

工研院靜電集塵實驗廠規劃及其研究方向

張瑞進* 王劍煌**

摘要

靜電集塵器是空氣污染防治技術的基礎，為提高國內靜電集塵器之設計能力，工研院能礦所正致力規畫設計國內第一座靜電集塵實驗廠，期能從模擬現場操作狀況之實驗，了解影響集塵性能的因素；並輔以電腦模式進一步提昇分析能力而達到設計高效率靜電集塵器之水準。希望能將開發之集塵技術轉移民間工業成為本土化工業，以落實空氣污染防治技術的能力。

壹、緒言

隨著經濟高度發展與環保意識高漲，我國環保法規對固定污染源排放標準之立法也漸趨嚴格，根據八十二年七月之法規，粒狀物排放標準之要求將比歐美各國更高〔1〕。面對新的環保法規，國內之靜電集塵器使用行業，如發電鍋爐業，水泥業及鋼鐵工業，將因集塵效率不良而影響最佳操作狀況和最大產量的達成。雖然國內學術界也投注相當大的精力，針對增進靜電集塵性能進行研究，但多屬理論分析，對於此技術的本土化、成熟化仍感不足。為配合國家有效利用能源政策與自行設計之能力，工研院能礦所在污染防治專案基金支持下，規畫、設計靜電集塵實驗廠並將作一系列技術之深入探討，以達到高效率低污染的能源利用。希望由此實驗廠完成後，成為國內集塵技術發展中心，提供國內製造業設計技術，促使工業升級。

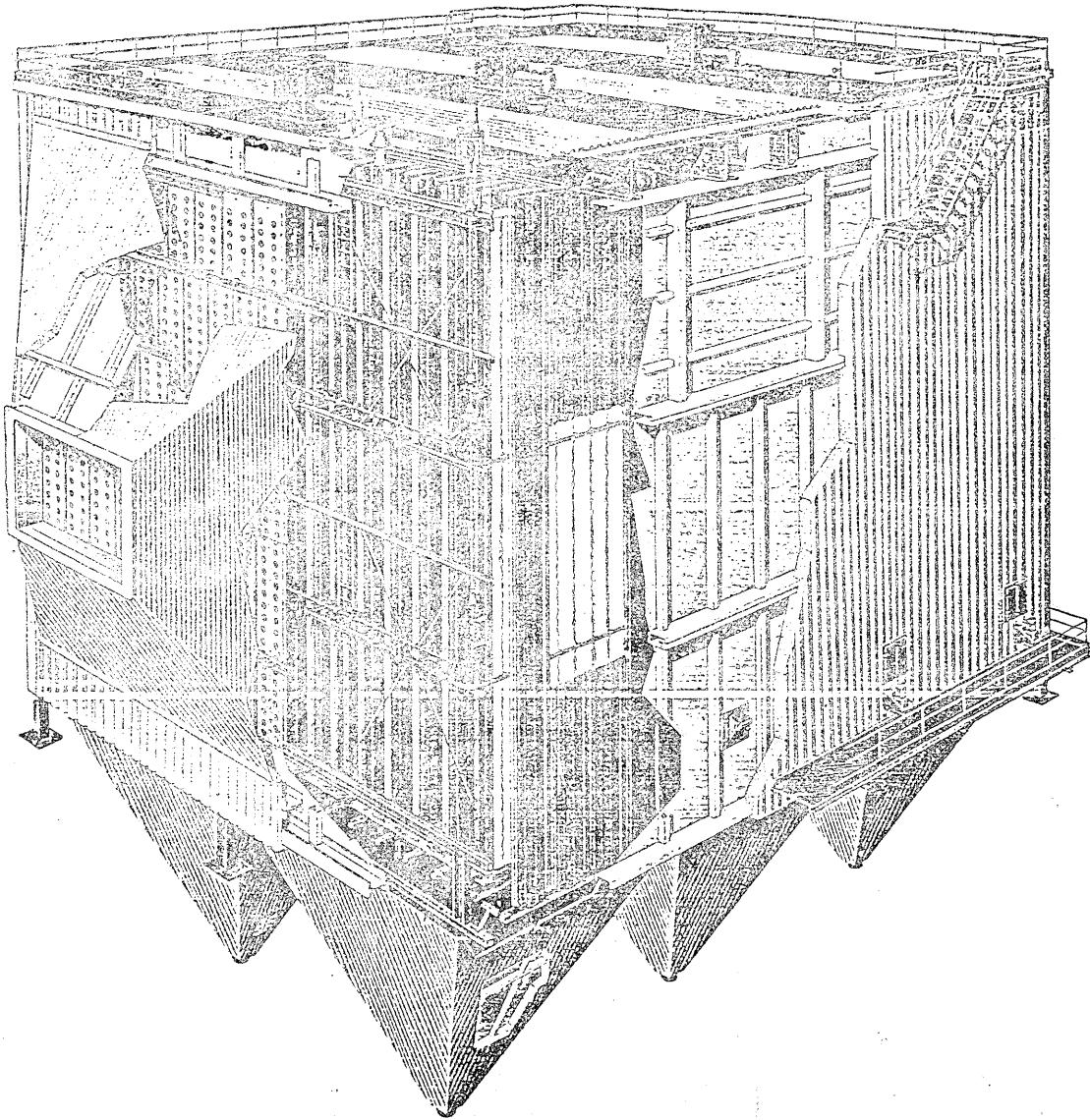
目前該實驗廠已進入建造階段，故藉本文詳作介紹，目的除讓國內各界了解該實驗廠之功能外，並讓各界了解各實驗廠之未來研究方向。同時希望利用此一實驗廠，並結合其他相關技術，如噴霧吸收塔 (spray absorber) 和選擇性觸媒還原 (selective catalytic reduction) 以除硫／硝〔2〕，開發適合我國各行業之空氣污染防治技術。

