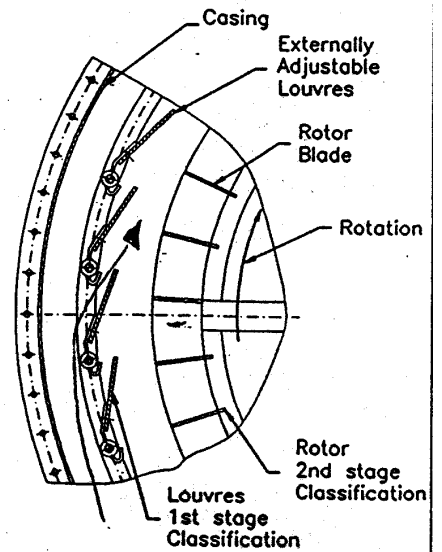
1、粉煤機

煤炭由生煤下降管進到磨輪組室，經磨輪磨成細粉後，由分煤器出口、煤管至鍋爐燃燒器，送入鍋爐燃燒。粉煤細度由磨輪之彈簧或油壓加載機構來調整其壓力。黃鐵礦槽的進出口均裝有氣動閘閥，進口閘閥可與粉煤機隔離，正常運轉此閘開啟，以容許黃鐵礦從粉煤機排放到黃鐵礦槽內。氣閘集管裝置在一次空氣室之入口及側面處，以承接蒸汽或二氧化碳、氮等，做為緊急時氣閘之介質。氣封空氣作為防止熱空氣與煤塵沿著托架之迴轉外表面漏到粉煤機之外。

粉煤機簡單地可分為三部份：

- A、頂室部份：包含分煤器調整裝置，分煤器內錐、分煤器出口、生煤進管、氣封空氣集管以及粉煤機出口連接管件。
- B、中間室部份：包含滾輪組、壓力機構、彈簧機構、加載彈簧等。
- C、底室部份：包含喉環、托架、環座、磨環、托架氣封、黃鐵礦刮板、黃鐵礦槽、一次空氣及氣閘連接件等。

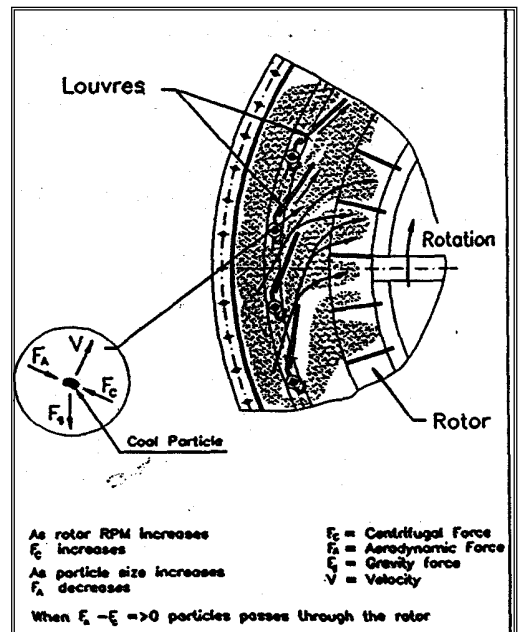
分煤器是一種空氣/煤粉分離裝置，它直接被安裝在粉煤機上方，其具有二個功用：一是將細顆粒煤粉及粗顆粒煤粉進行分離，允許較細顆粒的煤粉進入燃燒器，同時將較粗顆粒的煤粉落回粉煤機磨煤區再進一步的研磨。另一功能為使一次空氣與粉煤的固、氣二相混合物能更均勻。



圖一

分煤器可分為靜態分煤器和動態分煤器：靜態分煤器運作是根據氣旋觀念，用一組百葉窗型葉片使空氣和煤在分煤器位置建立一個旋渦，在此位置一部份較粗的煤粉顆粒落回粉煤機磨煤區，但允許部份較粗的煤粉顆粒逃脫和細煤粉顆粒一起進入燃燒器，在相同時間返回的粗煤粉顆粒亦將部份細煤粉顆粒打回粉煤機再研磨。

動態分煤器煤粉經由一次空氣攜帶經分煤器離開粉煤機，當通過前置靜葉片空氣與煤粉被強迫進入一個順時針的渦流，使這兩者達到均一的混合。當強迫進入且方向產生改變，較粗顆粒煤粉減速到一定速度，無法繼續懸浮在空氣中，因此該粒子掉落回到磨盤。



圖二 分煤器原理

空氣/煤粉混合物繼續以渦旋方向朝外圍

可調整式葉片前進，在該處被加速藉由葉片邊緣穿過噴嘴(如圖二)。當空氣/煤粉混合物速度被增加，較大顆粒物經由轉子表面在切線方向被加速。由於慣性作用無法轉換方向，該較大顆粒被限制在轉子外圈並且因重力作用落回研磨區，以此方式避開與轉子的接觸。此百葉窗形葉片是靜止的，屬第一段的分離。

較小的煤粉通過靜葉片轉彎朝向轉子，粒子在轉子間被分成二個力量如圖四所示，該煤粉經由轉動葉片和一次空氣流動在分離區受離心力及空氣動力所影響，因此只要 $FA > Fc$ 煤粉將通過轉子，所以轉子的速度與通過靜葉片切線方向的速度及通過轉子葉片的空氣量成比例。該轉子是動態的屬第二段分離。

煤粉的顆粒大小、分煤器的動力和通過分煤器壓力損失的最佳比例，由靜葉片設定的位置決定。

空氣/煤粉混合物通過轉子繼續朝粉煤機出口前進，粉煤機出口裝設有可調整葉片(導葉片)，導葉片主要的功用在控制煤流，如此才可控制每一隻煤管有相同數量的煤粉分送到各燃燒器。

粉煤細度隨著葉輪迴轉速度而變，葉輪之速度可隨所需要的粉煤細度而調整。速度越快，粉煤細度越細。反之速度越慢，粉煤細度越粗。

2、煤質與燃燒

燃煤鍋爐的煤質的四個特性會對鍋爐容量、結渣 NO_x 值以及蒸汽的溫度有明的衝擊，其中包括：

- 灰的熔點
- 可磨性指數
- 燃料中固定碳與揮發物的比例
- 灰中影響結渣的礦物成份

以下項目有助於了解鍋爐燃燒特性，以及進行改善時的工作項目

A、灰的熔點

如果灰的熔點過低，容易在過熱器的進口產生結渣。理想灰的軟化溫度應比爐膛出口的實際最高燃氣溫度高 $100\sim 150^{\circ}F$ ($38\sim 66^{\circ}C$)，當灰熔點太高，高到 $2800^{\circ}F$ ($1535^{\circ}C$) 時，較多的熱量會在爐膛較低的位置被吸收，使得蒸汽溫度低於設計溫度，因而降低整個機組的效率。

B、粉煤機的容量

粉煤機的容量並非單純地指煤炭的投入量而已，其結合 3 個因素：投入量、粉煤細度及可磨性指數 HGI。即粉煤在一定的 HGI、生煤尺寸及粉煤細度時的投入量而言。此外，可接受的排渣量及驅動馬達的容量也是重要因素。

因粉煤機為燃煤鍋爐的心臟，粉煤機性能的好壞通常意謂著鍋爐的性能好壞，一個好的鍋爐的性能則以燃燒後的 NOx 值、飛灰中的 LOI 值、底灰中的碳含量、鍋爐結渣以及金屬溫度來判斷。

