

## 燃燒系統控制氮氧化物技術

薛少俊\*

### 一、前　　言

在燃燒過程中氮氧化物來自熱式(thermal)氮氧化物和燃料式(fuel)氮氧化物，前者是空氣中氮氧受熱而形成，後者則由燃料中氮氣燃燒得來。鍋爐中降低過剩空氣為遞減氮氧化物排放量的一種技術，其針對熱氮氧化物；另一技術是燃燒過程，燃燒初期提供高溫階段富燃料(fuel-rich)燃燒區生成分子氮氧化物，緊接添加空氣高溫反應促進燃料完全燃燒。二次燃燒空氣加入的地方，大部份燃料邊界氮還原為氮氣，火焰溫度低則遞減熱氮氧化物生成量。首先，針對氮氧化物的改善燃燒條件和控制觀念為：

#### 1. 遞減一次火焰區氧氣基準

- (1)降低總氧量基準。
- (2)燃料與空氣混合的控制。
- (3)富燃料一次火焰區的作用。

#### 2. 遞減高溫曝露時間

- (1)降低顛峰溫度
- (2)藉稀釋降低絕熱火焰溫度
- (3)降低燃燒強度
- (4)增長火焰冷卻
- (5)燃料與空氣混合的控制或富燃料一次火焰區的使用
- (6)減少一次火焰區的滯留時間

其次，就燃燒系統改善技術可區分為三大類：

#### 1. 變更運轉條件

- (1)低過剩空氣燃燒
- (2)改變燃燒室中燃料和空氣接觸
- (3)降低燃燒室中熱負載
- (4)降低空氣預熱溫度

#### 2. 改善燃燒器設計

---

\*益鼎工程公司資深工程師

### 3. 改善燃燒系統設計

- (1)降低燃燒室中的熱量 (增大爐膛容積)
- (2)階段燃燒
- (3)煙道氣再循環
- (4)水或蒸氣注入

對牆式(wall type)濕底與旋風式(cyclone type)鍋爐高溫燃燒具有高氮氧化物排放率，切線式(tangential type)鍋爐的低氮氧化物排放率則因較長火焰和冷卻器燃燒溫度，這些鍋爐特性與氮氧化物基準的廣泛變數，降低氮氧化物排放量的燃燒改善技術應用是為鍋爐的特點，本文即探討於此。

## 二、低氮氧化物燃燒法

低氮氧化物燃燒法定義為延遲或改善鍋爐中燃燒過程的技術，意謂著降低氮氧化物排放量。燃料燃燒時氮氧化物的產生量依鍋爐設計、大小、和燃料組成等運轉參數而定，藉改善火焰幾何性與空氣／燃料混合速率、控制大氣與燃料氮的氧化情況即可遞減。

### 2.1 低過剩空氣法

1950年末期英國證實低過剩空氣法(Low Excess Air, LEA)為改善鍋爐燃燒狀況的有效方式（非完全適合天然氣燃燒鍋爐），其具有下列特點：

- (1)降低燃燒區氧氣濃度至完全燃燒的最低需求量。
- (2)遞減熱和燃料氮氧化物的生成。
- (3)提昇燃燒效率。
- (4)解決低溫腐蝕、空氣預熱器阻塞與加熱管表面污染等問題（加煤機式(Stoker)燃燒鍋爐大量降低過剩空氣則不適合）。

實際運轉上應用LEA，在不同負載要調整空氣的流量和維持完全燃燒的狀態，避免過剩空氣基準低於空氣需求計量(stoichiometric)而導致快速增加一氧化碳、碳氫化合物和碳黑的排放，則必須有固定煙道氣氧分子或一氧化碳含量的偵測儀器來控制。目前採用二氧化鋯感測器的氧氣分析儀，其精密度高，同時高溫下能連續偵測，已普遍使用於鍋爐煙道（粉煤燃燒鍋爐測試值大於實際值，需注意安全餘裕），此外燃油鍋爐風扇、閘門與檔板亦要配合設計以達到最佳效果。

### 2.2 低氮氧化物燃燒器

低氮氧化物燃燒器(Low NO<sub>x</sub> Burners,LNB)的設計主要藉空氣和燃料混合遞減氮氧化物，此種方式能有數項變化的燃燒機構。第一方面燃燒初期使用空氣次計量，造成燃料氮形成較氮氧化物多的分子氮。第二方面控制二次空氣添加與混合後，局部區域過剩空氣促進氮氧化物形成性遞減。第三方面增長燃燒時間和允許冷卻器火焰引發更多的熱傳送，降低熱氮氧化物量。

對低氮氧化物燃燒器的改善應用，與傳統燃燒器比較，其有更大的燃燒區容積和更長的火焰而必須準確控制燃料／空氣混合，考慮因素說明如下：

1. 火焰衝射 (impingement)：火焰衝射解決方法包括調整燃燒器傾斜度、燃料／一次空氣對二次空速度比、部份過熱器管子位置與燃燒器管排偏燃操作，小型鍋爐可在完全負載時減速來防止。
2. 燃料特性、爐膛出口溫度和風機容量：其一，富燃料運轉狀況下會增進煤渣趨勢；其二，長形火焰增高爐膛出口與過熱／再熱管子溫度；其三，完全負載時壓力降或過剩空氣基準較高而需有大風機容量。
3. 改善風箱設備：涵蓋增添風門和檔板、再製風管、更換或擴大風箱本體適應低氮氧化物燃燒器的改善。

