

煙道氣除硫技術在台灣的發展

徐恆文* 朱 信**

摘要

工研院能資所在經濟部能源委員會的支持下，正積極發展煙道氣除硫技術 (flue gas desulfurization-FGD)，預計以四年的時間，建立濕式及乾式FGD 技術（目前已建立了1.0 Mbt/hr 濕式 FGD 實驗系統），來協助國內工業界，改善煙氣排放品質，提昇國內能源與環保工業技術水準。

本篇將就國內外FGD 發展概況，國內 FGD使用現況與市場潛力及能資所FGD 技術發展計畫作一說明。

一、前 言

空氣污染的主要來源，為懸浮微粒、SO_x、NO_x等排放物；除了微粒污染來源較廣外，NO_x與SO_x則主要由燃料燃燒所產生。燃料中以燃煤、燃油及石油焦所產生之 SO₂污染最多。石油焦硫份雖高，但使用量不大且為限制使用於有除硫能力之設備，目前多使用於水泥業及流體化床，將來亦可使用於裝設FGD 之鍋爐，以降低燃料成本。而燃油中的硫份，雖可由煉油中加氫脫硫去除，但以目前燃料油情況 (S=1.5%)，將無法達到82年 7月以後之環保標準，除非中油公司在環保壓力下，逐步降低燃油的硫份至 0.8%以下，否則亦有需要裝設FGD 系統；除此之外，在工業密集區域，使用之燃油含硫量雖已

*工業技術研究院能源與資源研究所副研究員

**工業技術研究院能源與資源研究所主任

達標準，若周界無法符合平均值之標準，亦有部份燃油鍋爐需設置FGD 系統。以日本為例，所有燃油工廠中，約有16%已裝設FGD 系統。而在所有已設置FGD 之電廠中，燃油更高達49.1%⁽¹⁵⁾燃燒鍋爐，所以，國內的FGD 市場主要將來自燃煤燃燒鍋爐及部分的燃油鍋爐。

近年來由於政府實施能源多元化政策，國內能源總消耗中，煤炭所佔的比例增加了許多。再加上最近的伊科之爭引發了中東危機，使得高油價的時代又再度來臨，而使燃煤更具競爭力；煤炭價廉、蘊藏豐富，終將成為今後能源的主流。所以，如何去除煤炭利用所造成的污染問題，以擴大煤源及煤炭利用效能，將是今後擴展能源所必需面對的問題。

以目前國內燃煤鍋爐而言，煙氣排放中 SO₂含量大多無法達到82年7月以後500 ppm 之排放標準（除嚴格使用硫份低於 0.6%之燃煤外），需設置 FGD來符合環保要求，更何況低硫煤亦將會愈來愈不易取得，售價也終將上漲，當高、低硫燃煤價格差異到某程度時，設置FGD 反較符合經濟效益；再加上基於政經因素，購買高硫煤也在所難免，為了有效利用廉價的煤炭能源並擴大煤源，加裝煙道氣除硫系統乃勢在必行。

工研院能資所有鑑於煙道氣除硫技術對國內的重要，預計以四年的時間開發此一技術。在第一年的計畫中，我們已完成1.0 Mtu/Hr 濕式FGD 實驗系統的設計及建造安裝，並經由初步試俾，確定符合設計要求。第二年，將以實驗為工作重點，分別以CaCO₃ 與 Mg(OH)₂ 為吸收劑，來求取各參變數間的關係，而達最適化系統操作，以建立此系統的可信度及放大所需之數據，作為大型濕式FGD 系統應用示範的基礎。第三年，將以1.0 Mbtu/Hr 乾式 FGD之設計與建造安裝及大型濕式 FGD規劃與設計為工作重點。第四年，以乾式FGD 實驗操作及大型濕式FGD實驗操作示範為重點，乾式FGD系統實驗中，將分別以Ca(OH)₂與 Na₂CO₃為吸收劑 來求取最適操作條件，以提供工業界裝設FGD 系統設計、規劃及系統最適化操作，並提供技術諮詢來服務工業界。

