

酸雨之防治

郭謙賢*

中文摘要

酸雨的防治，可從科技、經濟及法規三方面探討。以環境保護者的觀點而言，若能避免酸雨之前兆物(SO_2 及 NO_x)的排放自然最理想，否則亦應使用各種污染防治方法將污染物排放量降到最低的程度。然而在排放者而言，則希望污染防治的花費愈低愈好，以降低生產成本。但是排放者亦不希望因此而破壞了環境品質。這兩者之間的抉擇有賴於政府在法規上的制定，以及污染防治科技的發展，而達到適當的解決。

Abstract

Acid rain control strategies are discussed through science/technology, economics, and regulatory in this article. From the point of view of environmental protection, it is best if the precursors (SO_2 , NO_x , etc.) of acid rain can be eliminated before emission. Otherwise, the emission amount of these precursors should be reduced to the lowest level that our technology can reach. On the other hand, from the point of view of emission source parties, they wish that cost on pollution control can be cheaper as well as to reduce the production cost. In the mean while, they also wish their pollutants would not deteriorate the environmental quality. The trade off between economic cost and emission control are determined by regulators. Now a day, people tend to set up strict standards.

前言

早在一百多年前，史密斯 (Robert Angus Smith) 就發現英國的工業區及大城市 (如 Manchester) 的雨水不再是甘霖，而是「酸雨」。酸雨 (Acid Rain) 一詞便是他杜撰的。他在當時雖然大聲疾呼，言之諄諄，而且著書立說 (Air and Rain-The Beginning of Chemical Climatology, 1872)，但是當時人們被產業革命的利潤沖昏了頭。在經濟繁榮的興奮中，也就聽之者藐藐。

事隔百年後的最近廿年來，酸雨已經直接又明確的威脅到我們的生存空間，鑽進我們生

*臺灣電力公司電源開發處一般工程師

活的所有孔隙，污染的環境又多了一項嚴重的打擊，大家才回頭來正視酸雨問題。

由於空氣中含有 0.3% 的二氧化碳，所以正常情況下，大氣中的水份將和二氧化碳達成平衡，而產生 pH 值大約為 5.7 的雨水。空氣污染物如二氧化硫 (SO_2) 及氮氧化物 (NO_x) 等氣體在大氣中與氧氣及水蒸氣反應，部份形成硫酸鹽及硝酸鹽粒子，或形成硫酸與硝酸，遇雨或凝聚成雨水則會使得雨水之 pH 值降低，造成酸雨，若空氣中有臭氧 (O_3)，過氧化氫 (H_2O_2)，PAN (Peroxyacetyl Nitrate)，及氨 (NH_3) 等污染物存在，亦會影響到雨水的 pH 值。二氧化硫及氮氧化物的來源可分為天然及人為兩種因素，天然因素包括火山飛塵、森林火災、海水飛沫、有機物分解等等，人為因素則包括燃燒排放，工業過程排放，車輛排放等等。

煙氣在沉降前於大氣中飄散，途徑變化多端，因此污染物排放源、煙流途徑，及酸雨形成地區的關係十分複雜，大致與污染物排放之高度、濃度、數量、大氣之溫度、濕度、穩定度、風速、風向、雲層、日照、季節，以及降雨之數量、延時、間隔等等各種條件息息相關。酸雨降落到地表，會使土壤酸化，礦物質流失，森林損害，農作物減產，匯流到河川、湖泊，會使水質酸化，改變水中生態，此外亦會使金屬加速氧化，建築物變黑。因此如何防止酸雨的發生，已經是一個非常值得注意的問題。

防 治 策 略

酸雨的防治策略，可以由科技、經濟、法規等三方面著手。其中任一策略都有其利弊及有待克服之障礙，並且都須深入研究後才能決定其所能達到之境界。以下對各種現有之策略，以及將來可能使用之策略加以探討，其中大部份參考美國在這方面之成就與研究。

A、科技策略 (Scientific/Technical Strategies)。

形成酸雨的主要前兆物質 (precursor) 為二氧化硫及氮氧化物，因此最實際的酸雨防範方法就是減少二氧化硫及氮氧化物等空氣污染物的排放量。譬如，改善生產及燃燒之設備與方式或者硫份回收，都可以達到相當的績效，以下三種選擇是減少二氧化硫及氮氧化物排放量的基本方式：

- 節約能源 (Energy Conservation)

提高燃燒效率，改善燃燒設備或其他方法，以降低能源的總消耗量。

- 脫硫與脫氮 (Desulfurization and Denitrification)。

將硫和氮等成份從燃料中或廢氣煙道中去除，或者改用低硫份的燃料都可以減少二氧化硫及氮氧化物的排放量。

- 能源替換 (Energy Substitution)

以其他能源，如核能、水力、太陽能、生質能、風力、地熱、海水溫差、潮差等替換化石燃料，則可以不產生二氧化硫及氮氧化物等污染物。

若依照燃燒階段區分二氧化硫及氮氧化物的各種防治技術，大致如下所列：

- 燃燒前 (Precombustion)

有使用洗煤、煤氣化、液體燃料脫硫及脫氮等方法。

- 燃燒時 (Combustion)

有使用流動床燃燒、石灰石加料、分段式燃燒、廢氣循環等方法。

• 燃燒後 (Postcombustion)