C、HGI 可磨性指數

可磨性指數對粉煤細度及分布有很大的影響。1960 到 1970 年代設計的鍋爐大都以 50HGI 以及 70%通過 200mesh 為基準，如果以 40HGI 及 75%通過 200mesh 的標準對這些老的粉煤機進行最佳化時，則需要更大的研磨壓力、更高頻率的粉煤機大修，或者必須更換容量更大的粉煤機了。

D、低 NOx 產生量低的燃料 (NOx-friendly fuels)

燃煤中的揮發物成份、固定碳與揮發物的比值 (FC/VM ratio) 及含氮量對 NOx 的排放有很大的影響。揮發性物質含量愈高，則 NOx 的排放量愈低，因此燃煤鍋爐要調整到最佳的 NOx 排放，燃料的選擇就相當重要。舉例而言，當燃煤的揮發物少而含氮量較高時，NOx 量就會增高。這種燃料在一次風量大，而二次風不平衡時，NOx 就會偏高。一般遇到 NOx 偏高時，大都會降低鍋爐的過剩空氣量，如果空燃比沒有最佳化時，這樣的操作方式反而會使燃燒延後到過熱器區。

E、灰的成份

某些灰的成分會影響爐膛出口的結渣。對煙煤(Bituminous coal)而言，鐵是最困擾的元素。表 1~5 為典型煙煤的灰融化及成分分析表

Table 1. Proximate analysis		Table 2. Proximate analysis	
As received	typical		
Moisture (wt%)	6.3		
Volatile matter (wt%)	34.77	Volatile matter (wt%)	37.11
Fixed carbon (wt%)	51.85	Fixed carbon (wt%)	55.34
Ash (wt%)	7.07	Ash (wt%)	7.55
Sulphur (wt%)	1.88	Sulphur (wt%)	2.01
Heating value (Btu/lb)	13,049	Heating value (Btu/lb)	13,926
		MAF (Btu/lb)	15,036

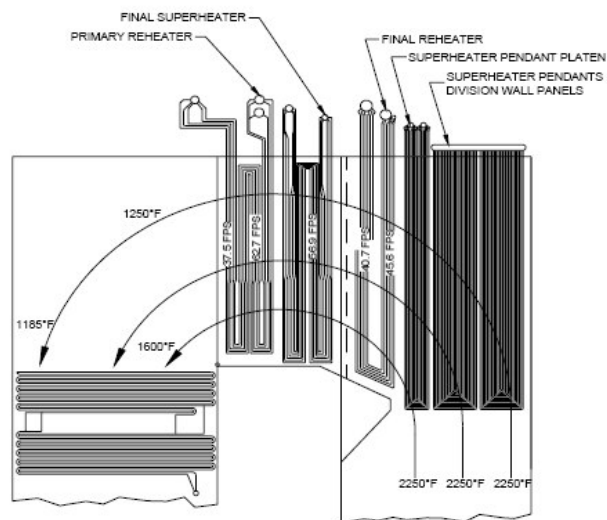
Table 3. Ultimate analysis			Table 4. Ash fusion temperature			
	Dry	As received	Reducing	°F	°C	
Carbon	76.81	71.97	IT	2145	1174	
Hydrogen	5.07	4.75	ST	H=W	2274	1246
Nitrogen	1.6	1.5	HT	H=1/2W	2416	1324

Table 3. Ultimate analysis			Table 4. Ash fusion temperature			
Chlorine	0.11	0.1	FT		2448	1342
Sulphur	2.01	1.88	Oxidnation		°F	°C
Ash	7.55	7.07	IT		2515	1379
Moisture	--	6.3	ST	H=W	2274	1246
Oxygen	6.85	6.42	HT	H=1/2W	2601	1427
			FT		2615	1435

Table 5. Heating value as received		
	Gross	Net ISO
Btu/lb	13,049	12,565
Kcal/kg	7253	6958
GJ/Mt	30.33	29.21
HGI	53	

在還原的氣氛下須注意灰的軟化及流動溫度，當某些特別的煤質在還原的環境下燃燒時，有較低的熔化溫度，對爐膛出口結渣會有較大的影響，在此值得注意的是灰的流動溫度在還原環境比在氧化環境還低 167°F (70°C)。

理想狀況下，爐膛出口燃氣溫度(FEGT)低於灰的軟化溫度。為符合今日對 NOx 排放的要求，許多鍋爐的爐膛出口在特定的位置氧氣含量幾乎為 0。當燃料和空氣在低 NOx 燃燒器的系統內被高度層化時，結渣發生機率就會增高，而



圖三 燃氣分布情形

當爐膛上方有許多零過剩空氣區或在還原環境下，不只灰會熔化或變得膠著，且會有較高的燃氣溫度，有時甚至高出 300~500°F (149~200°C)。

以上煤質的 4 個要素，可藉由燃燒最佳化來改善之。

二、粉煤鍋爐燃燒最佳化

燃燒最佳化以降低 NOx 排放為目的，可以結合 OFA 改善以及先進的 LNB 技術來改善既有的 LOW NOx 燃燒系統，此不需高成本及改善已安裝的設備的很好選擇。

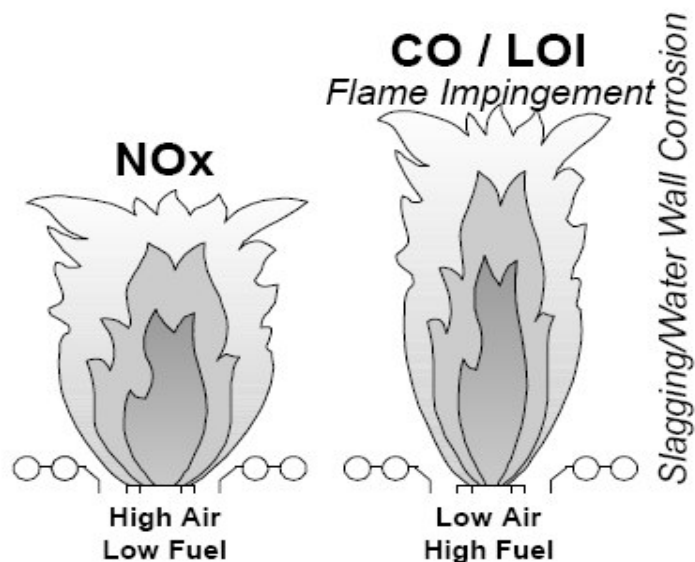
所有低 NOx 的燃燒系統必須仰賴燃燒器空氣及粉煤的平衡，藉由監視及控制進入燃燒器的空氣及煤流，既有的系統亦可如同新的設備一般達到較低 NOx 的排放並改善鍋爐的運轉性能。

如前面所述，許多燃煤鍋爐都會遇到空氣與燃料分布不均的問題，會導致下列現象：

- ◎ 排放特性不佳
- ◎ 飛灰中的未燃碳增加
- ◎ 鍋爐出口過剩空氣不正常
- ◎ 蒸汽溫度不平均
- ◎ 火焰撞擊
- ◎ 結渣增加
- ◎ 水牆熱量浪費