### 2.3 火上空氣法

除了低氮氧化物燃燒器局部燃燒分段方法外，另有火上空氣 (overfire air, OFA) 通口將總爐膛燃燒分段的方式，如圖 1 所示。約 15~20% 需求燃燒空氣由某些燃燒器傳來送至火上空氣通口頂端管排燃燒器，其運轉在富燃料條件下降低熱和燃料氮氧化物生成，未燃燒的燃料逃脫到上層爐膛與轉向燃燒空氣一起燃燒。OFA 與 LNB 的氮氧化物排放遞減率比較，其適合切線式燃燒鍋爐；而改善考慮因素除了火焰衝射外，和 LNB 類似。

有關燃燒改善應用火上空氣法，注意事項如下：

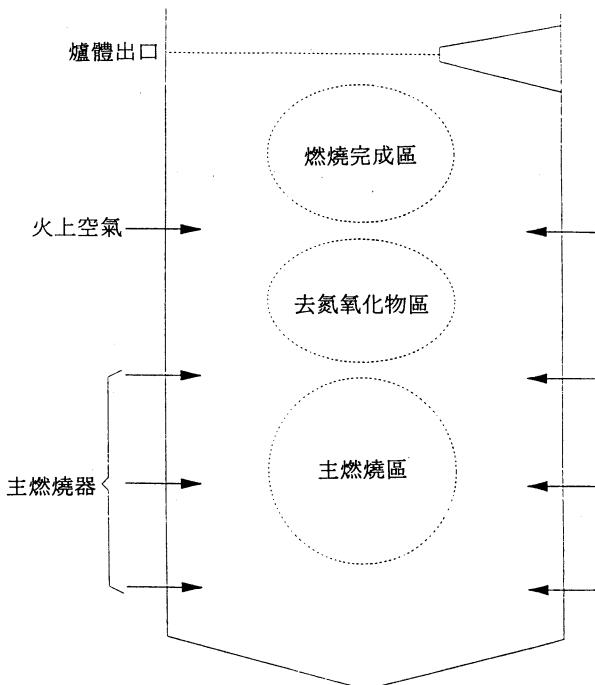
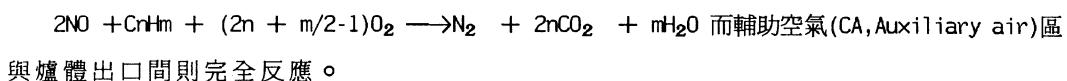


圖 1 火上空氣氣流分佈

1. 需增添風管和爐膛穿越器 (penetrations)，以及額外的風機容量。
2. 頂層燃燒器管、火上空氣通口、爐膛出口間需有適當的距離，維持良好碳元素燒盡與最大氮氧化物還原量的性能。
3. 需有足夠的空間擴展風箱或風管供給火上空氣通口。
4. 在低氮氧化燃燒器的使用狀況下，首先必須注意增高的爐膛出口溫度和火焰震動率，可由火上空氣通口間燃燒空氣分佈與燃燒器的記錄器加以控制解決；其次火上空氣和燃燒空氣的混合須有良好注入速度，相關火上空氣風管的添加壓力降要裝配分離式火上空氣風機。

目前較特殊的技術為 Mitsubishi 公司的 MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) 法，其包含氮氧化物還原和燃耗 (burn-up) 兩個連鎖反應 (見圖 2)。在主燃燒器與火上空氣區上端，添注燃料開始氮氧化物還原反應：



## 2.4 低氮氧化物同心燃燒系統

低氮氧化物同心燃燒系統 (Low NO<sub>x</sub> Concentric, Firing System, LINCFS) 類似火上空氣法 (見圖 3)，目前只應用於燃煤切線式鍋爐，同時考慮成改善輔助空氣系統風箱組件和燃燒器系統燃煤隔室改用大的發散型燃煤管嘴，使其成為高等火上空氣法 (Advanced overfire Air, AOFA)。傳統切線式燃燒鍋爐構成二次氣流，大致在爐膛中心以同心圓 (或火球) 方式直接沿著主燃料／空氣流切線或角度，而 LINCFS 的二次氣流則偏離主燃料／空氣流趨向水壁。由圖 4 可知，富燃料 (fuel-rich) 區兩個同心圓於內圈形成，貧燃料 (fuel-lean) 區在外圈形成，燃料直接傾於爐膛中心造成低氧分子濃度，本體氧分子維持接近水壁，短暫延續燃燒產生氮分子替代氮氧化物，緊接本體質量傳送促進燃料和富空氣區混合，平衡燃燒空氣注入燃燒器上的火上空氣通口來完成燃燒。

## 2.5 煙道氣再循環法

煙道氣再循環法 (Flue Gas Recirculation, FGR) 對於氮氧化物的控制包括自節熱器出口萃出部份煙道氣以及送回鍋爐，允許煙道氣通過燃燒器風箱，其能視為火焰驟冷器 (quencher)，藉熱稀釋降低燃燒溫度、過剩空氣需求和煙道氣熱損失，並且提供燃燒階段的方法，如圖 5 所示。對於燃油與天然氣燃燒鍋爐特別有效，但燃煤鍋爐效果並不顯著。

### 1. 燃煤鍋爐

燃煤鍋爐應用 FGR 法控制氮氧化物的效率不太明顯，主要是只影響熱氮氧化物，而燃料氮氧化物則否。就經濟效益而言，新設 FGR 系統的成本比 FGR 系統本身改善價廉，前者根據鍋爐與對流表面的質量流率和爐溫即可訂定大小，後者則需改善風扇、風管、閘門與控制設施彌補排風損失，並且要預防高溫灰粒磨耗和震動的問題。