有使用各種排煙脫硫及排煙脫硝等方法。

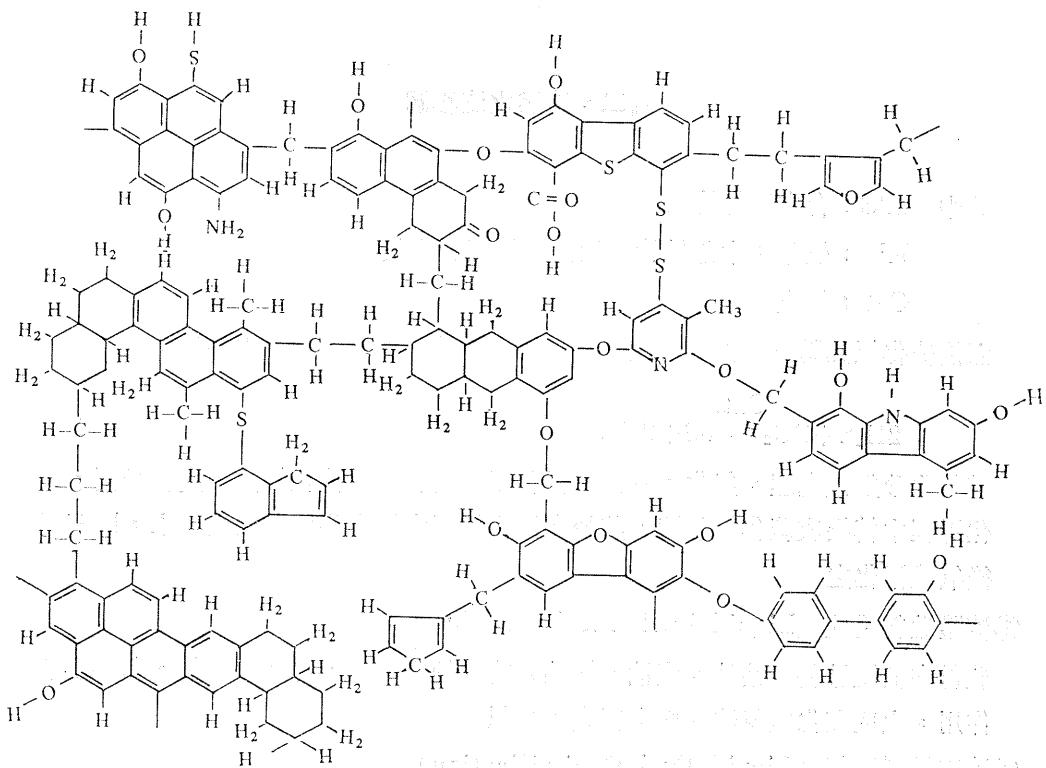
以下大略介紹前述各種污染防治技術的基本原理：

①洗煤 (Coal Cleaning)

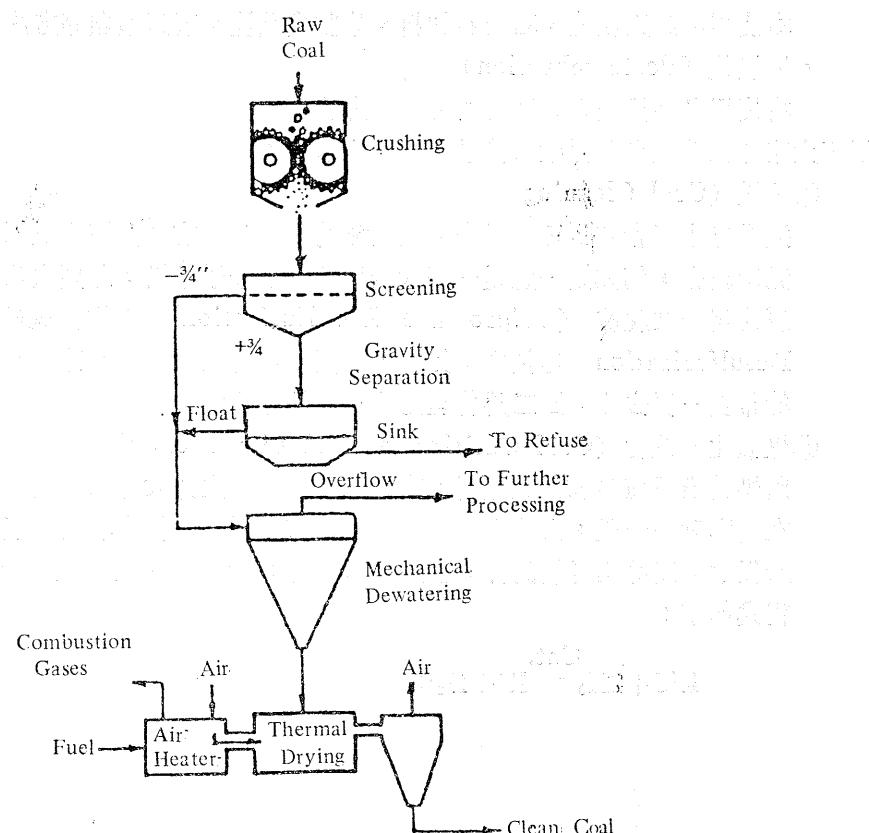
通常煤中所含硫份可分為有機質及礦物質兩種。有機質部份是以化學鍵之形態與其他元素結合，例如圖一就是一個代表性煙煤之分子結構，若要去除其中所含的硫份，可以使用微波脫硫 (Microwave Desulfurization) 及濕熱脫硫 (Hydrothermal Desulfurization) 等技術。另外礦物質部份可經由輾碎、沖洗、篩選等方式隨著煤中的雜質一併去除，圖二為物理方式洗煤的流程圖。