任何偏離設計的燃燒器會運轉在燃料過多或過少的狀態下。燃料過多的燃燒器產生大量的 CO、高 LOI 以及較長的火焰，此時會減少燃氣的過剩空氣（如圖四）

另一方面燃料不足的 BNR 在 O₂ 較高的情形下，生成較多的 NOx，兩方面的結果是出口燃氣有高的 CO 或較高 NOx，此外 LOI 值亦會增高。

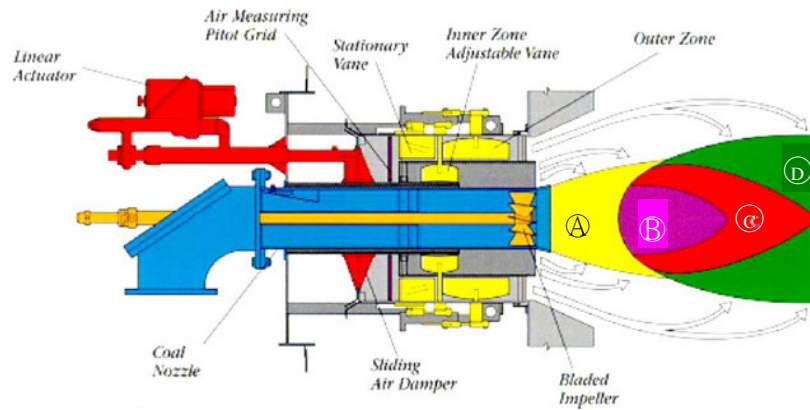


圖四

1、燃燒系統的性能要求

粉煤機性能最佳化為燃燒最佳化的第一步，燃燒最佳化的要件有 70~80% 與粉煤機及粉煤系統傳送有關，當進行燃燒最佳化時，必須考慮其與鍋爐性能間的相互關係。粉煤機性能最佳化需達到以下要求：

A、飼煤量及煤粒的大小必須保持固定，生煤的尺寸最好在直徑 3/4" ~ 1" 之間。



- A - 揮發物釋放區 (Devolatilization Zone)
- B - 還原區 (Production of Reducing Species)
- C - NO_x 分解區 (NO_x Decomposition Zone)
- D - 焦碳氧化區 (Char Oxidizing Zone)

圖五

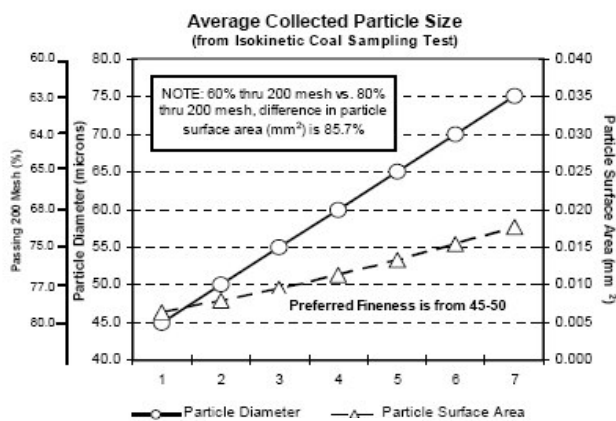
B、飼煤的量測及控制儘可能精確。飼煤機以稱重式為佳。

C、一次風的流量必須精確量測及控制在±3%的誤差內。

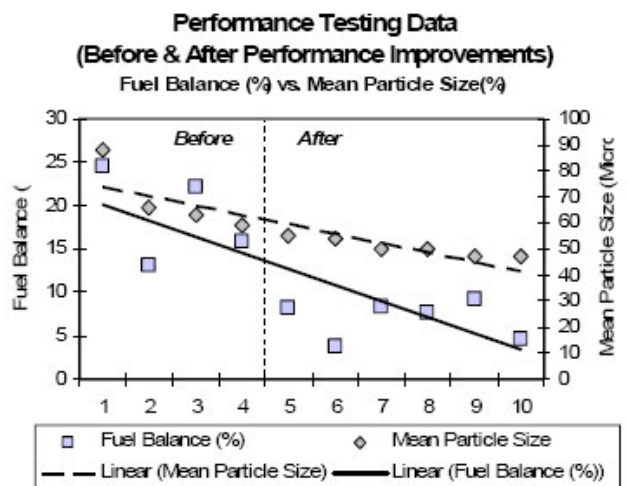
D、一次風與燃料的比例須精確控制保持在最小值以上。

當一次風流量最佳化時，可以降低冷空氣流量，改善 AH x-ratio 及降低燃氣損失，當一次風流量減少到最佳化時，會因在富燃料狀態下揮發物釋放區的過剩空氣降低而減少 NO_x 值，最佳化的一次風會降低對牆式鍋爐的火焰長度，減少板狀過熱器噴水減溫的水量及吹灰器輔助蒸汽的消耗。

E、粉煤細度通過 200mesh 網目需超過 75%以上，通過 50mesh 的粉煤必須



圖六



圖七

小於 0.1%，此量測為在垂直的粉煤管上使用等動量粉煤取樣器量測而得。

為什麼需要更好的粉煤細度呢？圖六所示，粉煤細度 60%通過 200mesh 與 80%通過 200mesh 的粉煤粒表面積相差達到 85.7%。簡言之，適當的粉煤細度以及理想的空燃比對燃燒特性及排放的控制是絕對重要的，當粉煤細度增加時，可以改善粉煤的平衡，此因較重的粗粉煤顆粒在一定速度的空氣中具較大的動量，容易與因質量小而具較低動量的較細的粉煤分離層化。粗細粉煤分離後，會因空氣流的不平衡使得粉煤與空氣的平衡惡化。且燃燒會因大量的粗粉煤顆粒使得 dirty air 的流速降到最低，此即為何需做好 clean air 的平衡以使粉煤管間具有相同的阻抗，否則在使用可調整孔口板做粉煤管平衡時，便很難重覆得到相同的設定值。