貳、靜電集塵器原理及構造簡介

靜電集塵器 (E. S. P.) 係採用多組金屬線與金屬板之基本架構，在高壓直流電之操作下，以掃集流經極線與極板間煙道氣中塵粒，如圖(一)所示，上方為變壓整流組用以輸出電壓

* 工業技術研究院能源與礦業研究所副主任助理研究員

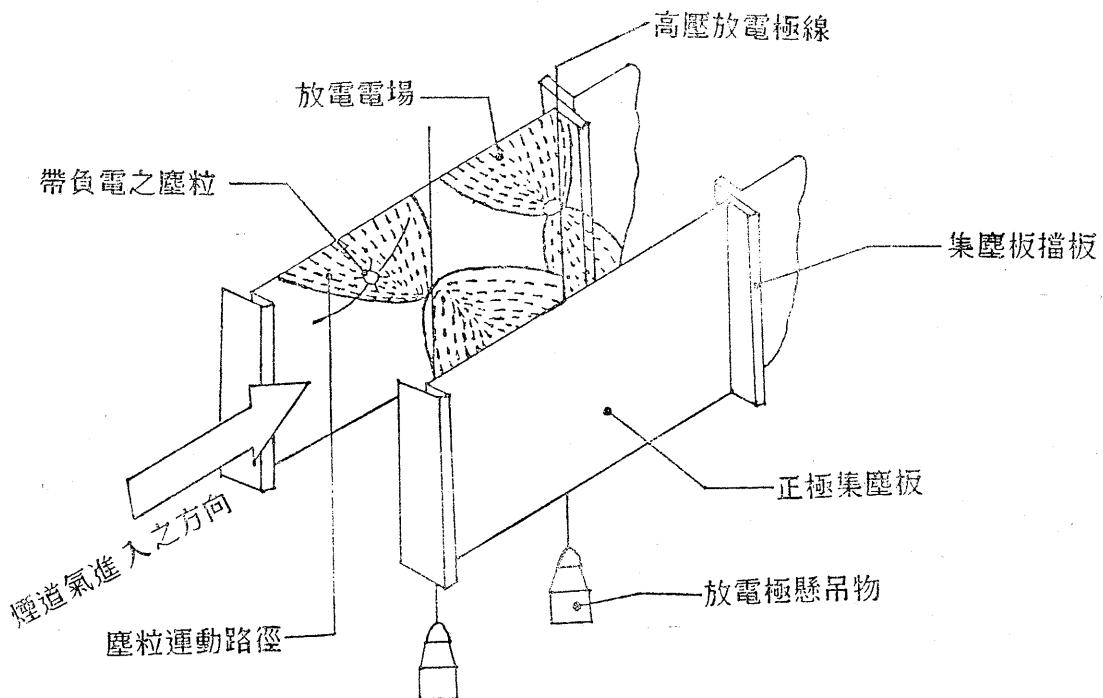
** 工業技術研究院能源與礦業研究所助理研究員



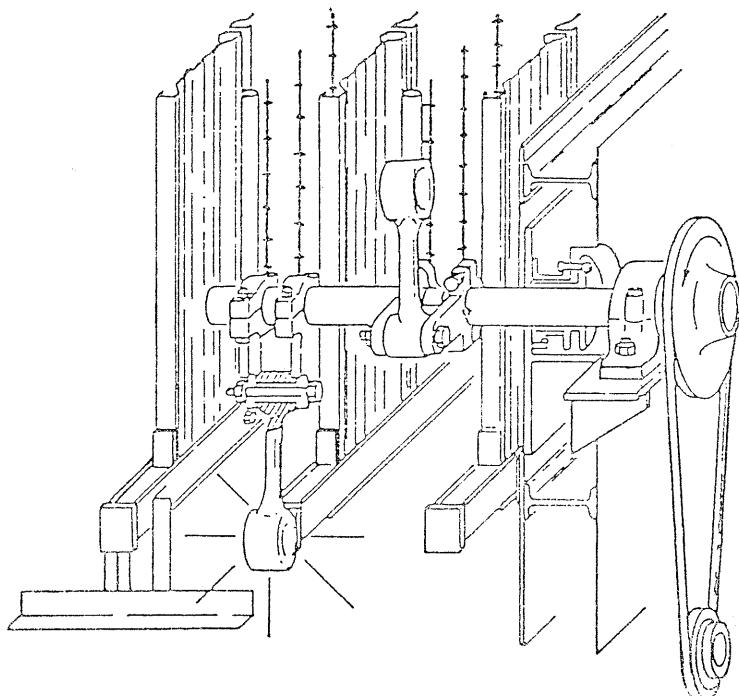
圖一 靜電集塵器

、電流，而左側方型開口處為進氣通道，其對面位置則有出口通道，底端錐形體為儲灰斗，用以儲放及排出被敲落收集之灰土。

靜電捕集飛灰的原理是利用氣體在強電場中之游離效應，其中強電場乃由放電極 (discharge electrode) 產生之電暈電流 (corona current) 與集塵極板 (collection electrode) 間所形成。如圖(二)所示，當兩極間有足夠之直流電壓時，從放電極釋放之電子使氣體中之塵粒帶負離子，因而被正電極之集塵板捕集。電暈電流之產生是遵循歐姆定律，當捕集之飛灰在集塵板過量時，必須予以敲擊而收於底端之貯灰斗 [3]、[4]。