②煤氣化及液化 (Coal Gasification and Liquefaction)

將煤轉換為氣體或液體燃料，在減少二氧化硫之排放方面極具績效，這種技術目前仍在研究發展階段，大約在五年之內 (1990年以前) 就會有實際應用出現。在煤的液化過程中，硫份與氫氣混合，產生化學作用，生成硫化氫 (H_2S) 氣體，其化學反應方程式如下：



圖一、代表性煙煤 (Bituminous) 之分子結構



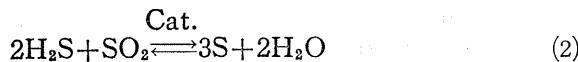
圖二、洗煤之流程圖

其中 R^1S ：含有硫份的煤。

R^2 : 煤分子中部份的硫元素被氫原子取代。

Cat : 觸媒。

而後硫化氫氣體再經處理形成硫元素及水，其化學反應方程式如下：



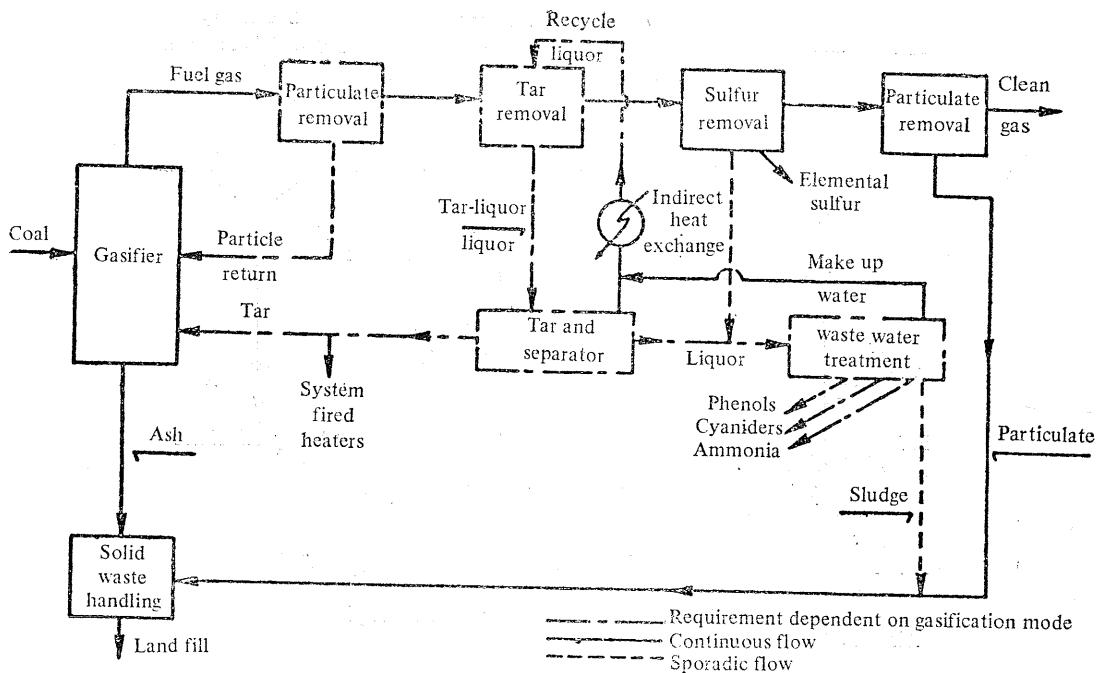
煤氣化分為預處理、氣化，及氣體淨化三個階段，與液化的除硫過程相同，硫份在氣化過程中轉換成硫化氫氣體，其後在淨化過程中氧化形成硫元素及水，圖三為煤氣化後氣體淨化之流程圖。

③液體燃料脫硫 (Liquid Fuel Desulfurization)

硫份在液體燃料（柴油、汽油、煤油）的精鍊過程中，可加入氫氣，藉觸媒產生催化作用，生成硫化氫氣體（與方程式(1)類似）。

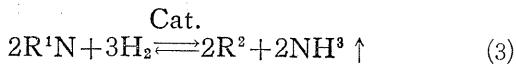
④液體燃料脫氮 (Liquid Fuel Denitrification)

將燃料混合氫氣加熱，藉觸媒將其中所含氮成份部份轉換成阿摩尼亞氣體 (NH_3)，



圖三、煤氣化後之流程圖

以產生較純淨之燃料，其反應方程式如下：



其中 R^1N ：含有氮元素的液體燃料

R^2 ：燃料中部份氮元素被氫取代。

⑤流動床燃燒 (Fluidized-Bed Combustion)