此外，粉煤分佈改善會使爐膛燃燒更均勻，也使爐膛內的過剩空氣分布更均勻。根據研究，粉煤在燃燒器噴嘴出口的細度分布在 45~50um 時會產生形狀較對稱的火燄形狀。

F、粉煤管須量測 Clean Air 的速度，各粉煤管誤差須在±2%以內，其調整可利用裝設孔口板在粉煤管上來調整。

G、粉煤管的流速須大於 3300fpm。

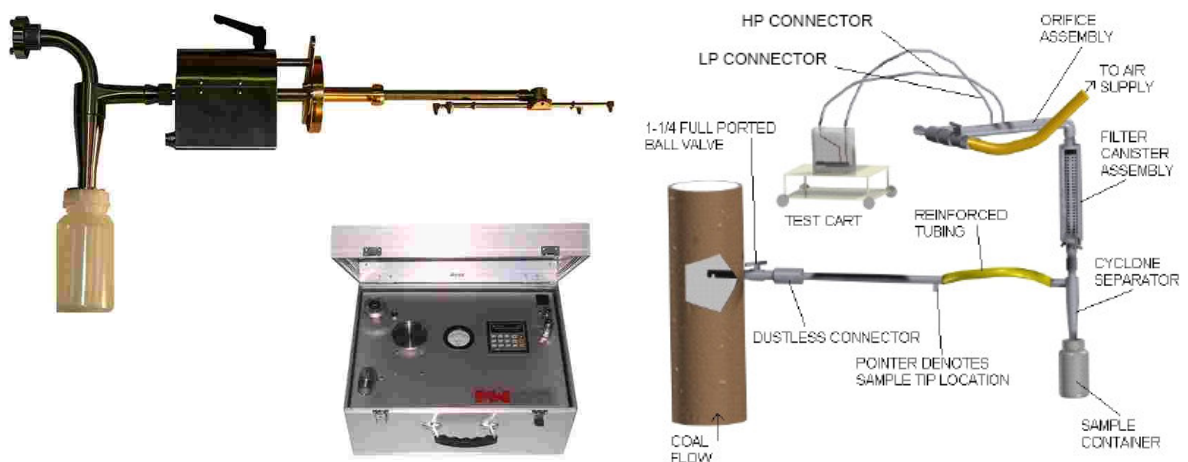
粉煤管的流速必須大於火焰的傳播速度 3300fpm，以防止粉煤管發生火回現象。

H、粉煤管量測 Dirty Air 的速度必須在±5%的平均值。

I、粉煤管流量平衡必須在平均值±10%以內。

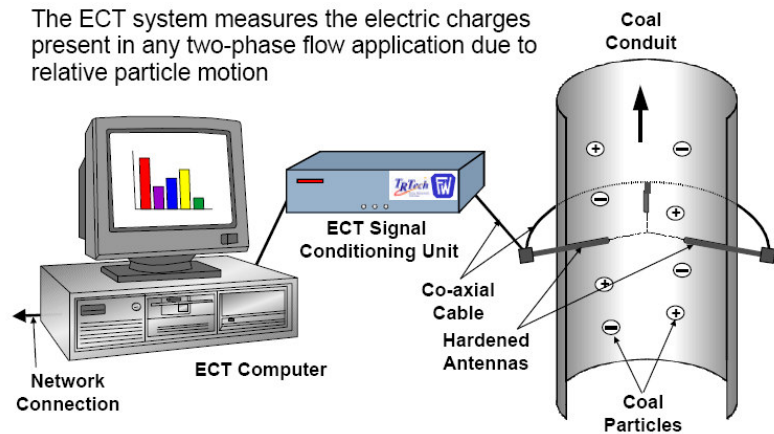
粉煤在粉煤管中由空氣帶動而流動，且在管中流動並不是均勻分佈於其管路截面積，尤其經過彎管處更是集中分佈於管路的某一側，因此粉煤流量之量測與取樣必須有一適當且精確的方法，以合理取得具有代表性之樣品。

目前量測方法大都採用 ISO 9931 方法，使用旋轉探測取樣器(Rotor Probe) 以「近似等動量(near-isokinetic)」連續收集粉煤樣品，故其所取得之值接近粉煤管內煤粉流動之真實值，此取得之樣品可供評估各個燃燒



圖七 ISO 9931 等動量測儀及量測應用情形

另外，目前許多廠家已開發出線上連續量測技術，如利用感應電荷變化量測的 ECT（圖八）、超音波量測法、微波量測法等，以提高運轉時效率。



圖八 ECT ON-LINE 量測

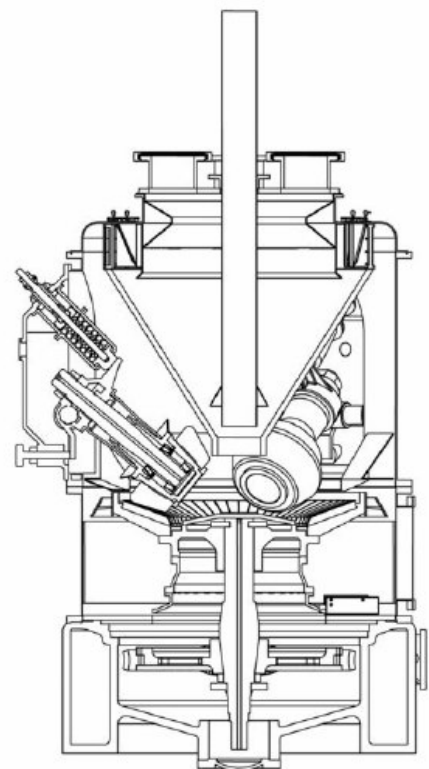
J、粉煤機的動力在低 HGI 煤炭或低熱值煤時（即會超過設計容量）粉煤機的馬達必須保持在額定值以下，以能達到所期望的性能。

K、粉煤管溫度在使用低揮發性煤時需在 $165\sim 175^{\circ}\text{F}$ ，高揮發性煤則為 150°F 。

2、機械設備調整

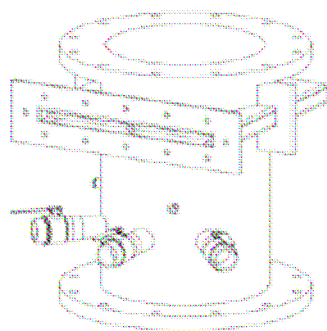
要達到粉煤機最佳化，廠家建議機械調整的步驟如下：

- A、粉煤機裝置適合尺寸的喉塊、擋板及改善初步的分煤效果，及在可接受的空燃比時可以確保得到最佳性能。
- B、與靜態或動態分煤器無關，必須使其達到最佳轉速防止分煤中斷或阻塞。
- C、為防止粗粉煤在分煤器內不會重覆循環及確保分煤不會中斷，可以在裝設倒置的錐筒、擋板及調整其他內部的餘隙或裕度最佳化。
- D、粉煤機出口柱塞必須調整在最佳化，使其在加壓狀態下得到向上的層流的流量及速度。
- E、Classifier Cone 的表面及／或耐磨陶瓷必須平滑，以使堵塞降到最小及最佳的分煤循環。
- F、為達粉煤管平衡，可藉安裝孔口板調

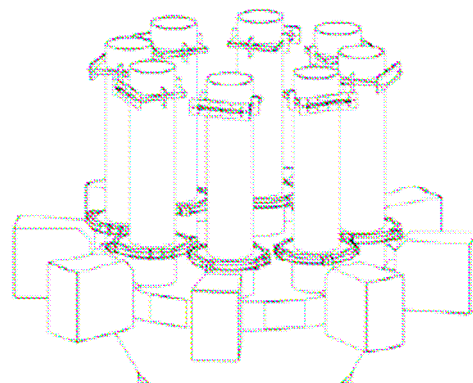


圖九 下煤管上裝設錐狀筒防止粗粉煤循環短路

整，也有廠商製作一體式的孔口板以搭配粉煤管，便於安裝。

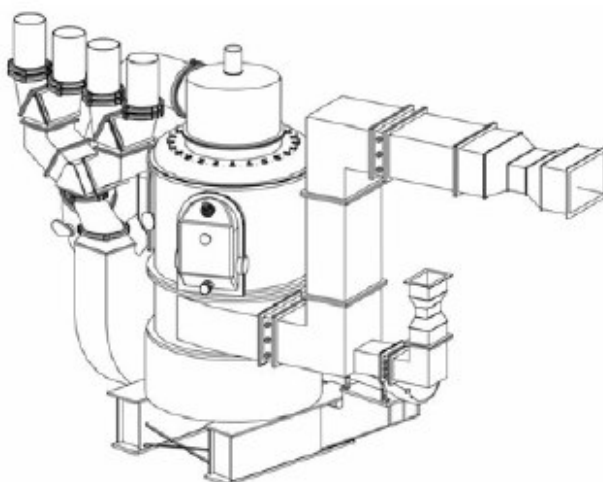


圖十 模組化孔口板組合



圖十一 安裝在粉煤機的模組化孔口板組合

G、為使一次風量測精度達到 $\pm 2\sim 3\%$ 之間，風道形狀設計成文式管的形狀或配以高精度的量測頭，以便可以長期及重覆量測。



圖十二 風道形狀設計成文式管狀，提高量測精度

H、粉煤管阻抗的平衡為粉煤流量平衡的第一步，粉煤細度與適當的空燃比量達到燃燒最佳化的重要條件，對於達到一定的效率及排放控制粉燃燒演重要的角色，當細度增加時，粉煤平衡得以改善。