圖二 平板式 (Plate Type) 靜電集塵器之集塵模式



圖三 機械落錘式敲擊器

通常工業用 ESP 之設計是採用經修正之 Deutsch-Anderson 公式〔5〕以計算集塵器效率，如下式：

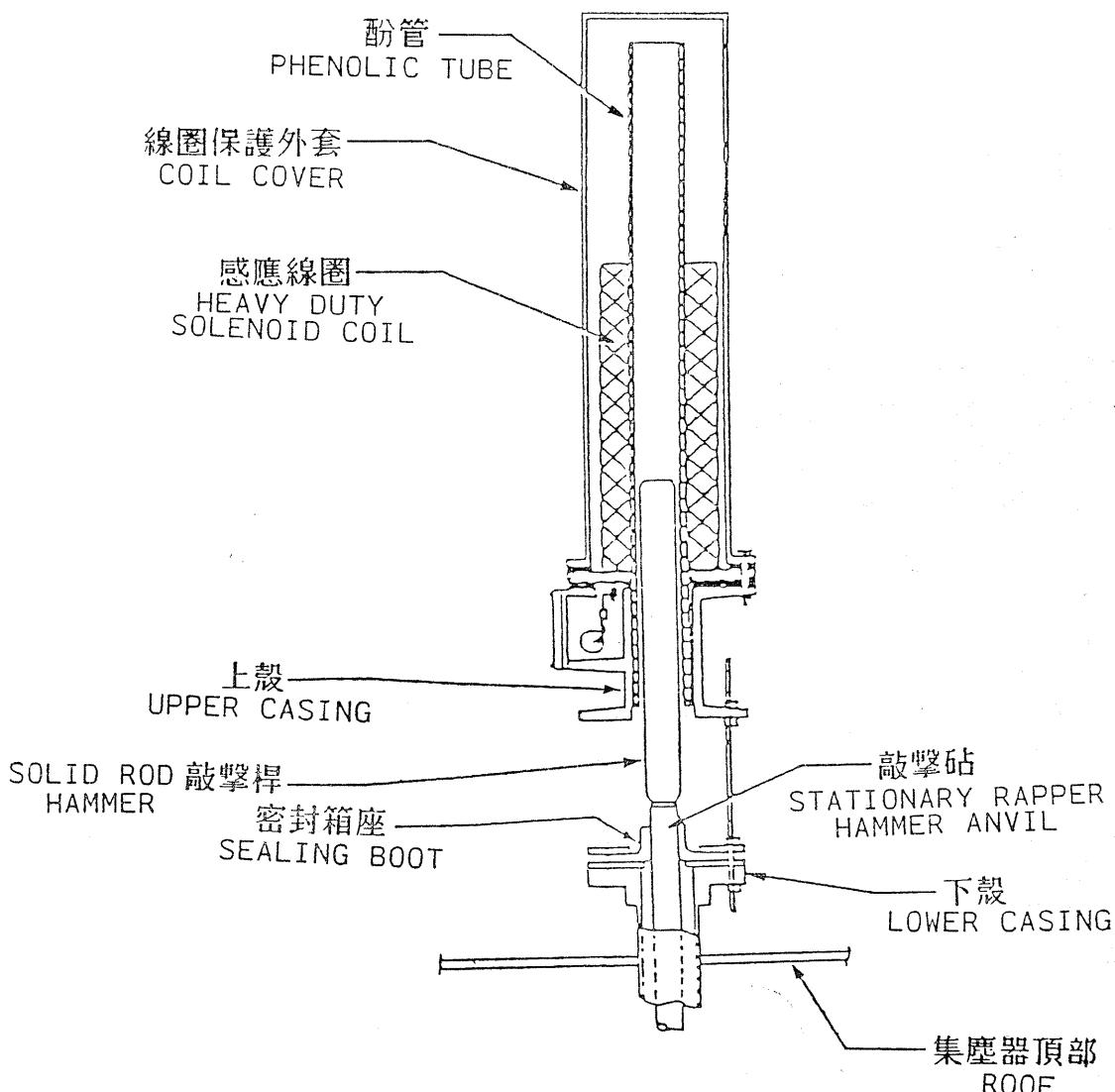
$$n = 1 - \text{EXP} [-W_m \cdot A / Q]^m$$

其中 W_m ——塵粒有效集塵速率 (migration velocity)