二、國內外FGD 發展概況

在美國、日本及歐洲，煙道氣除硫技術已廣為燃燒爐所使用（見圖 1 及圖 2 所示），來減少SO₂ 的排放。而所使用的除硫方法主要有下列幾種：⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

1. 濕式系統：

- (1)石灰石／石灰除濕法(limestone/lime scrubbing with oxidation)。
- (2)氫氧化鎂除流法(magnesium hydroxide)。
- (3)雙鹼除硫法(lime/limestone dual alkali)。
- (4)海水除硫法(seawater scrubbing)。
- (5)Wellman - Lord 除硫法。

每年裝設數量

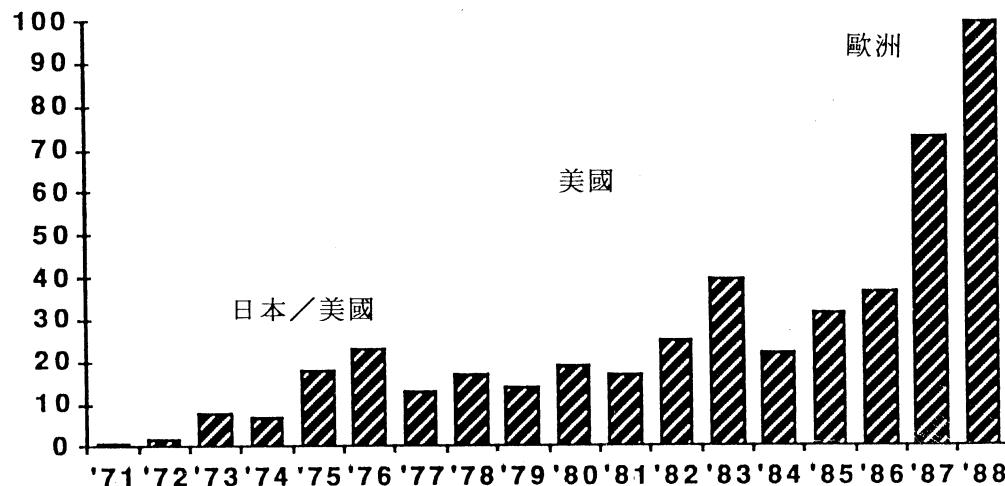


圖 1 每年所知世界裝設FGD 數量⁽⁵⁾

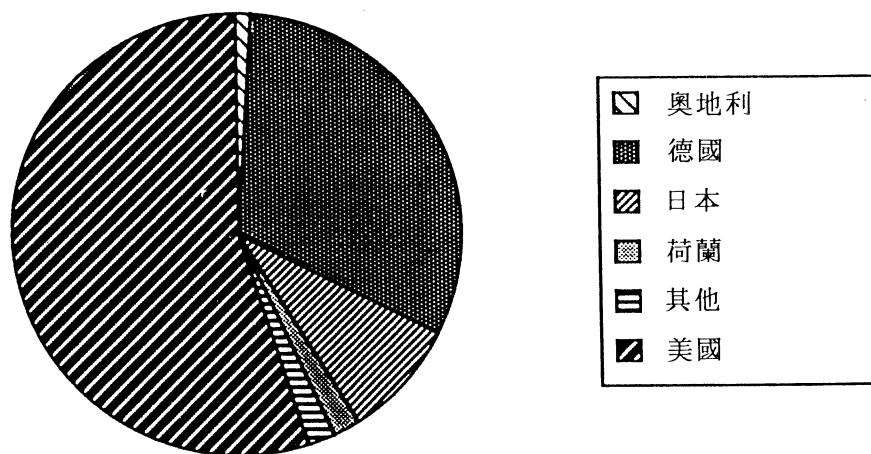


圖 2 世界各國已裝設之FGD佔總裝置數量的百分比⁽⁵⁾

(6) 氧化鎂除硫法(magnesium oxide)。

2. 乾式系統：

(1) 噴霧乾燥法(spray drying)。

(2) 乾吸收劑噴入法(dry sorbent injection process)。

(3) 活性碳吸附法(carbon adsorption)。

目前各種除硫技術其發展情形及各方面比較見表 1 所示，各種除硫系統投資、操作維修成本比較見圖 3 所示。

在濕式FGD 系統中，以石灰石／石灰法最為成熟，約佔FGD 世界市場80%以上（見圖 4），由於台灣石灰石價廉質優且蘊藏豐富，頗適合濕式石灰石FGD 系統的發展，雖然其初設成本較高，佔地空間較大，但其能產生商業級的石膏(Gypsum)，因而減少反應產物處理的問題，以目前台灣石膏約65%由國外進口來看，濕式石灰石FGD 頗具市場價值，但在台電紛紛設置此一系統下將使石膏產量超過國內所需，所以，加速推展石膏用途及簡化此一系統，將是今後研究發展的方向之一。而氫氧化鎂除硫法，為近年來簡化氧化鎂法所發展出來的，由於反應物可經污水處理後直接排入海中，因而降低了FGD 裝設成本，但其吸收劑成本較高，比較適合中、小型燃燒爐使用。

在濕式FGD 系統中，噴霧乾燥FGD 法其除硫率高，且初設成本及所佔空間較少，亦適合國內發展；另一種乾吸收劑噴入法，其初設成本及所佔空間皆很少頗適合舊的燃燒爐所使用，但其除硫率不高（約50%左右），且和噴霧乾燥FGD 一樣，產生之反應產物，無商業價值需加以處理。