I、分煤器出口閥必須有良好的操作性能，以閘刀閥（KNIFE GATE VALVE）為佳。避免粉煤循環受阻，如果有 DCS 邏輯時須調整開關狀態到最佳。

J、磨輪加載彈簧張力須調整到最佳的壓力，不僅可強化研磨能力，且可避免樞軸受到不均勻的應力。

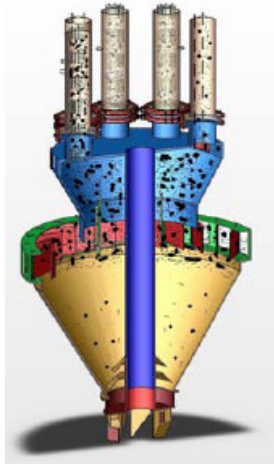
前面曾提到粉煤機的性能最佳化是燃燒最佳化成功的的第一步。各粉煤管阻抗平衡為粉煤管流量平衡的第一步。良好的粉煤細度及送到燃燒器的合理的空燃比是達到燃燒性能的重要條件，也可藉此得到理想的熱效率及排放。

K、BOFA 的增設

利用抽取二次風道的二次風經過一增壓風扇進入火上空氣口，使爐內燃燒更加完

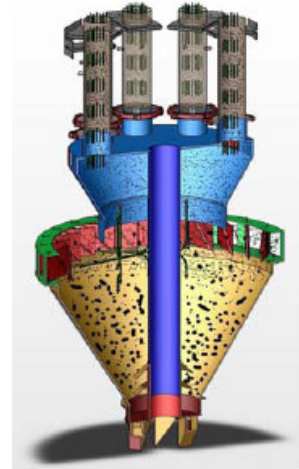
全，也可降低 NOx 的產生，此為 BOFA (Boosted overfire air-flow) 。

“Poor Fuel Balance” (Classifier Problem)



圖十三粉煤平衡不良

“Good Fuel Balance”



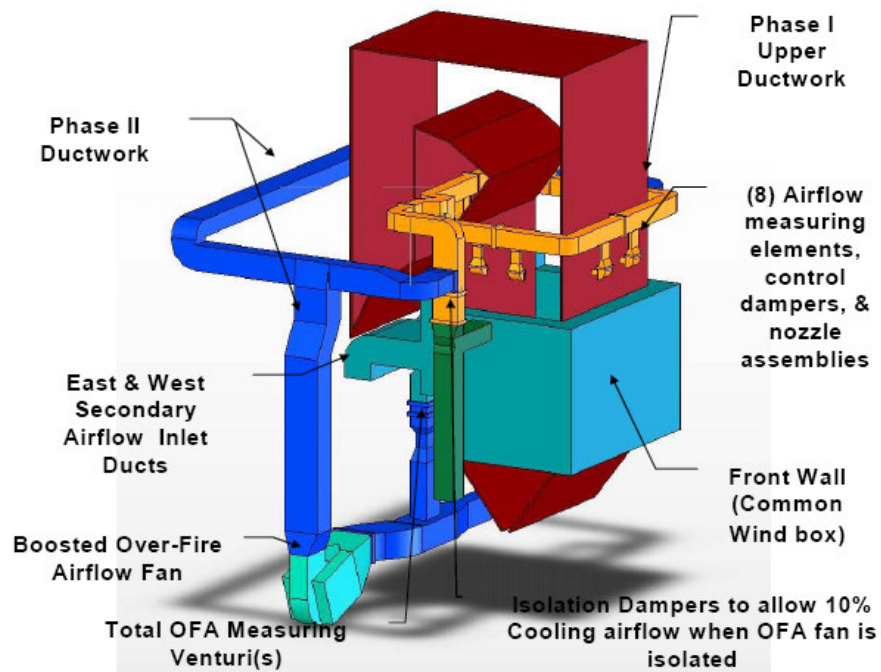
圖十四 良好的粉煤平衡

增壓風扇可提升燃燒空氣的壓力 10~15 in 水柱，在此壓力下可以提供更大的穿透速度幫助燃燒，有助於降低出口燃氣的 LOI 及 CO 含量，並提供足夠的氧氣協助飛灰中的炭冷卻在點火溫度 (ignition temperature) 下前完全燃燒。

3、調校及檢測週期

為維持粉煤管平衡及燃燒最佳，專業的廠商建議應好以下定期調校及檢測：

STORM Boosted OFA System as successfully applied to a wall fired boiler



圖十五 BOFA 的安裝配置情形

- A、每週進行具代表性的飛灰含碳量的取樣。
- B、每月測試粉煤細度。
- C、每月進行空氣預熱器能測試。
- D、每季測量從爐膛到煙囪氧氣含量的變化。
- E、每季進行飼煤機的調校。
- F、每季進行更精確的粉煤細度及分佈的量測。
- G、每半年進行氣流量測元件的調校（一次風、二次風及 OFA）。
- H、每半年進行粉煤管 Clean-air 的測試，並達到平衡誤差在 $\pm 2\%$ 內。
- I、大修前做鍋爐的評估測試，做為大修後調整的依據。

坦言之，以本廠（甚至各火力電廠）現有人力、物力很難依廠商建議進行定期的調校與測試，不過必須選擇適當的機組或訂定檢測計畫來逐步調整。當然其中又必須由各部門通力合作，組成團隊或由協力廠商協助執行方可達到。