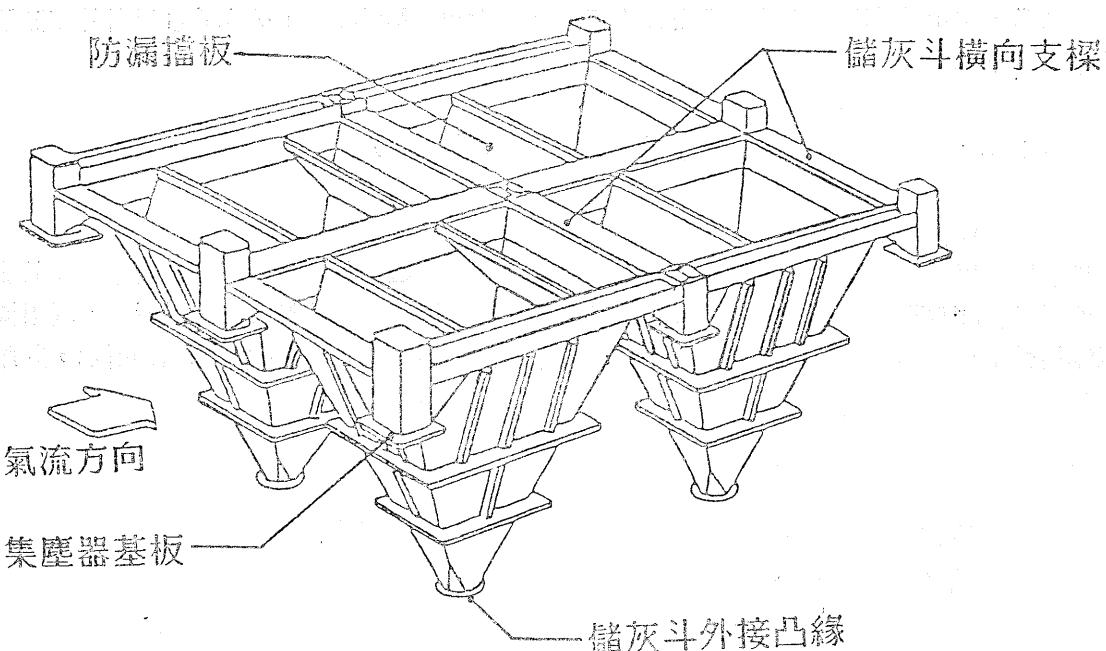
A ——有效集塵面積

Q ——平均流量

當集塵器使用一段時間後，放電極線外表面與集塵板上將因聚集大量塵灰而影響集塵器效能，所以必須經常除灰。除灰之方式可分為二種，一為機械落錘式撞擊，如圖(三)所示，利用機械軸旋轉下轉速動力控制落錘之敲擊力量及頻率。另一種為電磁振動式，如圖四所示，其原



圖四 電磁式敲擊器



圖五 儲灰斗構造圖

理是利用感應線圈吸附、弛放之力量帶動重錘直接敲擊於集塵板座，敲落之灰塵大部分並受重力沿板面掉落至儲灰斗，另有少量灰塵將散逸（reentrainment）隨著煙道氣排出。圖五為 E. S. P. 儲灰斗，該裝置必須有防止間隙漏氣擋板之設計。欲移去、儲灰斗所收集之塵土可依需求不同而採用輸送帶、真空抽泵、或小型簡單管閥控制排放。