至於國內的發展情形，在實驗反應動力學上的研究已有相當的基礎，更進一步模廠的研究，已由工研院能資所，設立了國內第一套1.0MBtu/Hr 濕式FGD 實驗系統已正式展開，並計畫繼續擴展至示範廠以及乾式FGD 技術，以建立國內的FGD 技術。

表 1 各種除流程程之比較⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

除硫 程 序	發 展 情 形	除硫效率%	吸 收 剂	反 應 產 物	副產品	空間需求	投資費用	維修	操作費用
濕式石灰／石灰 —石膏程序	已商業化廣為美、日、歐各國使用	>90	CaCO ₃ or CaO	可任意處理石膏	石膏	基準 100 %	基準 100 %	簡單	低
噴霧乾燥法	已商業化美國已有15座機組共 4500MW(日本亦有12座共13900MW使 用中)	>90	CaO or Na ₂ CO ₃	硫酸鹽和飛灰流 化物(CaSO ₃ /CaSO ₄ 可任意處理而 Na ₂ SO ₃ /Na ₂ SO ₄ 需要妥善處理)	無	80~100%	65~90%	簡單	低
氯氧化鎂法	已商業化，日本已有15~20座小機 組使用中，國內台塑企業已購買13 套陸續安裝中	>90	Mg(OH) ₂	MgSO ₃ /MgSO ₄ 排入海中	無	100~120%	50~90%	簡單	較高
乾式吸收劑注入 法	實驗證實階段	>50	Na ₂ CO ₃ or CaO	硫酸鹽和飛灰流 化物(CaSO ₃ /CaSO ₄ 可任意處理而 Na ₂ SO ₃ /Na ₂ SO ₄ 需要妥善處理)	無	20~30%	20~50%	簡單	較高
Weilmann Lord Process	已商業化，多用於化學工廠。美國 已有5座(115~550MW)，日本亦有 7座共1960MW使用中	>90	NaOH	Sulfur	無	150~175%	110~120%	困難	高
雙鹼法	已商業化，美國已有5座共2000MW 日本已有5座共2000MW使用中	>90	CaO, Na ₂ O ₃ NaOH等	需經由妥善處理	無	100~120%	100~110%	困難	較高
海水／石灰法	已有幾座機組(10~30MW)使用中	>90		懸浮石膏於海水中	無	50~70%	80~100%	簡單	低
氯化鎂法	已商業化，美國已有4座(120~300 MW)，日本亦有3座共720MW使用中	>90	MgO	MgSO ₃ /MgSO ₄	硫	120~170%	110~120%	困難	高
活性炭	實驗工廠發展階段	>80	活性炭	高濃度SO ₃ 氣體	硫	130~150%	100~120%	困難	高