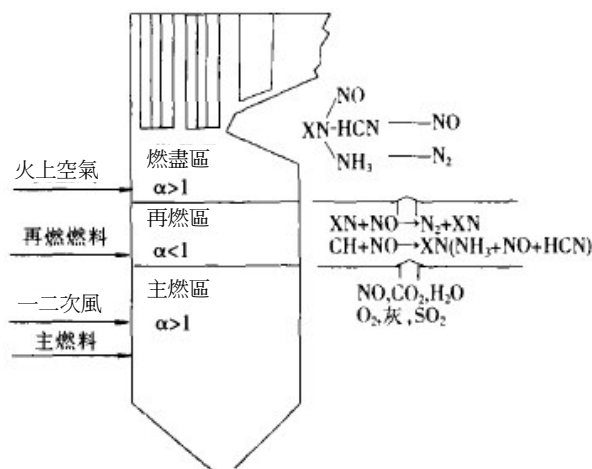
4、13 個燃燒最佳化的要件：

綜合以上的方法，廠家歸納出 13 個要件，做為燃燒最佳化的基準，並已在許多電廠實踐而到相當成果：

- A、爐膛出口氧氣含量最好必須在 3%。
- B、以 Clean Air 測試粉煤管至各燃燒器的平衡，必須在 $\pm 2\%$ 之內。
- C、使用 Dirty Air 速度規測試粉煤管至各燃燒器的平衡，必須在 $\pm 5\%$ 之內。
- D、粉煤管的粉煤流量平衡，必須在 $\pm 10\%$ 之內。
- E、粉煤細度通過 200mesh 網目需超過 75%以上，通過 50mesh 的粉煤必須小於 0.1%，
- F、一次風的流量必須精確量測及控制在 $\pm 3\%$ 的誤差內。
- G、火上空氣必須精確量測及控制在 $\pm 3\%$ 的誤差內。
- H、一次風與燃料的比例須精確控制保持在最小值以上。
- I、粉煤管的流速須大於 3300fpm。
- J、燃燒器及風門的機械裕度必須在 $\pm 1/4$ "之內。
- K、二次風到燃燒器的差壓分布必須在 $\pm 5\%$ 到 $\pm 10\%$ 之間。
- L、到粉煤機的飼煤必須順暢，其量測及控制須提升精準度，並以重力式飼煤機為佳。
- M、飼煤的品質及尺寸必須保持一定，保持固定的生煤大小將是最佳化好的開始。

三、粉煤再燃降低 NOx 的技術簡介

1、煤粉再燃燃燒技術原理



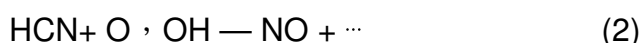
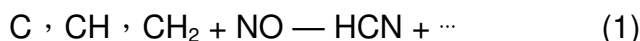
圖十六 燃料分級燃燒降 NOx 排放示意圖

利用已生成的NOx 在遇到烴根CHi、未完全燃燒產物CO、C和未完全燃燒中間產物HCN基、NH 基時，會被還原為N₂的原理，將整個爐膛分為3個區：主燃區，再燃區與燃盡區。將占入爐總熱量80 ~85% 的燃料送入α>1的主燃區，使燃料中的氮盡可能地轉化為NOx。其餘占入爐總熱量15 ~20% 的燃料送入主燃區上部的再燃區，在α<1的條件下形成還原性氣氛，使得在主燃區中生成的NOx在再燃區中被還原成氮分子，同時抑制新的NOx的生成，使NOx的排放濃度進一步降低。借助在再燃區上方佈置的“火上空氣”噴口形成的燃盡區，使在再燃區的未完全燃燒產物得以燃盡。圖十六為燃料分級燃燒降低NOx排放示意圖。

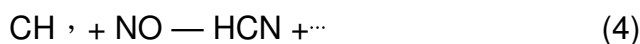
其中過剩空氣係數α，係指實際送入爐內的空氣量與理論空氣量之比。過剩空氣係數太大會增加燃氣容積使燃氣熱量損失增加，太小則不保證能完全燃燒。其值與燃料種類、燃燒方式及燃燒設備有關。

2、燃料分級燃燒降低 NOx 的化學反應原理

再燃燃料在還原性氣氛下對主燃區煤粉燃燒生成的氮氧化物的還原反應中，再燃燃料中產生的中間產物氰基、氨基和烴根等起到分解氮氧化物的作用。同一再燃燃料中烴類物質在富燃料和貧燃料氣氛中所起作用截然不同。實際應用中應使再燃區內各處處於還原性氣氛下，儘量使烴根CHi與NO相接觸，避免O與CHi接觸，以保證燃料分級燃燒降低NOx排放的效果。



在富燃料情況下有以下反應：

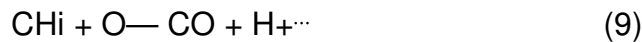


然後HCN通過如下的反應還原為N₂：





在貧燃料情況下，煙根通過下式氧化為CO：



3、再燃燃料的選取

根據再燃的原理，再燃區的還原性氣氛中最利於NO_x還原的成分是煙（CHI），因此，選擇二次燃料時應採用能在燃燒時產生大量煙根而又不含氮類的物質。丙烷和其它燃料相比，能最有效地降低NO_x，這是因為丙烷能產生大量煙根而沒有額外的氮。而在所有燃料中，氫氣降低NO_x的效果最差，因為它本身不能產生煙根，天然氣是最有效的二次燃料。氣態煙燃料還原NO_x的能力隨著煙分子中碳原子數目的增加而增加，因此，氣態煙是最好的二次燃料。

再燃燃料作為二次燃料，一般是在還原性氣氛中燃燒，對於鍋爐爐膛來說，一般都是在爐膛的燃燒區的上部，因此，再燃燃料必須易著火，易燃盡。

影響燃料分級降低NO_x排放的因素尚有過剩空氣係數以及再燃區溫度、再燃區停留時間等，這些都須經過實驗測試而定。

肆、心得與建議

一、即使目前已開發出可調式的孔口板或利用類神經網路控制可調式孔口板，粉煤機性能最佳化並不能單靠燃煤管上安裝一些偵測 sensor 可以達成。要達成正確及持久的粉煤機性能最佳化及粉煤管平衡，仍需有適當的方法來調整及改善飼煤機、粉煤機、一次風、粉煤管及燃燒器，13 個基本要件便提供了一個改善的方向。

二、粉煤管平衡雖可提高系統性能，但如果依廠商建議週期進行定期的調校與測試，而不借助廠商協助，以目前人力、物力並不易對所有機組進行全面性的最佳化作業，尤其像本廠這麼多的機組。因此在研習過程中曾與廠家討論此問題。鍋爐及粉煤廠家皆認為粉煤機至燃燒器之差壓如果在±10%以內時，表示粉煤管間的阻抗差異不大，即不需再做粉煤管平衡，且差壓的調整可藉粉煤機出口的煤閥開度來調整，節省改善費用。