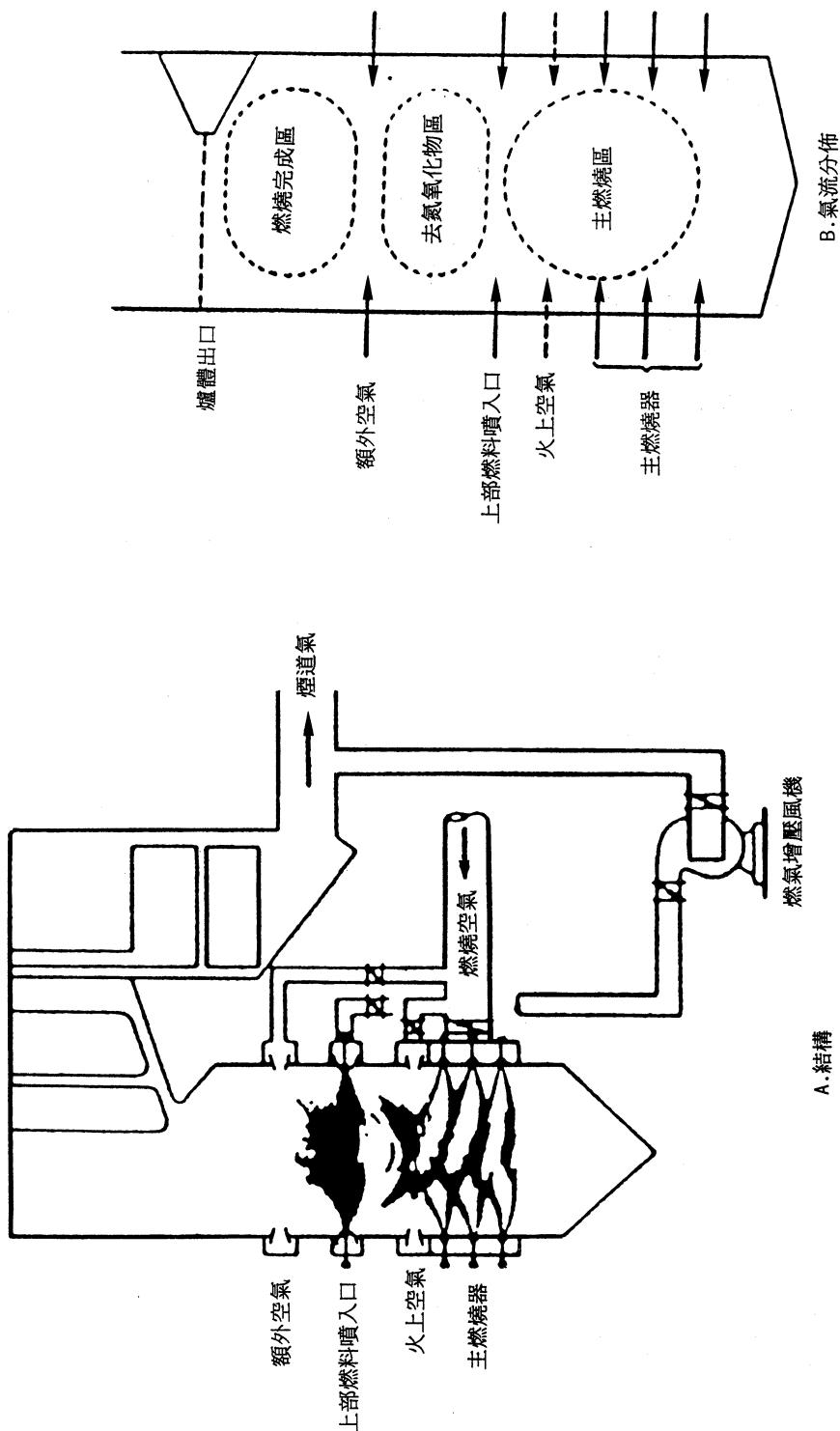


圖 2 MACT法

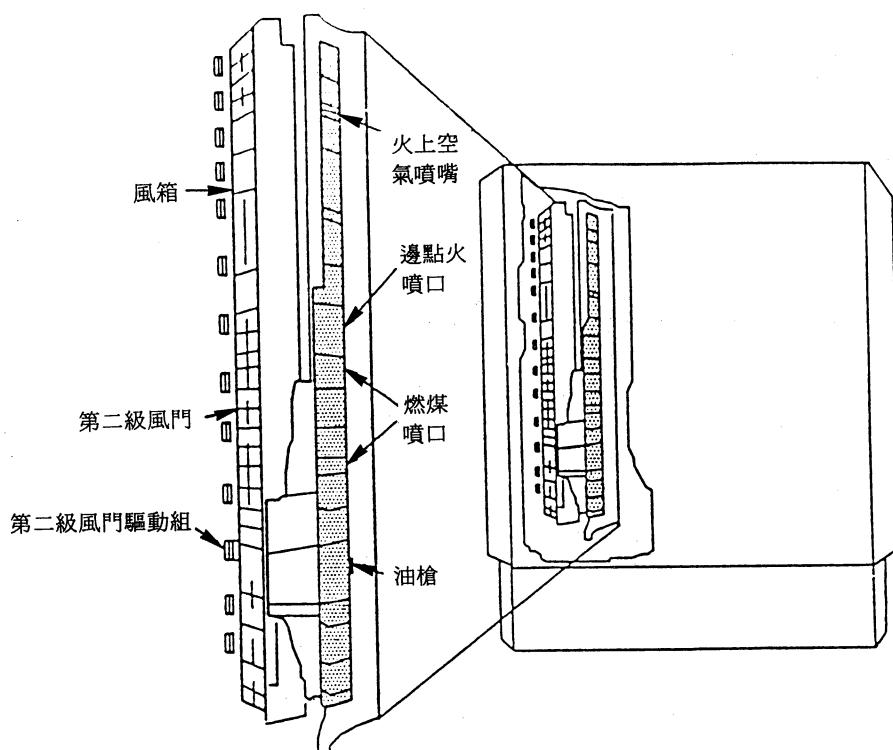


圖 3 LNCFS 結構

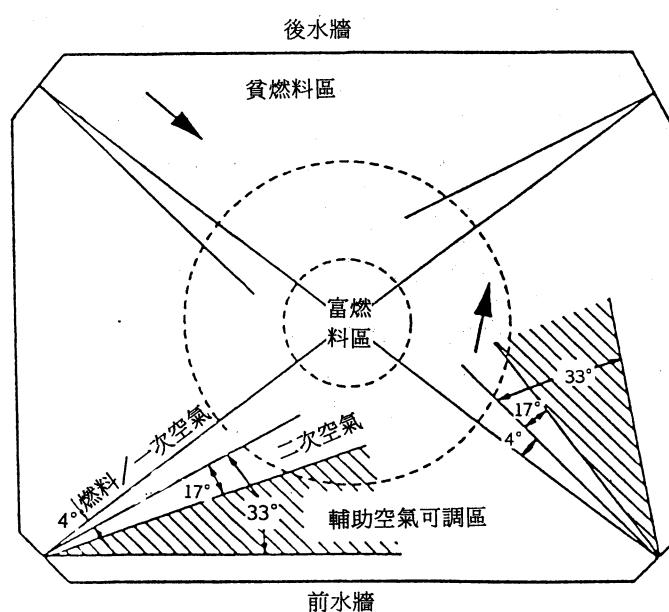


圖 4 LNCFS 氣流分佈

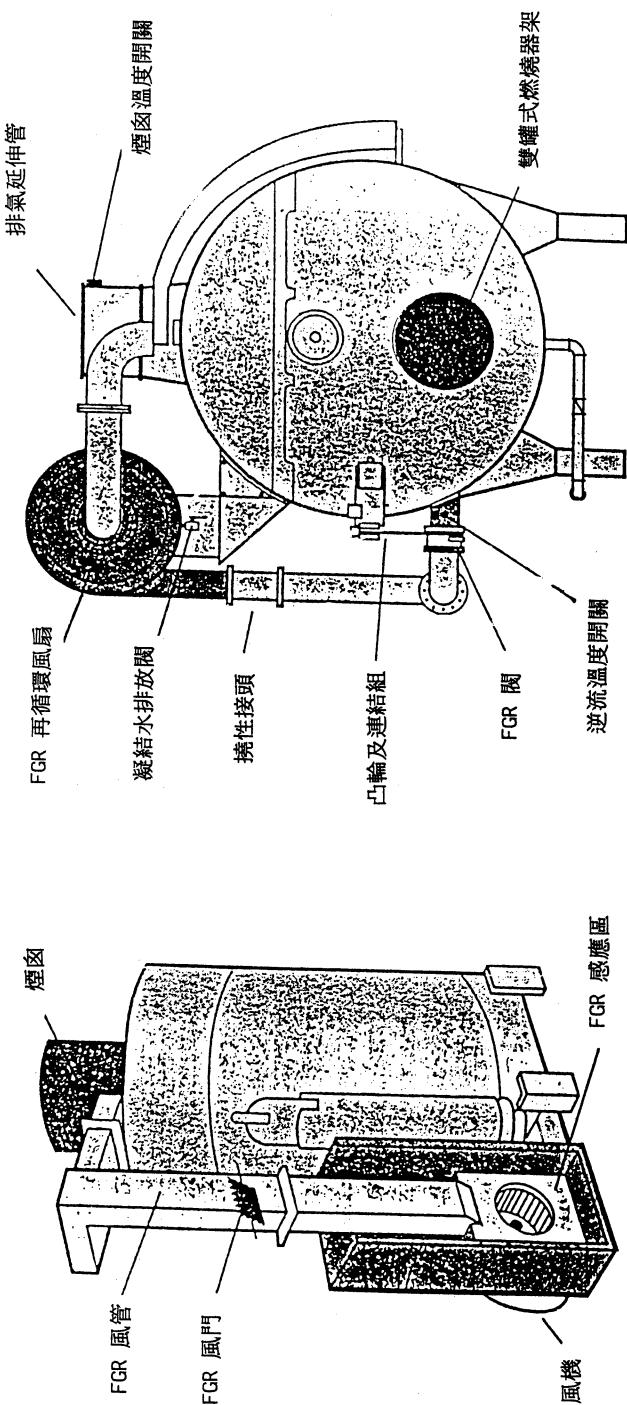


圖 5 FGR 法結構

## 2. 燃油鍋爐

燃油鍋爐採取FGR法，其設施大致包括FGR風機組合與煙函到風箱的相關連接風管，如圖6、7所示。就遞減氮氧化物排出濃度的優劣點比較，分成下列三方面：

- (1) 爐管：在相同油料情況，水管式優於火管式。
- (2) 燃料油燃燒霧化(atomization)：在相同燃料油情況，蒸氣霧化優於空氣霧化。
- (3) 油類：燃燒輕質餾出油(distillate oil)較為有效。

值得注意的是改善應用時，一旦FGR速率高到30%以上可能引起嚴重火焰非穩定性、火焰脈動(pulsation)、設備震動和爆裂，這些問題能藉擴延燃燒器與風箱改善加以緩和。

## 3. 天然氣燃燒鍋爐

一般高負載天然氣燃燒鍋爐在耐火喉(refractory throat)內埋置氣式環形燃燒器(見圖8)，其FGR速率能高達55%，而且不會有火焰不穩定情況，對於低負載鍋爐則否，但可使用槍形燃燒器取而代之。