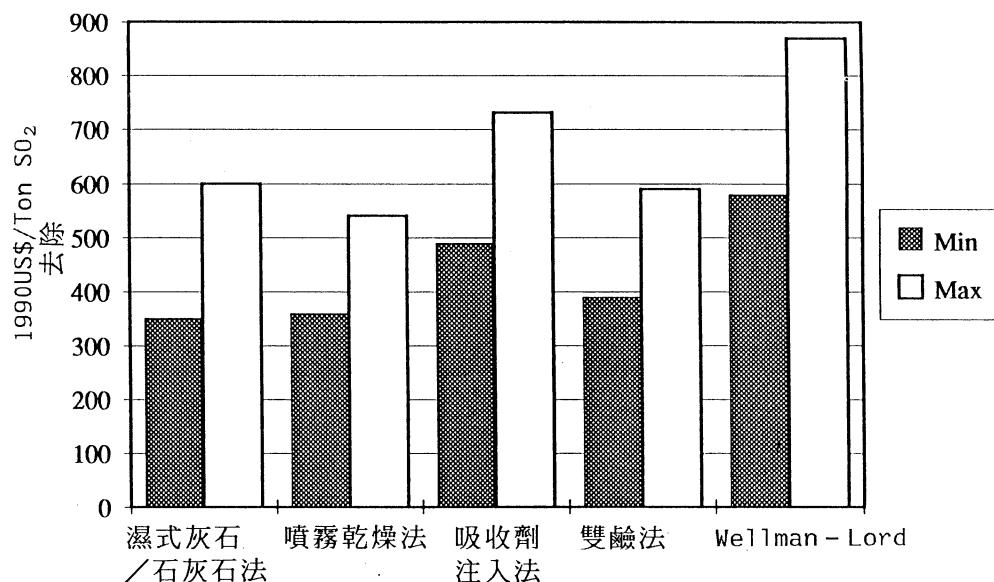


圖 3 一般常用FGD 系統所需費用（包括投資及操作維護費用）之比較⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾

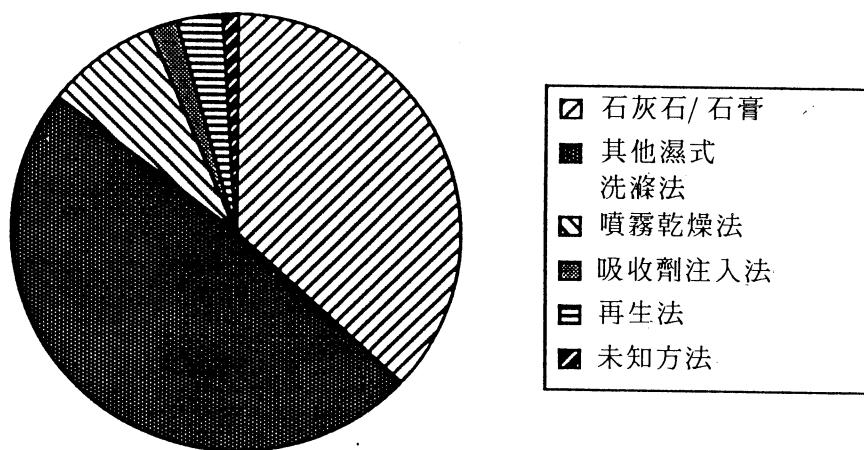


圖 4 目前世界已裝設之FGD系統所使用之除硫方式⁽⁵⁾

三、國內FGD 使用現況及市場潛力

近年來由於環保意識的高漲，再加上政府嚴格的取締，已使得企業界紛紛開始重視環保問題。由於SO_x 的排放造成了酸雨及其他危害，亦為世界各國所重視，並且早在1975年左右即已大量使用FGD 系統來減少SO_x 的排放。至於國內，在環保法規嚴格的規定下，亦開始著手設置FGD系統，據我們所了解的，將其區分如下：