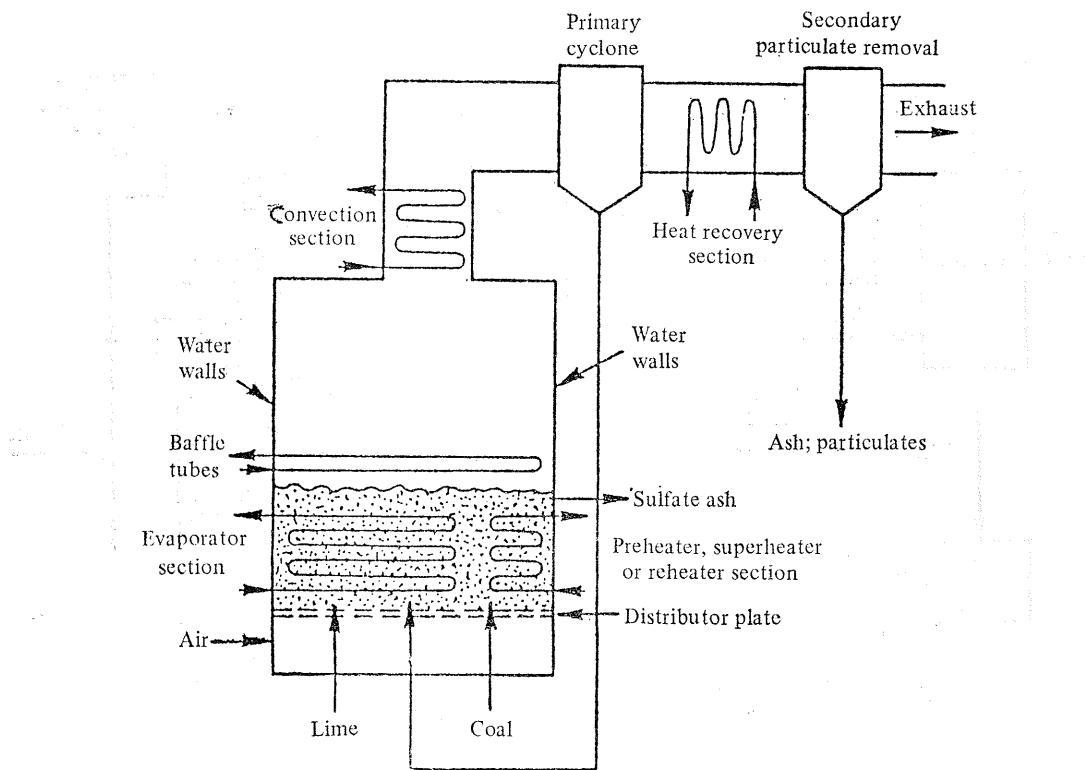
流動床燃燒之原理如圖四所示，空氣由燃燒爐底部注入，使得燃料及填充料（石英石或白雲石）呈懸浮狀態，由於燃燒時的溫度較一般燃燒爐低（約 $1400^\circ\text{F} \sim 1900^\circ\text{F}$ ），因此氮氧化物的排放量大致可降低至 70ppm（若使用 5atm 的壓力式流動床燃燒爐則可降低至 50~200ppm），同時燃燒所產生二氧化硫，大部份被填充料吸附，除硫率可超過 90%，是一種極有發展潛能的燃燒方式。

⑥石灰石加料燃燒 (Limestone Injection Burner)

將碎煤與石灰石漿混合，製成丸狀小顆粒，燃燒時會產生類似流動床燃燒的結果，所排放出的二氧化硫大部份被石灰石吸附，形成亞硫酸鈣。

⑦二段式燃燒 (Two Stage Combustion)

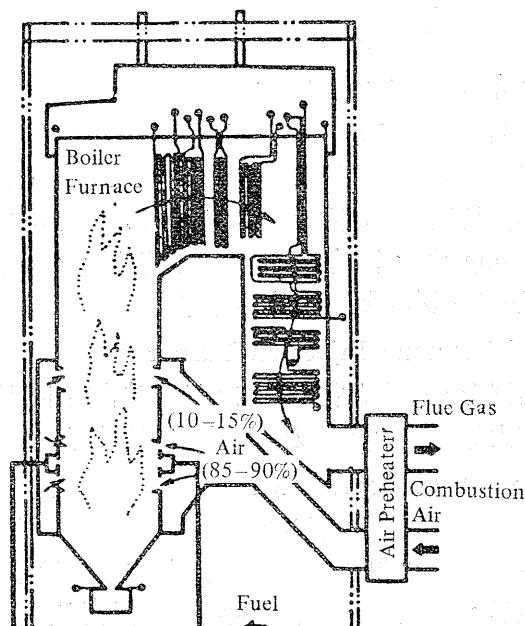
其原理如圖五所示，供應燃燒的空氣經由兩個階段送入燃燒爐，第一階段供應份量不足的空氣（80%~85%），造成不完全燃燒，第二階段供應充分的空氣，補足了在第一階段所欠缺的氧氣，達成完全燃燒。經由這種燃燒程序，在火焰最熱部份的溫度可降低許多，如此則可減少氮氧化物的產生。