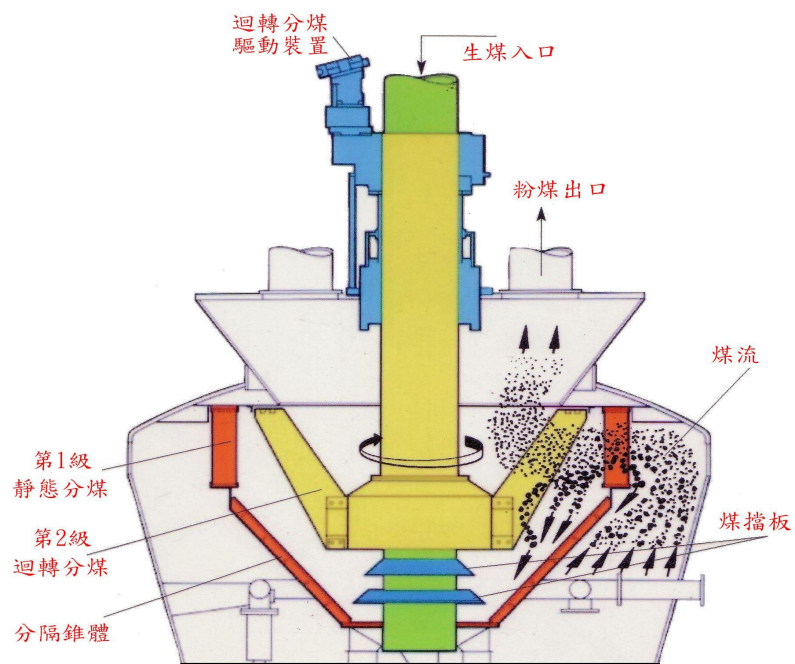
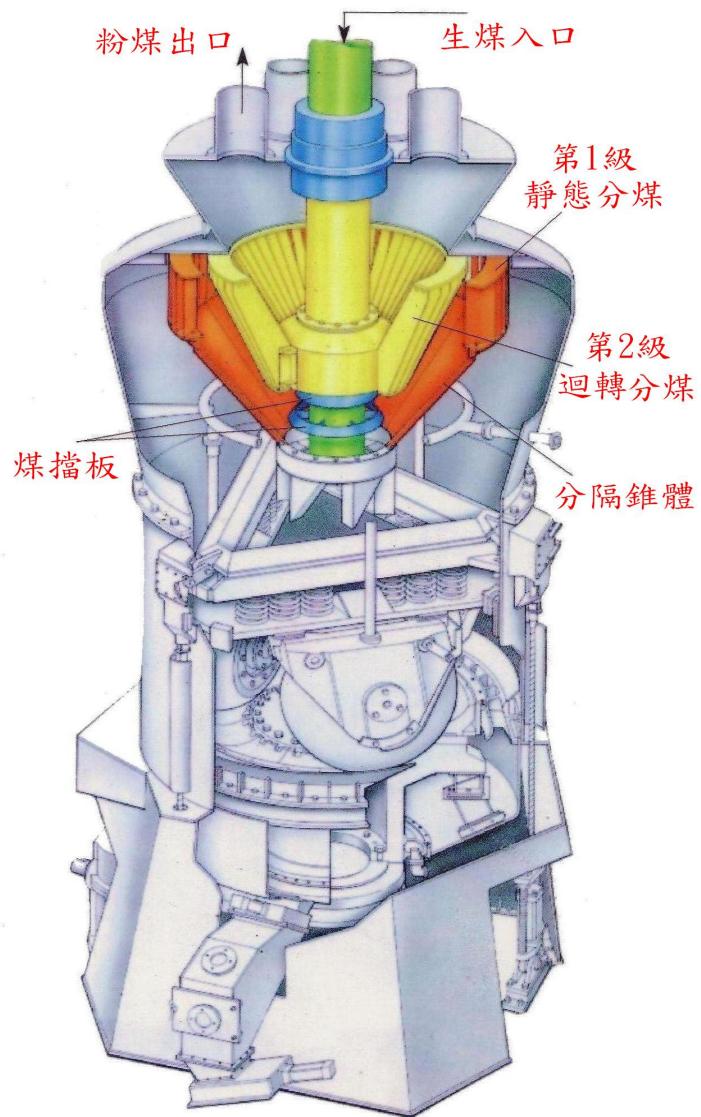
以所參訪的 Tilbury 電廠來說，其鍋爐在設計時，粉煤機到每一只燃燒器的管路長度一致，使管路阻抗儘可能一致，不需再進行繁複的平衡工作。

在研習過程中曾詢問中九、十機在完成試運轉前是否進行粉煤管平衡的作業，根據鍋爐廠家說明，中九、十機各粉煤機至燃燒器之差壓“很幸運”皆在±10%以內，因此無粉煤管路平衡的問題。

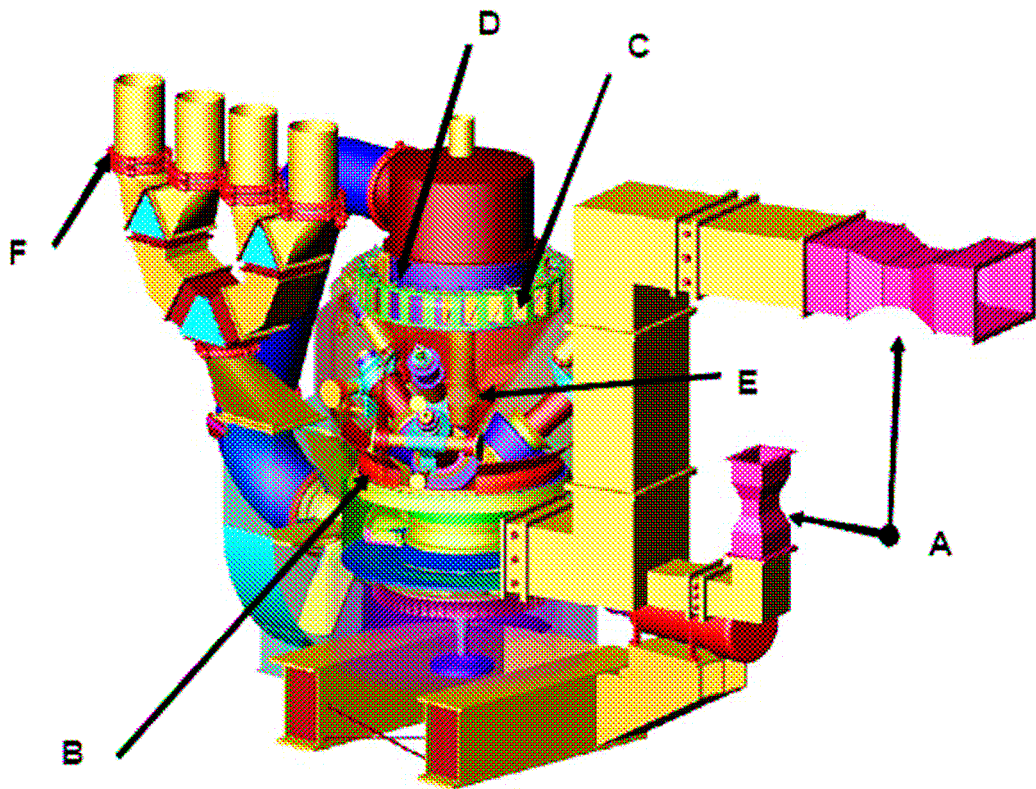
三、Raticliffe-on-soar 電廠在進行粉煤機改善時，最下排粉煤機並未採用動態分煤器，原因為其認為底排燃燒時間較長，粉煤不要求太細，且可節省改善成本。但仍須視鍋爐結構及粉煤機容量等實際情形而論。以目前本廠一至四機而言，因鍋爐金屬溫度過高及受粉煤機容量和分煤器性能限制，底排使用揮發物較少、含炭量高的澳

洲煤，並要求分煤器提高轉速到 100rpm，得到較佳的粉煤細度，使其在短時間內可以完全燃燒。而中、上排燃燒器則用揮發份較高，燃燒速度較快的印尼煤，其粉煤細度不必要求太高，減少粉煤機大量排渣的機會。