# 三、天然氣再燃燒法

天然氣再燃燒法(Natural Gas Reburing System, NGR)，的功能，包括還原部份一次燃料給主燃燒區，以及主燃燒器上端注入天然氣形成還原區，促使氮氧化物轉化還原為氮化合物。此法已應用到60MWe切線式燃燒鍋爐(美國)、33MWe旋風式鍋爐(美國)、110T/H D型鍋爐(亞洲)、38MW多種固體混合廢棄物焚化爐(歐洲)，其實體結構(見圖9)，整個過程分為三個區域

1. 主燃燒區：約80~85%鍋爐一次燃料在此區域燃燒，燃燒器以鍋爐空氣-燃料計量比操作，鍋爐不需改善此區域。
2. 再燃燒區：約15~20%天然氣基於熱輸入基礎(basis)，其注入主燃燒區的下游促成富燃料再燃燒區。在主燃燒區產生的氮氧化物與再燃燒燃料部份氧化的碳氫化合物基(radicals)反應形成氮分子，氮氧化物還原率依再燃燒區總空氣-燃料比、溫度、滯留時間和氮氧化物的濃度而定。
3. 完全燃燒區：增加的空氣添入冷卻器，上層爐膛促成貧燃料(fuel-lean)狀況，確認再燃燒燃料完全氧化，一些還原的氮分子尺寸大於氮氧分子。

目前天然氣屬於最佳的再燃燒燃料，主要是

- (1)不含任何燃料氮，促進較高氮氧化物還原率，優於燃料油或煤炭燃料。
- (2)不含硫或無機物，二氧化硫和灰粒排放量則可遞減。
- (3)氫對碳之比率高於燃料油或煤炭燃料，二氧化碳排放量亦能降低。
- (4)適合燃燒後處理系統，諸如選擇非觸媒還原程序(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)，見圖10，配合美國能源與環境研究計劃(Energy and Environmental Research, EER)可達到氮氧化物排放量80%以上還原率，即俗稱高等再燃燒法。