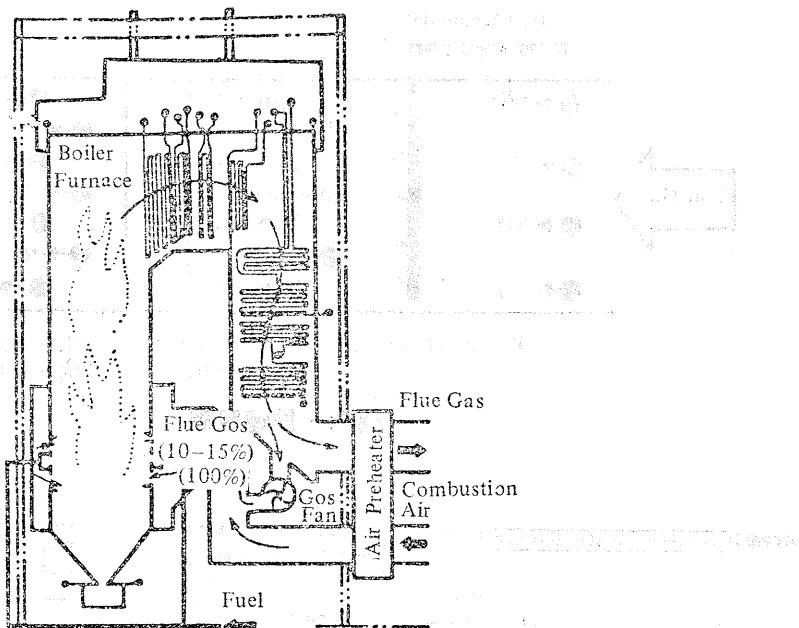
Pressure: 1 to 25 atm
 Coal size: up to 6 mm (0.25 inch)
 Air flow: 0.6 to 4.6 m/s (2 to 15 ft/sec)
 Temperature: 760 to 1040°C (1400 to 1900°F)

Surface: Water walls, horizontal, and vertical tubes in bed
 Sulfur removal: $\text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4$

圖四、流動床燃燒



圖五、二段式燃燒



圖六、廢氣循環

⑧廢氣循環 (Flue Gas Mixing Combustion)

其原理如圖六所示，供應燃燒的空氣與燃燒後含氧量較低的廢氣 (10%~15%) 相混合，以降低燃燒氣體的含氧量，藉此減緩燃燒的速度，這種燃燒程序所產生的結果與二段式燃燒類似，其火焰最熱部份之溫度較低，且火焰較長，可使氮氧化物的排放量減少。

⑨低氮氧化物燃燒爐 (Low NO_x Burner)

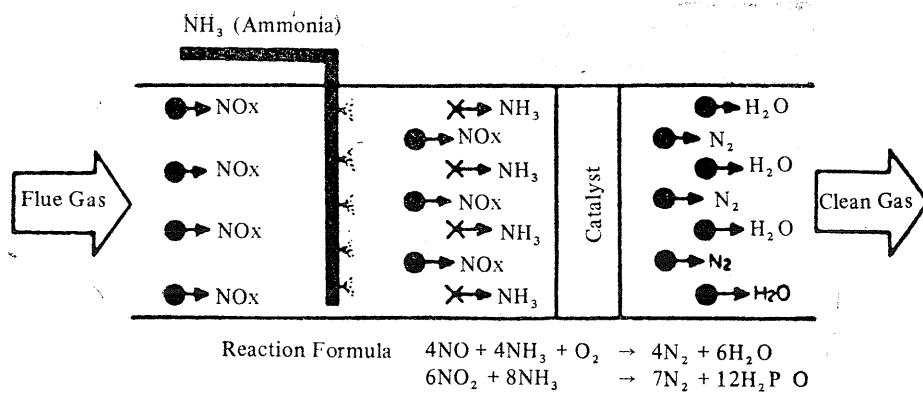
這種燃燒爐的設計乃是採取燃燒氣體的供應，按比例分配給火焰及燃燒中的碎煤，空氣的供應量可逐漸調整至完全燃燒及火焰溫度較低的情況。

⑩排煙脫硝 (Flue Gas Denitrification)

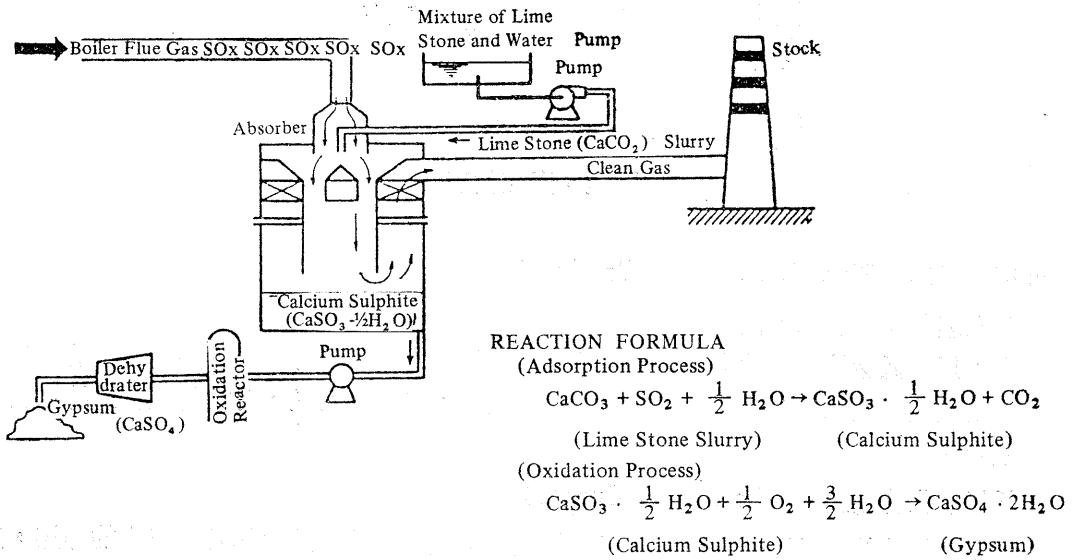
其原理如圖七所示，將阿摩尼亞氣體 (NH₃) 注入含有氮氧化物的廢氣中，混合後穿過金屬觸媒床，受到催化作用，分解成氮氣及水。