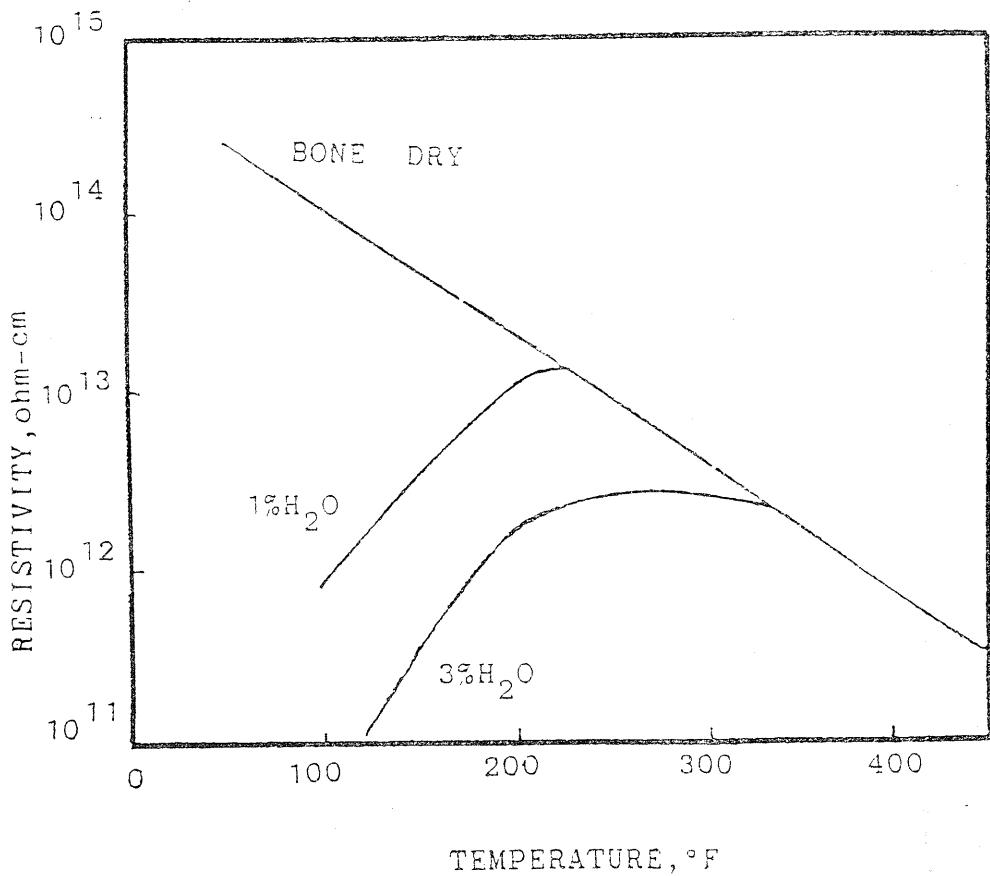
叁、集塵效率增強

由於酸性氣體排放法規之限制，工業界已漸漸採用低硫煤當燃料，然而低硫煤之煙塵收集效率遠遜於高硫煤，所以現今最感迫切之問題即如何有效改進設備或改變收集操作狀況來處理低硫煤[6]，一般而言，提高集塵效率之最簡單方法即增大集塵器的有效集塵面積（specific collection area），這是相當不合經濟效益；為解決此問題，工業應用上已發展多種效率增進技術，以下簡述三種常用之操作方法：

(1) 表面調節 (Surface conditioning)

當煙道氣之水氣適量而且操作溫度於 300~400°C 之環境下，塵粒表面將由於形成導電薄膜而提供電荷之傳遞[7]，因此當煙道氣含有水氣時，高電阻之塵粒形成此薄膜可使電阻降低，如圖六所示。

SO_3 在溫度高於 400°C 時可吸附於塵粒中，當溫度下降時能與水氣形成具降低電阻性之黏狀物結果。如圖七所示。此外，關於 NH_3 調劑，在 570°F ~ 670°F 下與 SO_3 形成硫酸氫銨，亦能有效提高集塵效率[8]。