1. 已興建完成者：

- (1)台塑關係企業，已在台灣化學纖維公司各廠之汽電燃煤鍋爐設立氫氧化鎂FGD 系統，而彰化廠之黑液汽電鍋爐則採用WSA-2 SO₂回收製造硫酸系統。其中以龍德廠已在78年 8月開始運轉，可說是國內第一座正式運轉之標準的FGD 系統。
- (2)煙酒公賣局竹南製瓶廠也裝設完成Na₂CO₃噴霧乾燥FGD系統，來改變其150T/Hr熔化窯之煙氣排放品質。
- (3)台灣玻璃公司新竹廠，並裝設Na₂CO₃噴霧乾燥FGD 系統，來改善其熔化窯煙氣排放品質。

2. 正興建中者：

- (1)台灣電力公司，在興達、林口電廠及正興建中之台中電廠1~4號機組，裝設濕式石灰石FGD 系統中。
- (2)台塑關係企業之仁武，林園廠及南亞樹林廠等，亦在裝設氫氧化鎂FGD 系統中。

3. 計畫興建者：

- (1)台灣電力公司正 計畫在其繼續興建之台中電廠5~8號機組，及協和電廠裝置類似之濕式石灰石FGD 系統。
- (2)台塑關係企業，亦計畫在其餘之燃煤汽電鍋爐及計畫興建之汽電鍋爐，裝設類似之氫氧化鎂FGD 系統。
- (3)台灣玻璃公司，也計畫在其餘部份熔化窯，裝設FGD 系統。
- (4)在我們所作的FGD 裝設意願調查結果⁽¹¹⁾(見表 2)，其中計畫裝設廠商有24家 (包含燃油及燃煤者) ，所擁有之鍋爐及燃燒爐有33座。

表 2 國內FGD 系統裝設意願調查結果⁽¹¹⁾

業 別	使 用 燃 料						合計	已設置 FGD	設 置 FGD 中	計畫設置 FGD
	燃煤	燃油	木材	天然氣	蔗渣	其它				
橡 膠	1	3					4	2		1
紡織、化纖	11	8	1				20			7
木 材		1	3				4			
鋼 鐵		1				1	2			
化 工	5	11					16	4	1	3
水 泥	9						9			
玻 璃		6		1			7			2
食 品	1	3			6		10			2
造 紙	9	10					19	1		8
製 造		3					3			1
合 計	36	46	4	1	6	1	94	9	1	24

4. 市場潛力分析：

台灣電力公司正裝設及計畫裝設之FGD 再加上計畫新設之燃煤火力發電機組，所需裝設之FGD 總投資金額將達600 餘億元，而台塑關係企業預計按裝13套以上之FGD 系統，投資金額將達 8億以上。至於工業界其餘各廠，以汽電共生燃煤鍋爐，最具市場潛力，總投資金額可達40億以上，其餘則以玻璃業較具市場潛力，再加上其餘鍋爐或燃燒爐，投資金額亦可達10億以上。

近年來，由於環保意識的抬頭，使得台電建廠困難已漸趕不上國內的需求。工業界為免遭限電而造成損失，紛紛計畫裝設汽電共生設備。再加上近來的波斯灣危機，使得油價高漲，將使燃煤更被看好，因而擴展了FGD 市場的需求。

四、工研院能資所FGD技術發展計畫

工業技術研究院能源與資源研究所，在經濟部能源委員會的支持下，已於78年7月起，致力發展煙道氣除硫技術，以協助工業界設置FGD系統及提供相關之技術諮詢服務，並協助已設置FGD系統的工廠其FGD系統最適化操作。這是一個四年研究計畫，整個計畫預定工作事項分述如下：