⑪排煙脫硫 (Flue Gas Desulfurization)

排煙脫硫分乾、濕式兩種方法。圖八為一濕式排煙脫硫的流程圖。將石灰石與水混合後，噴灑於燃燒後的排放廢氣中，令其充分接觸，則廢氣中的二氧化硫會與石灰石漿反應，生成亞硫酸鈣及二氧化硫。再經氧化後即為石膏。目前所有的二氧化硫廢氣之污染防治設備，大約有90%是採用濕式排煙脫硫。另外乾式排煙脫硫是以水份較少的石灰石漿或碳酸鈉溶液與廢氣中二氧化硫反應，利用廢氣的高溫狀態脫水，而形成亞硫酸鈣或亞硫酸鈉顆粒，而後在集塵設備中將這些顆粒濾出，因為其脫硫效率較低，且影響到集塵設備的效率。故僅適用於含硫量較低的燃料。



圖七、排煙脫硝



圖八、排煙脫硫

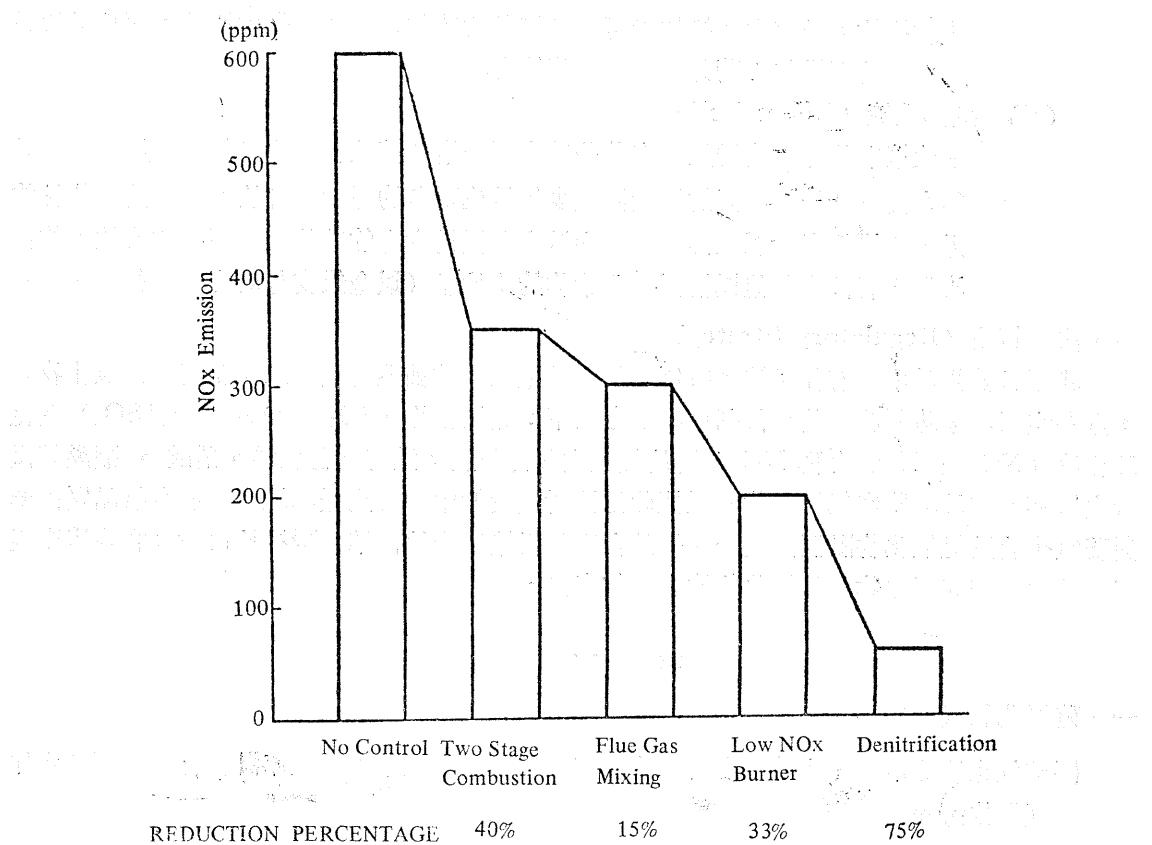
以上介紹的各種技術可單獨或串聯使用，圖九表示各種氮氧化物的串聯使用，經由各階段不同的去除率，理論上可使含有 600ppm 的氮氧化物的廢氣減低至 50ppm。