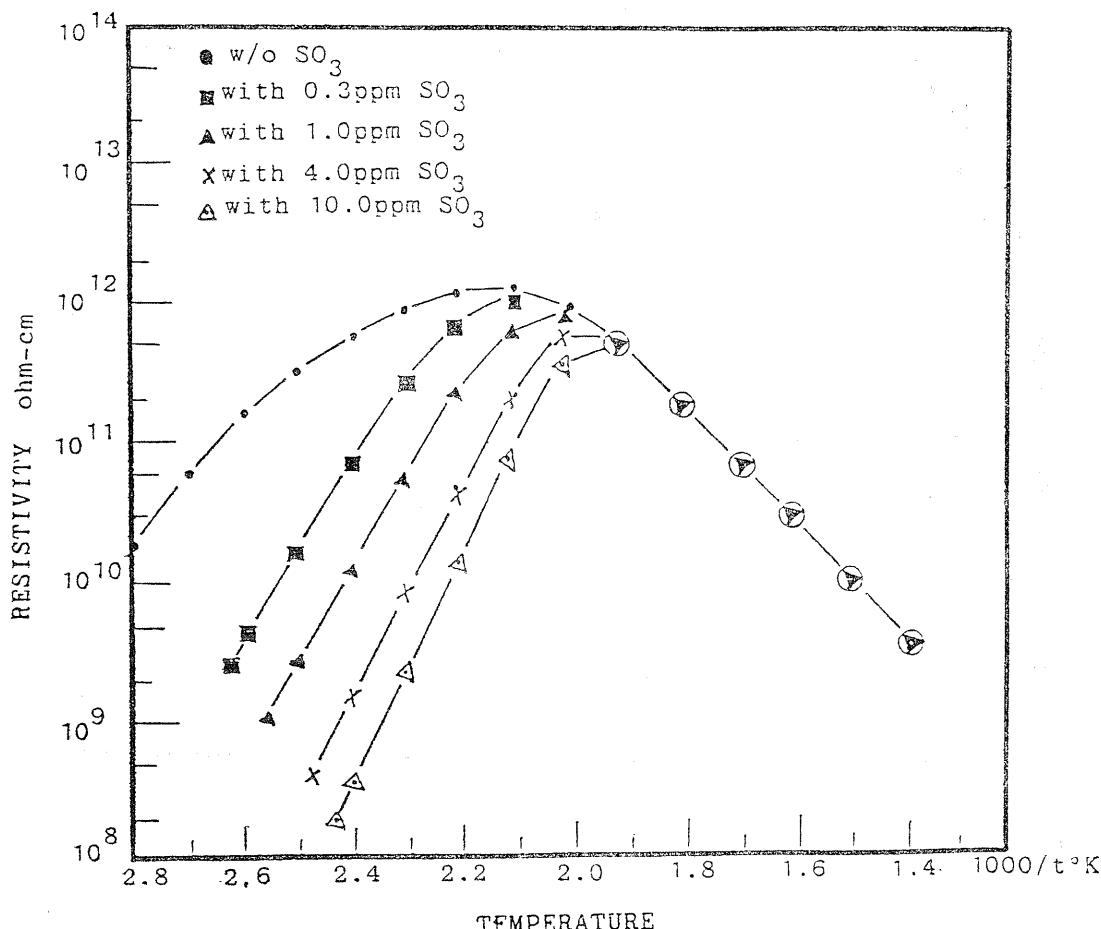
圖六 水氣對電阻之影響

雖然添加化學調劑之表面調節具有增強塵粒間結著性，適當改變電阻性，及在不需擴建原靜電集塵器之前提下，達到改善集塵效率等優點，然而大部份化學品皆有危害性、腐蝕性，必須增加保養貯存，及處理費用。一般而言，調節塵粒性質之添加效果無法有效預測，此外，當塵粒附著於集塵板後，因其黏性(sticky)增加而不易敲落也為其缺點之一。

(2)脈衝式供電 (pulse energization)

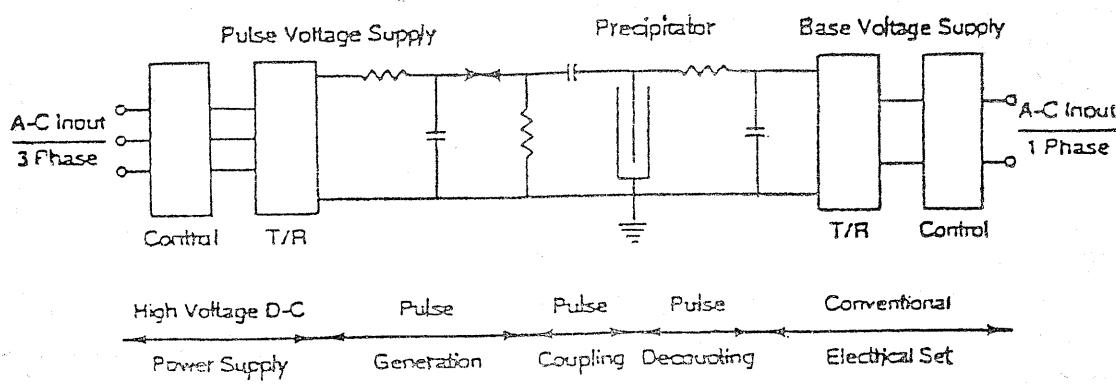
欲達到最佳操作性能，ESP 內電場不僅要高而且電流密度須分布均勻。為避免灰份電阻太大所導致增高兩極間形成火花頻率並嚴重限制電場及電流均勻，許多文獻證實[9]，採用脈衝式供給電壓系統可有效處理高壓飛灰問題。圖(八)為脈衝系統基本電路，經由脈衝電路之裝設，可有效的對舊有設備集塵效率加以改進，圖(九)為該脈衝電路與未裝設前之效率改善比較，其中H為增強因素，係集塵速率參數之比[10]。

脈衝系統可用於新設計 ESP 或舊有設備之改進，利用此系統僅需改變集塵器外部電力設備，在不更改內部構造下即可達到提高集塵效率之目的；其缺點則為該變壓整流組(T/R set)之設備費用昂貴。