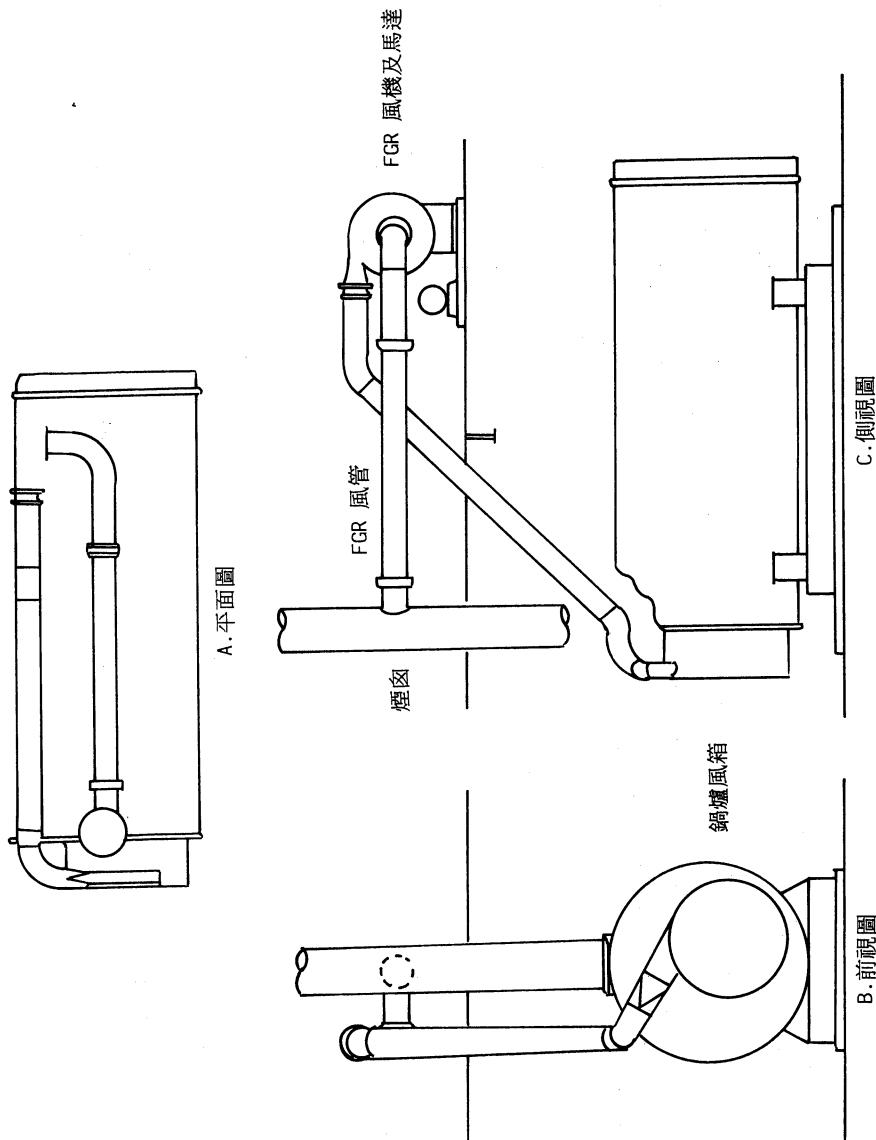


圖 6 FGR 火管式燃油鍋爐結構

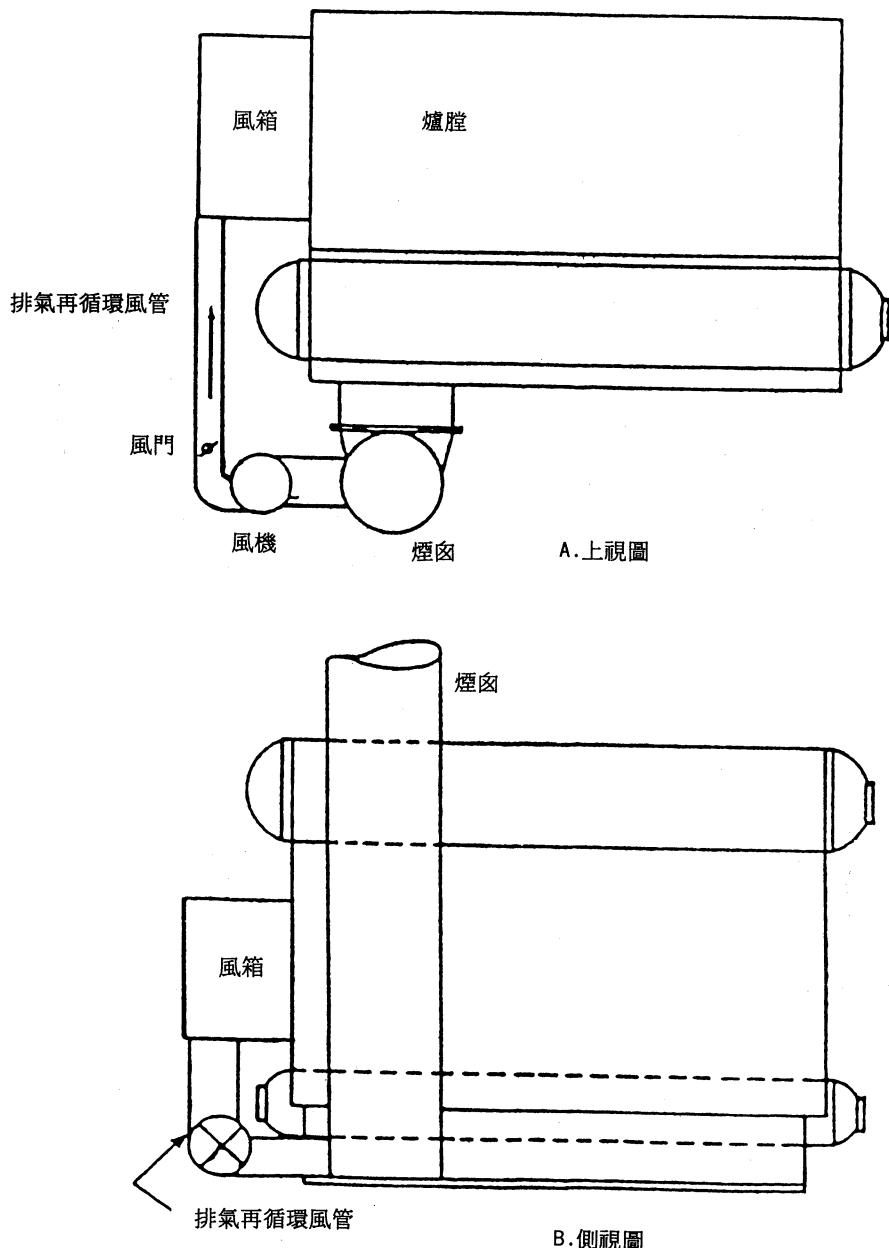
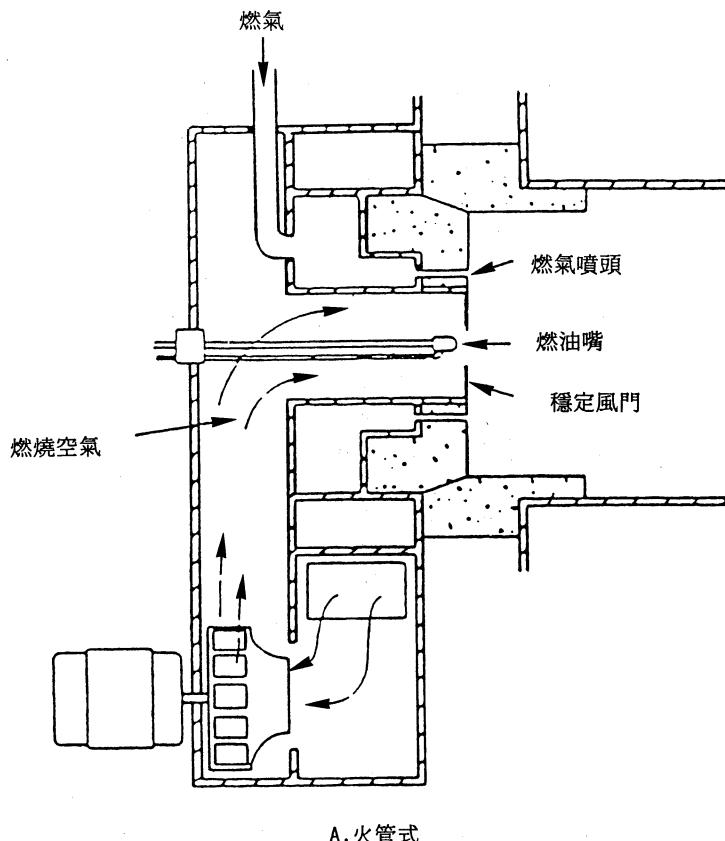
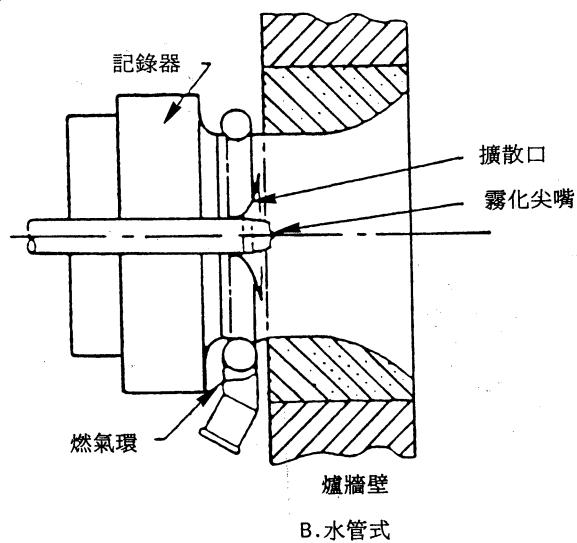