1. 79年度：

已設立了國內第一座濕式1.0MBtu/Hr濕式FGD實驗系統（見圖5及表3）⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾，同時亦完成了FGD技術引進與自行開發比較之經濟效益評估⁽¹³⁾，吸收劑調查與特性分析⁽¹²⁾以及FGD裝設意願調查⁽¹¹⁾等工作。

2. 80年度：

針對濕式FGD，以國內最具市場潛力的石灰石與氫氧化鎂法為研究對象，分別以碳酸鈣(CaCO₃)及氫氧化鎂(Mg(OH)₂)為吸收劑，進行一連串除硫效率測試，來陸續建立相關技術資料，以作為放大至demonstration plant的基礎。同時亦進行商業化集塵設備配合乾式FGD整體技術評估，反應產物石膏用途推廣資料收集及乾式FGD工作及實驗室規劃等工作。

3. 81年度：

將繼續進行濕式FGD實驗系統及各種添加劑對除硫效率影響測試實驗，並完成1.0NBtu/Hr乾式FGD實驗系統之設計與安裝，以及大型濕式FGD系統規劃與設計；亦著手進行除硫、除氮整合系統資料收集與分析，作為四年計畫完成後繼續研究發展方向的參考。

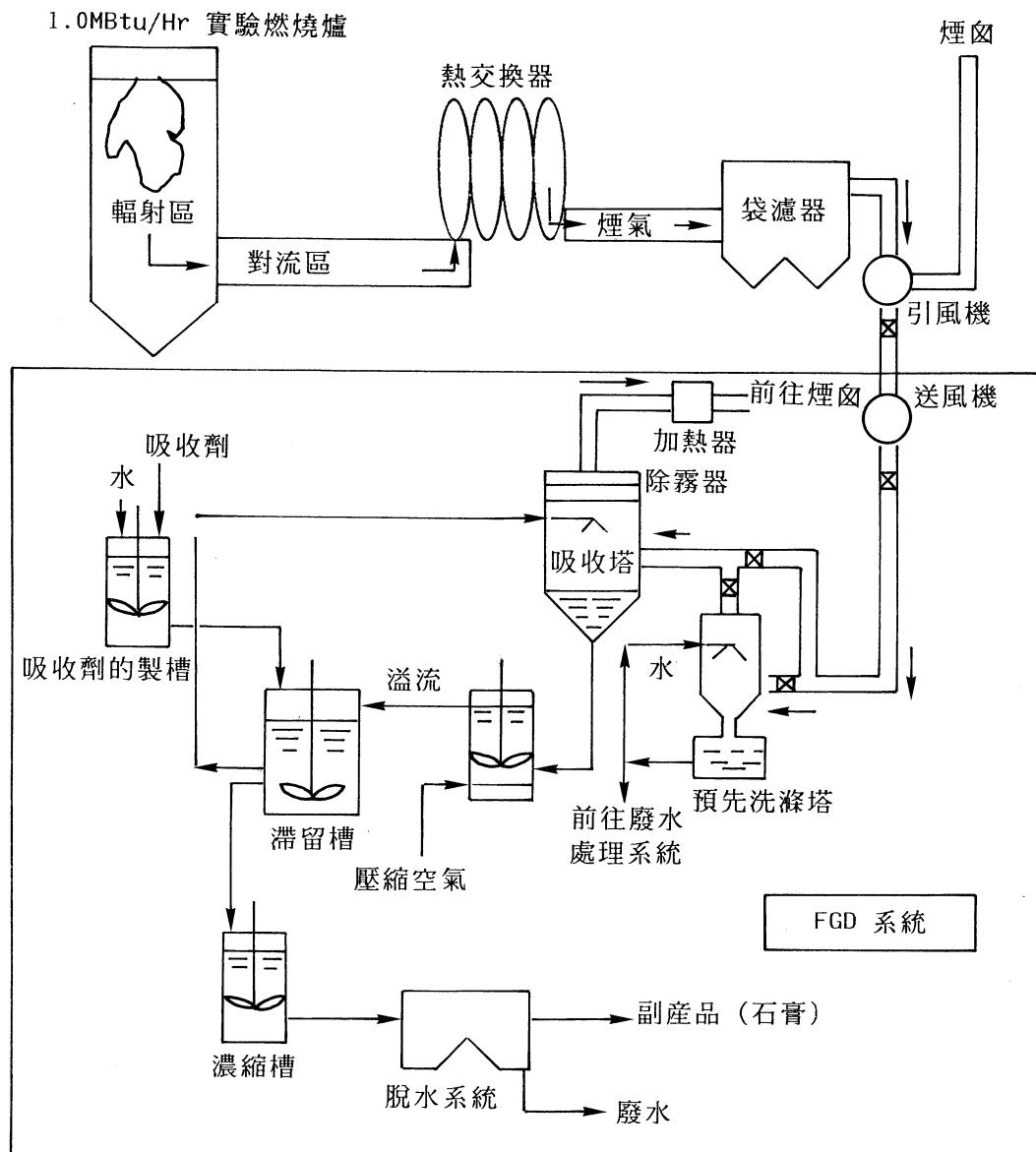


圖 5 工研院能資所濕式FGD實驗系統示意圖⁽⁸⁾

4. 82年度：

針對乾式FGD，以最常用氫氧化鈣 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 與碳酸鈉 (Na_2CO_3) 為吸收劑，進行乾式FGD除硫效率測試工作，建立各參變數間的關係，以作為放大至Demosretion plant的基礎。除此之外將完成大型濕式FGD 系統實驗操作示範，以確立濕式FGD 技術，並計畫將其技術轉移，來提昇國內能源污染防治技術水準。

表 3 1.0MBtu/Hr 濕式FGD 實驗系統設計範圍⁽¹⁰⁾