B、經濟策略 (Economic Strategies)

經濟策略是藉著經濟利益的誘因，促使污染物排放者尋求花費最少，效率最高的污染防治方案。以下介紹兩種最具代表性的經濟策略；徵收排放費及交易許可。

①徵收排放費 (Effluent Charges)

在此制度中的污染物排放者，根據環境保護當局所規定的價格，繳納其排放污染物數量所相當之費用。排放的愈多，所須繳納的費用則愈高，藉此可促使排放者在經濟利益的誘因之下，尋求適當的污染防治方法。目前採用這種制度的國家有西德、匈牙利、法國、荷蘭等都獲得相當程度的成功。本制度的優點是：因為徵收費用容易計算，



只要減少污染物的排放，就可以減輕徵收費用的負擔，排放者在此原則之下會選最有利的經濟利益，以相當程度的污染防治技術來配合，以減少污染物排放引起的徵收費用。但是本制度也有其缺點：如果環境保護官員在計算污染物排放量時，發生錯誤（有意或無意的少算），則排放者經比較後認為繳費較為划算，於是乎不尋求污染防治技術的改善，反而使環境因此受到較多的污染。

②交易許可 (Marketable Permits)

本制度是以法定的總排放量為基準，由環境保護當局決定一固定數量，污染物排放者可以在這個基準內有交易行為。換言之，如果某一污染物排放源，在污染防治的技術上遭遇困難，為了避免總量超出規定的基準，可以在其他污染物排放源，裝設污染防治設備，以抵銷其本身在同一污染物所超出的排放量。其優點為污染物排放總量被限制在某一固定數值之下，爾後不論發生任何變動，總排放量始終維持在基準之下，只低不高，可因此而改善環境品質。缺點為新的排放源為了加入排放行列，必須向舊排放源購買排放權（替對方加設或更新污染防治設備），此舉有失公平。本制度又可區分為下列兩派：

(A) 泡沫政策 (Bubble Policy)

本政策准許任何單獨的機構在其本身所屬的一處或多處污染源中增加其污染物排放量，條件是此一機構必須在其本身的其他污染排放源減少等量或更多的污

染物排放。換言之，排放者可以選擇其污染物要在那一階段排放，而總排放量不致因此而增加；藉此尋求最經濟的方案。

(B) 抵銷政策 (Offset Policy)

本政策准許污染物排放者在某些特定區域增加某些特定污染物的排放量。但必須在同一區域對相同的污染源減少等量或更多的污染物排放，為了達到此目的污染物排放者可以在同一區域內減少其機構本身的其他相同污染物排放源的排放量或者減少其他機構同一污染物的排放量（以金錢支付的方式進行協調）。

C、法規策略 (Regulatory Strategies)

我國目前對酸雨沒有任何法規限制，但對於酸雨中的前兆物質（二氧化硫及氮氧化物），則在空氣污染防治法及其施行細則中規定如下：硫氧化物 (SO_2 及 SO_3 合稱為 SO_x) 及氮氧化物 (NO 及 NO_2 合稱 NO_x) 屬於氣狀空氣污染物，酸霧（含硫酸、硝酸、鹽酸等微滴之煙霧）屬於粒狀空氣污染物。根據此母法所規定的中華民國臺灣地區環境空氣品質標準對硫氧化物及氮氧化物限制如表一。另外在空氣污染物排放標準中對排放口最高容許濃度規定，其中有關硫氧化物及氮氧化物的規定如表二。

表 一

一、硫氧化物 (SO_x)

(一) 硫氧化物濃度：一小時值之各平均須在表列之限值以下，且全年間須符合下列各條件（單位ppm）

地 區 別	一 般 地 區	工 業 地 區
(1) 一小時值	0.3	0.5
(2) 一小時值之日平均值	0.1	0.15
(3) 一小時值之年平均值	0.05	0.075

(二) 硫氧化物累積量：對 100cm^2 捕氣面積於任何連續30天以三氧化硫 (SO_3) 之累積量論，須在表列限值以下。

一 般 地 區	60	單位： $\text{mg}(\text{SO}_3)/100\text{m}^2/30\text{天}$
工 業 地 區	90	

二、氮氧化物 (NO_x)：一小時值之日平均值一般地區在 0.05ppm 以下工業地區在 0.1ppm 以上，全年間超過限值之日數不可有10%以上。

備註：「工業地區」係指有工廠而由當地主管機關所劃定之地區。

「一般地區」係指工業地區以外之地區。

表二

污染 物 項 目	排放口標準最高容許量（濃度）
二氧化硫 (SO_2)	(1)燃燒： 高雄市，台北市：1000ppm 臺灣省：2000ppm（臺北縣，高雄縣部份地區為1100ppm） (2)非燃燒： 既存工廠：650ppm 新建硫酸工廠：400ppm 硫酸製造以外工廠：650ppm
氮氧化物 (NO_x)	1000ppm

以下略述美國在這方面有關法規，提供參考比較。美國清潔空氣法案（United States Clean Air Act）簡稱 USCAA，其中亦未提及任何有關酸雨的字眼，僅對形成酸雨的污染物（二氧化硫及氮氧化物）有所限制，以下列舉由此 USCAA 母法所衍生的規定與標準的其中五項：