圖 7 FGR 水管式燃油鍋爐結構



A.火管式



B.水管式

圖 8 FGR 天然氣燃燒鍋爐結構

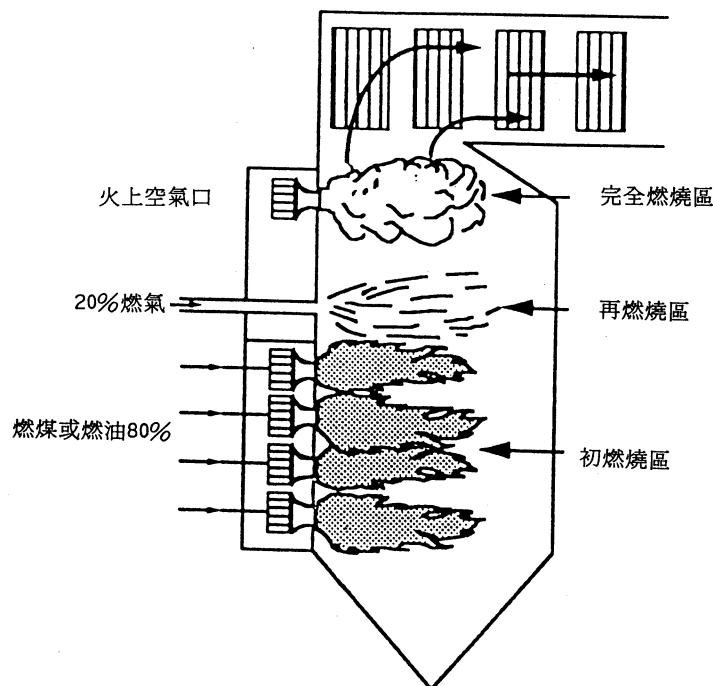


圖9 NGR 法結構

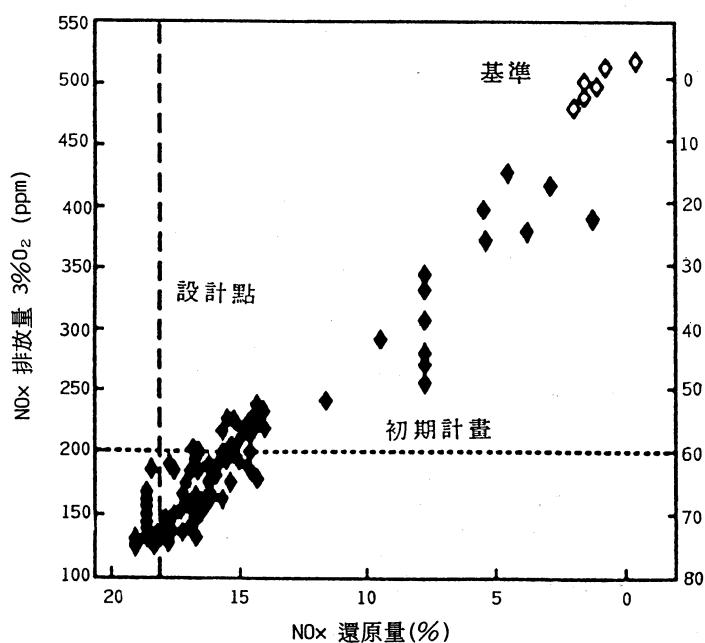


圖10 NOx 排放量與天然氣再循環量的關係

在改善應用方面，為了添加燃料和空氣基準，頂端燃燒器管排與爐膛出口之間必須有足夠的空間（和滯留時間）以茲利用，否則完全負載時氮氧化物還原性損失及／或鍋爐減速都無法解決。

## 四、結論

### 1. 使用低氮氧化物燃燒法，其燃料和鍋爐型式的選擇準則

- (1) 低過剩空氣法與低氮氧化物燃燒器適用所有燃燒型式與燃料。
- (2) 火上空氣法和低氮氧化物同心燃燒系統限用在切線式燃燒鍋爐。
- (3) 低氮氧化物燃燒器與火上空氣法併用適合於所有燃燒型式，但切線式燃燒鍋爐除外。