項 目	操作範圍
鍋爐產生熱量 (Bioiler (MBtu/Hr))	0.6 ~ 1.0
燃燒進料速率 (Feed Coal Rate(Kg/Hr))	40 ~ 24
SO ₂ 進口濃度 (SO ₂ Inlet Concentration (ppm))	560 ~ 3000
SO ₂ 去除效率 (SO ₂ Removal Ratio(%))	90
硫含量 (S Content(%))	0.7 ~ 2.5
氧化所需空氣量 (Oxidation Air Requirement(m ³ /Hr))	1.4 ~ 8.3
Ca/S莫耳比 (Ca/S Mole Ratio)	1.01~ 1.5
石灰石需要量 (Limestone Requirement(Kg/Hr))	0.5 ~ 4.2
煙氣體積流量 (Flue Gas Volumetric Flow Rate(m ³ /min))	4.2 ~ 7.0
循環漿液與煙氣流量比 (L/G Ratio(L/m ³))	7 ~ 16
滯留槽滯留時間 (Residence Time in Effluent Tank(min))	3 ~ 7
氧化槽滯留時間 (Residence Time in Oxidation Tank(min))	5 ~ 10
漿液固體含量 (%)	10 ~ 20
pH值	4.5 ~ 6.5
煙氣滯留時間 (Flue Gas Residence Time(sec))	
預先洗滌塔 (1.Pre-Scrubber)	1.2 ~ 2.0
噴霧洗滌塔 (2.Spray Scrubber)	1.5 ~ 3
煙氣流速 (Flue Gas Velocity(m/sec))	
預先洗滌塔 (1.Pre-Scrubber))	1 ~ 1.7
噴霧洗滌塔 (2.Spray Scrubber)	1.8 ~ 3.1
吸收劑 (Absorbent)	CaCO ₃ or Mg(OH) ₂