- 四、在燃煤過程中，影響燃燒器火焰不平均的是煤流的平衡問題。適當的煤粉應該被均一分散到每一支煤管才能夠得到完美的燃燒狀況。不平衡的煤流會導致燃燒器阻塞和修改過的低氮氧化物燃燒器得不到應有的效果，使用具有低空氣燃料比的燃燒器，一般將形成低 Nox，但會有較高的未燃碳損失；使用高空氣燃料比的燃燒器會形成高 NOx 和低未燃碳損失，只有平衡煤流才可得到低氮氧化物形成及降低未燃碳損失。
- 五、燃料分級燃燒為降低燃煤鍋爐 NOx 排放的最為有效的爐內措施，在國外已有成功地應用於電廠鍋爐上的案例，據個人了解尚未在台電的燃煤鍋爐中使用，未來運用的可能性則尚待討論。
- 六、英國 Ratcliffe-on-soar 電廠由 E-ON UK 營運，E-ON UK 為一跨國公司，維護辦公室內的鍋爐運轉資訊界面使用相當便利，類似本廠使用之 PI 系統，但較廠內 PI 系統實用及便利，建議系統建置時，由專業廠商設計，提高使用性能。
- 七、本次在參觀電廠時發現，英國的燃煤電廠在環境整理上，並不如預期的清潔。也許是與英國人生活習性有關。不過在工安防護上卻相當的重視，在參觀電廠時都要求穿工作服、鞋、帽，甚至要求穿戴反光背心，值得我們學習。



圖十七 粉煤機及動態分煤器構造



- A. 以風道截面製成文氏管狀，可以改善一次空氣冷熱風量測精確度

- B. 喉塊及擋板的改善可以減少排渣情形，並使初級分煤最佳化及降低粉煤機阻塞

- C. 以高速的分煤器葉片改善粉煤的短路循環及空氣/燃料分布

- D. 修改分煤器出口液壓系統以改善粉煤的均勻分配及排除50 mesh顆粒排除

- E. 倒錐型筒用來避免粗煤粒在粉煤機中短路循環

- F. 利用孔口板來達到clean air 系統阻抗的最佳化

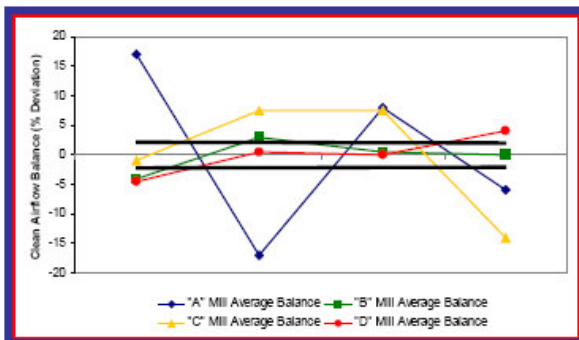
圖十八 可以進行粉煤機改善的位置

mill:

Pre - Phase I

Pre - Phase I

	"A" Mill Average Balance	"B" Mill Average Balance	"C" Mill Average Balance	"D" Mill Average Balance
Pipe 1	17.0	-4.0	-1.0	-4.5
Pipe 2	-17.0	3.0	7.5	0.5
Pipe 3	8.0	0.5	7.5	0
Pipe 4	-6.0	0	-14.0	4.0

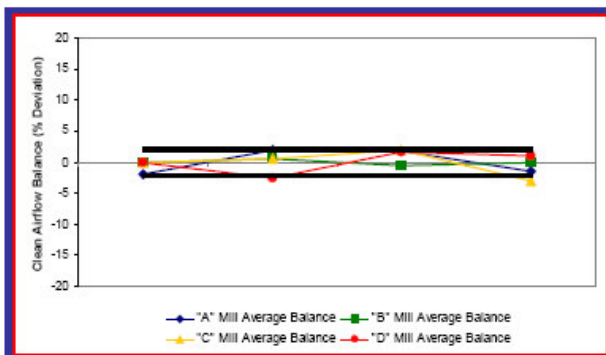


**Before
Mechanical
Tuning**

Post - Phase I

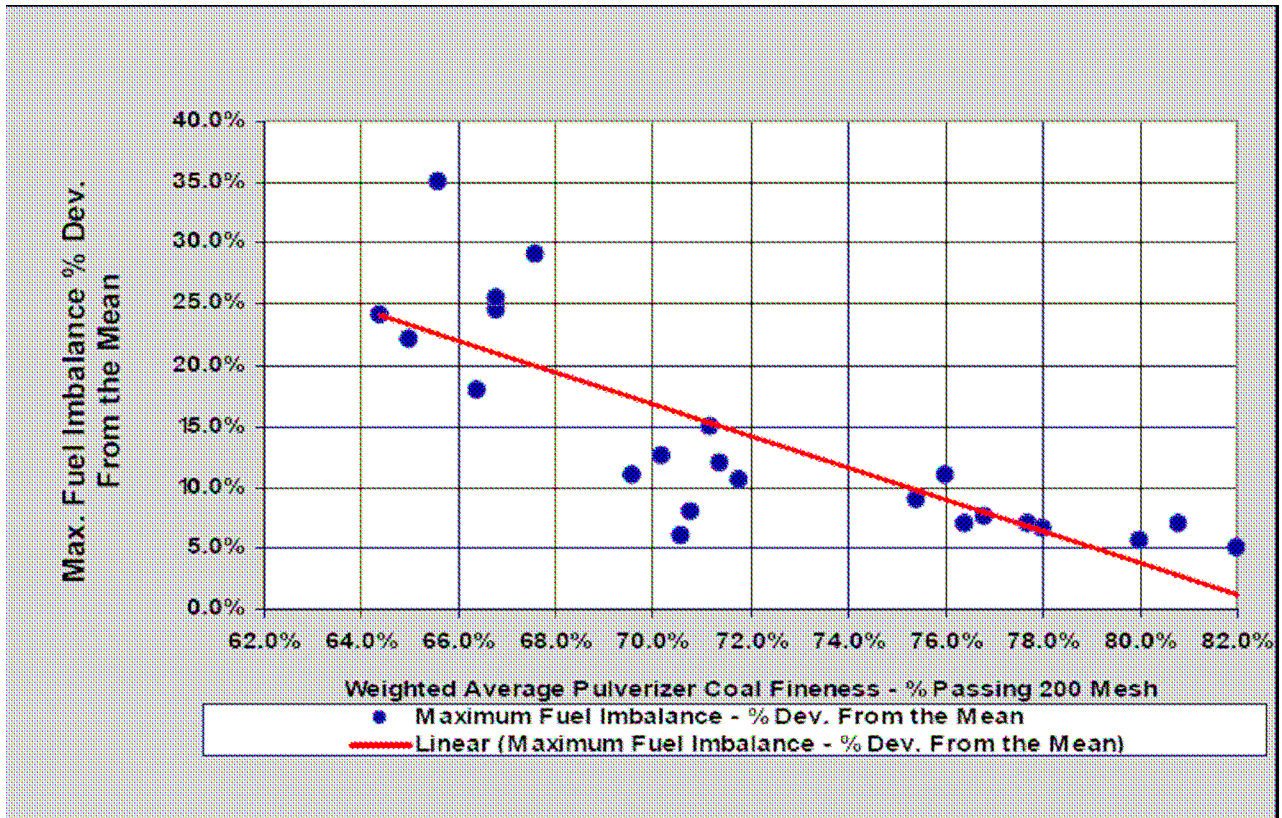
Post - Phase I

	"A" Mill Average Balance	"B" Mill Average Balance	"C" Mill Average Balance	"D" Mill Average Balance
Pipe 1	-2.0	0	0	0
Pipe 2	2.0	0.5	0.5	-2.5
Pipe 3	1.8	-0.5	2.0	1.7
Pipe 4	-1.5	0	-3.0	1.0



**After
Mechanical
Tuning**

圖十九 燃燒最佳化的改善實例
(CLEAN-AIR FLOW BALANCE)



圖二十 典型的粉煤細度與粉煤管平衡的關係