如表 1 所示。

### 2. 天然氣再燃燒法之主燃燒區可在正常空氣／燃料比下運轉，廣泛應用在對牆式、和旋風式燃燒鍋爐，卻需注意適切空間與滯留時間。

## 五、參考文獻

1. 薛少俊，廢熱鍋爐的規範設計，機械工程136期，P.48，民國73年6月。
2. Nozawa, S., Morita, I., Mizoguchi, T., Latest SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> removal technologies to answer the various needs of industry, Hitachi Review 42(1), p.43~48, 1993.
3. Kokkinos, A., Cichanowicz, J.E., Eskinazi, D., Stallings, J., Offen, G., NO<sub>x</sub> controls for Utility Boilers Highlights of the EPRI July 1992 Workshop, Journal of Air & Waste Management Association 42(11), p.1498~1505, Nov, 1992.
4. Kiatzel, J., Control Boiler Emissions, Plant Engineering p.47~51, Oct, 12, 1992.
5. Proceedings: 1991 Joint Symposium on Stationary Combustion NO<sub>x</sub> Control, EPRI GS-7447, Nov., 1991.
6. Kokkinos, A., Chchanowicz, J. E., Hall, R.E., Sedman, C.B., Stationary Combustion NO<sub>x</sub> Control: A summary of the 1991 symposium, Journal of Air & Waste Management Association 41(9), p.1252~1259, Sept., 1991.
7. Makansi, J., Clean Air Amendments: The engineerinf response NO<sub>x</sub> Control, Power p.44~48, June, 1991.
8. McInnes ,R., Van Wormer, M.B., Cleaning Up NO<sub>x</sub> Emissions, Chemical Engineering p.131~135, Sept., 1990.

表 1 基於燃料和鍋爐型式的低氮氧化物燃燒選擇準則

燃燒技術	燃料	鍋爐型式	鍋爐廠家	鍋爐型式
低過剩空氣 燃燒器	燃料油	對牆式和切線式		
	燃料油	水平／前面牆和背面牆		
	天然氣	除了切線式，所有型態在低於 100 million Btu/hr 下使用		
低NOx燃燒器 煤炭	燃料油	對牆式和切線式	• Foster Wheeler Energy Corporation	• Controlled-Flow/Split- Flame
	燃料油	水平／前面牆和背面牆	• Babcock & Wilcox (B & W)	• Three-nozzle Cell
	天然氣	除了切線式，所有型態在低於 100 million Btu/hr 下使用	• Babcock-Hitachi K.K. (BHK) • Mitsubishi	• HT-NR • Axial Swirl • PM(Pollution Matter)
火上空氣 低NOx同心燃燒 煤炭	煤炭	切線式	Mitsubishi	MACT (Mitsubishi Advanced)
	燃料油	切線式	ABB Combustion Engineering (ABB-CE)	• Separated Overfire Air • Offset Concentric Air Nozzle Tips
	天然氣	除了切線式，所有型態在低於 100 million Btu/hr 下使用	Mitsubishi	• New Coal Nozzle Tips
火上空氣 低NOx燃燒器 + 天然氣	燃料油	水平／前面牆和背面牆		PM + MACT + SCR (Selective Catalytic Reduction)
	天然氣	除了切線式，所有型態在低於 100 million Btu/hr 下使用		

[註] 鍋爐廠家與型式僅供參考

9. Makansi, J., Will Combined SO<sub>2</sub> /NOx processes find a niche in the market?, Power p.26~28, Sept., 1990.
- 10 Rhoads, T. W., Marks, J.R., Siebert, P.C., Overview of Industrial Source Control for Nitrogen Oxides, Environmental Progress 9(2), p.126~130, May, 1990.
- 11 Makansi, J., Clean Air Act Amendments: Acid-Rain Control Systems, Power p.20~24, Feb., 1990.
- 12 Redman, J., Fluidised bed combustion, SOx and NOx, The Chemical Engineer p.32~38, Dec., 1989.
- 13 Eskinazi, D., Cichanowicz, J.E. Linak, W.P., Hall, R.e., Stationary Combustion NOx Control: A Summary of the 1989 symposium, JAPCA 39(8), p.1131~1139, Aug., 1989.
- 14 Bentley, K.M., Jelinek, S.F., NOx control technology for boilers fired with natural gas or oil, Tappi p.123~130, April, 1989.
- 15 Redman, J., Control of NOx emission from large combustion plant, The Chemical Engineer p.33~40, March, 1989.
- 16 Katzberger, S.M., Sloat, D.G., Options are increasing for reducing emissions of SO<sub>2</sub> and NOx, Power p.30~33, Dec., 1988.
- 17 Makansi, J. Reducing NOx emissions, Power S.1-26, Sept., 1988.
- 18 Emission control, Power B.81~B.90, June, 1988.
- 19 Makansi, J., Traditional control processes handle new pollutants, Power p.11~18, Oct., 1987.
- 20 Offen, G.R., Eskinazi, D., McElroy M.W., Maulbetsch, J.S., 1987 Joint EPRI /EPA Symposium on Stationary Combustion NOx Control, JAPCA 37(7) p.864~870, July, 1987.
- 21 Preston, G.T., Miller, M.J., Environmental control technology advances for coal-fired power plants, Pollution Engineering, p.25~29, April, 1982.
- 22 Siddiqi, A.A., Tenini, J.W., NOx controls in review, Hydrocarbon Processing, p.115~124, Oct., 1981.
- 23 Aichner, R.A., Windbox modeling, burner Technology reduce vibration, Power Engineeing, p.30~32, Dec., 1992.
- 24 Elliott, T., Reduce NOx emissions on gas-fired boilers by optimizing combustion, Power p.80~81, March, 1992.
- 25 Barrett, P.R., A new generation of low NOx burners, Modern Power System p.77~81, May, 1991.

- 26Bos, H.G., Advanced NO<sub>x</sub> reduction burners, Modern Power System p.54~58, Dec, 1989.
- 27Allen, J.W., Beal, P.R., Twin register burner development for low NO<sub>x</sub>, Modern Power System p.34~49, Jan., 1989.
- 28Natcher, P.B., Forced draft, Low NO<sub>x</sub> burners applied to process fired heaters, Plant/Operation Progress 3(3), p.168~173, July, 1984.