五、結語

煙道氣除硫技術的發展，已具有相當長的歷史，亦普遍為先進國家所採用，以減少 SO_2 的排放。在各種除硫程序中，我們認為濕式石灰石、濕式氫氧化鎂及濕式FGD 法頗適合國內業界使用，亦將是我們研究開發的重點。

目前國內所運轉及興建中之FGD 系統，其技術皆來自國外，若將其技術引進而不自行研究開發，將使我們無法建立自己的技術也將淪為只會裝配的命運，而難提昇國內能源環境工程及工業技術水準，姑且不論國內自行開發是否合乎時效，但是對現階段技術發展的了解，是絕對必要的。以台灣的FGD 市場而言，除台電外，汽電共生燃煤鍋爐最具市場潛力，而台電燃煤電廠之大型FGD 系統，非長期不斷的研究開發恐難達成，所以我們以汽電共生鍋爐（約120T/Hr 大小）為我們建立國內技術的第一目標。

FGD 系統相當於一化學工廠，以國內建廠施工能力而言，FGD 系統中除少部份設備及材料、零件等需進口外，大部份皆可由或國內廠商承製，唯欠缺的是整體規劃及設計的能力，這也是工研院能資所，投身於FGD 技術研究與開發的主要目標之一。目前，我們已具備的FGD 知識與技術，能提供計畫設置FGD 系統的廠家相關技術諮詢服務，協助業界改善其煙氣排放品質，共同為清淨我們的天空而努力。

六、參考資料

- (1)M. Satriana, New Developments in Flue Gas Desulfurization, NOYES DATA CORPOATIION 1981.
- (2)Feasibility Study of Flue Gas Desulfurization System Taichung Thermal Powar Station Units 1-4 Final Report Vol. I , II , GibsinEngineers, 1988.
- (3)Environmental Control Retrofit Feasiblity Stay LinKou Thermal Power Station Units and 2, Prepared for Taiwan Power Company,Draft Final Repart ,Burns and Roe Company, 1988.
- (4)The Feasibility Study for Flue Gas Desulfurization System and Modification of Electrostatic Precipitators at Hsinta ThermalPower Station, Gibsin Engineers, Ltd., EPDC International,Limited, 1987.
- (5)S. M. Dalton , Worldwide SO_2 Control Technology Overview,Ninety-Eighth Bimonthly Report, Battelle, 1990.
- (6)R. J. Keeth et al., 1990 Update of FGD Ecomonic Evaluations,1990 SO_2

- Control Symposium , New Orleans, 1990.
- (7) R. J Keetl et al., Economic Evaluation of Twenty-Four FGD systems Tenth symposium on Flue Gas Desulfurization, Atlanta., 1986.
- (8) 徐恆文、朱信、陳明德，煤炭燃燒之煙道氣除硫技術，空氣污染控制研討會，1989。
- (9) 除恆文、朱信、陳明德，Development of FGD Gas Desulfurization atITRI／ERL，中美污染防治技術交流研討會，1990。
- (10) 陳明德、朱信等人，濕式煙道氣除硫系統，能源發展基金技術報告，報告編號ERU-79-R109，1990。
- (11) 徐恆文、陳瑞燕等人，國內FGD 市場潛力及自產FGD 設備能力調查，能源發展基金調查報告，報告編號ERL-79-R130，1990。
- (12) 陳坤緯、陳瑞燕，國內煙道氣除硫系統吸收劑市場調查及特性分析，能源發展基金調查報告，報告編號ERL-79-R110，1990。
- (13) 徐恆文，陳明德、朱信等人，FGD 技術引進與自行開發經濟效益評估，能源發展基金技術報告，報告編號ERU-79-R131，1990。
- (14) P. S. Lowell, World Status of Flue Gas Desulfurization Systems , 煤炭燃燒與污染控制技術論文集，燃料燃燒技術研討會，1990。
- (15) OSAMUGOTO , The Status and Prospect of FGD on Thermal Power Plant in Japan, 1990 SO₂ Control Symposium, New Orleans, 1990.