①國家環境空氣品質標準（National Ambient Air Quality Standards）

簡稱 NAAQS，本標準為環境保護主管當局（EPA）所制定，其中所列的污染物在空氣中的最高容許濃度，包括二氧化硫，氮氧化物及其他共七項空氣污染物。

③高煙囪政策（Tall Stack Policy）

由於 EPA 在 NAAQS 中規定新污染源必須依空氣品質模式，示範其空氣污染物擴散後，週圍環境空氣品質不超過 NAAQS 所限制的標準。如果煙囪建的愈高，則空氣污染物愈容易擴散，雖然因此可使排放源附近的污染物濃度降低至 NAAQS 以下，但其總排放量並未減少，所以 EPA 針對此一缺點規定，如果一個新排放源建立了一座不必要的超高煙囪，必須受到某些限制，譬如，不能以該煙囪的高度進行污染物擴散模擬，更不得藉此決定其排放源的污染物最高濃度。

③各州施行計畫（State Implementation Plans）

如果某些區域的環境空氣品質，其污染物濃度超過了 NAAQS 所規定的限值，則 EPA 採用一種均減法則（Transferable Emissions Reduction Assessment）簡稱 TERA，內容規定這一區域內所有污染物排放源，將其排放量依固定百分比統一減少排放，藉此維持該地區的環境空氣品質在 NAAQS 規定的限值之內。

④新排放源施行標準（New Source Performance Standards）

基於總排放量日漸增多的認識，EPA 規定新設立的固定污染物排放源必須受到較嚴格的限制，並且不論其排放源附近的環境空氣品質是否仍可容納多少污染物排放量，排放者都必須在其污染防治的技術上達成相當程度的去除率。

⑤嚴重惡化計畫之預防（Prevention of Significant Deterioration Program）

簡稱 PSD，本計畫旨在保護環境空氣品質較佳的區域，為避免遭受巨大的空氣品質

變化，PSD規定凡新設立或欲擴張的污染物固定排放源，不論花費多少都必須以最佳污染防治技術（Best Available Control Technology）簡稱 BACT。進行污染防治工作。

表 三

PROPOSED ACID RAIN LEGISLATION

Sponsor and Bill Number	Geographic Area and Compliance Date	Emissions Reductions (Million Tons)	Interim Emission Reductions	Who Must Reduce	Financial Considerations
Stafford (S-786)	31 States—1995	SO ₂ —8	Gradual	State by State On Basis of Utility Emissions	None
Mitchell (S-145)	31 States—1993	SO ₂ —10 or A2:1 NO _x for SO ₂ Exchange in Reduction	Gradual	Same as ██████████ Stafford	None
Sikorski-Waxman (H-3400)	48 States—1995	SO ₂ —10 NO _x —4	7 Million Tons SO ₂ Reduction by 1990	Retrofit 50 Largest Power Plants for SO ₂ Reduction and Tighter NO _x Control	Fees on Non-Nuclear Electricity
Durenberger	48 States—1995	SO ₂ —10 NO _x —*	Gradual	All Sources of SO ₂ and NO _x	Tax Emissions of SO ₂ and NO _x

*Undetermined

雖然有了以上種種的規定，限制二氧化硫及氮氧化物的排放量，但有心人士並不因此而滿意，美國國會議員也常常以酸雨問題，提出質詢及議案要求表決，如1980年通過的酸雨法案（The Acid Precipitation Act），1981年通過的清潔空氣法修正案（The Clean Air Act Amendments）等，以及表三列出最近四個由國會議員所提的決議案。

酸雨防治的方法可經由種種策略而達成，但最重要的是必須儘快採取行動，若是一定要等到有周全的科學鑑定，那麼一切行動都可能太遲了，因為自然環境的反應是不明顯的，更何況，如果今天不做，未來的世代子孫將不會原諒我們的。

參 考 文 獻

1. Arai, Juro, Overview of Coal Fired Thermal Power Stations, EPDCI Japan, pp. 1-69, 1981.
2. Carroll, J. E., Acid Rain: An Issue in Canadian-American Relations, Canadian-American Committee, P. 80, 1982.

3. Cheremisionoff et al, Air Pollution Control and Design Handbook, Marcel Dekker Inc., P. 1017, 1977.
4. Eliot, R. C., Coal Desulfurization Prior to Combustion, Noyes Data Corporation, P. 307, 1978.
5. Ferris, Acid Rain: What is needed? Energy Business, Ebasco, First Quarter 1984.
6. Gage, S.J. et al, Proceedings of the Acid Rain Conference, EPA Springfield, Virginia, P. 380, 1980.
7. Huang, H. S., Coal Combustion Phenomena and Combustor, P. 65, 1983.
8. Martin, H. C., Long-Range Transport of Airborne Pollutants, D. Reidel Publishing CO., P. 430, 1982.
9. Slack, A. V. et al, Sulfur Oxides Removal from Waste Gases, Noyes Data Corporation, P. 294, 1975.
10. Stern, A. C., Air Pollution Vol. IV, Academic Press, pp. 402-404, 1977.
11. Yaverbaum, L. H., Nitrogen Oxides Control and Removal, Noyes Data Corporation, P. 378, 1979.
12. Code of Federal Regulations 40; Protection of Environment, U. S. A.