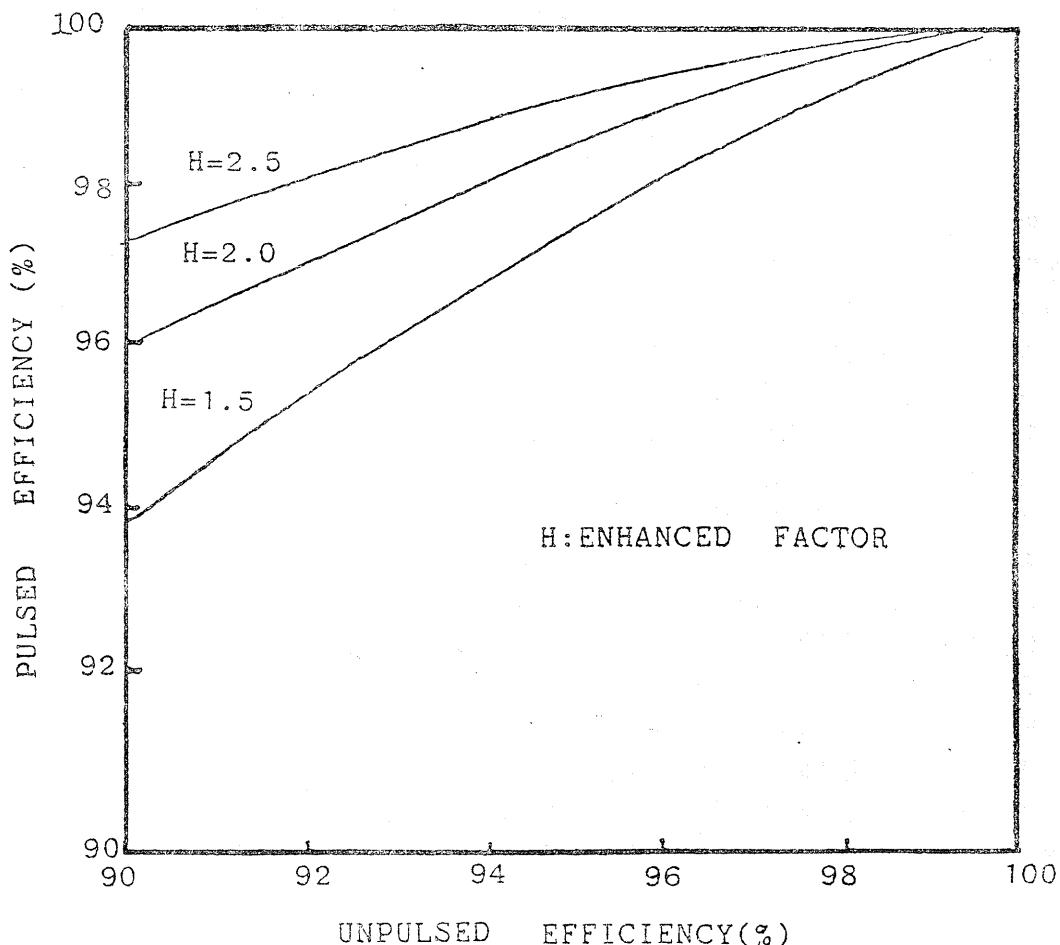


圖七 SO_3 之調節對電阻之影響

Circuit Diagram
Pulse Energization System



圖八 脈衝波供電系統之電路



圖九 經由脈衝供電達到集塵效率之改善

(3)高溫高壓操作 (High-Temperature and High Pressure Operation)

這種增進集塵效率操作最常見於高壓流化床燃燒 (pressurized fluidized bed combustion) 及煤之氣化 (coal gasification)。影響集塵器之篩選及集塵效率之許多因素是與氣體的溫度和壓力有關。

由於集塵速率隨塵粒附加電壓之平方增加而增加，因此靜電集塵器皆設計操作於電壓之最高值，期使集塵速率增快而降低集塵板面積。

而提高溫度可增加附加電壓，且其效益遠大於氣體黏度隨溫度 0.6 次方提高之負效果。高壓下導致高氣體密度，減少進入 ESP 內之氣體體積，此可進一步降低集塵板面積。雖然高溫高壓之操作具可調降電阻值與防止操作溫度低於露點 (dew point) 之優點，但是缺點為需要改變 ESP 材質以適應耐高溫高壓條件；在固定壓力值範圍下，高溫使得氣體密度降低，亦容易引起 ESP 內火花產生。

以上三種增強集塵方式，HTHP 須重新改變設備，無法適用舊有 ESP，故本 pilot

plant 之規畫不予採用；針對增進集塵技術目標，採用脈衝供電力系統，並對化學調劑表面調節之技術加以研究。

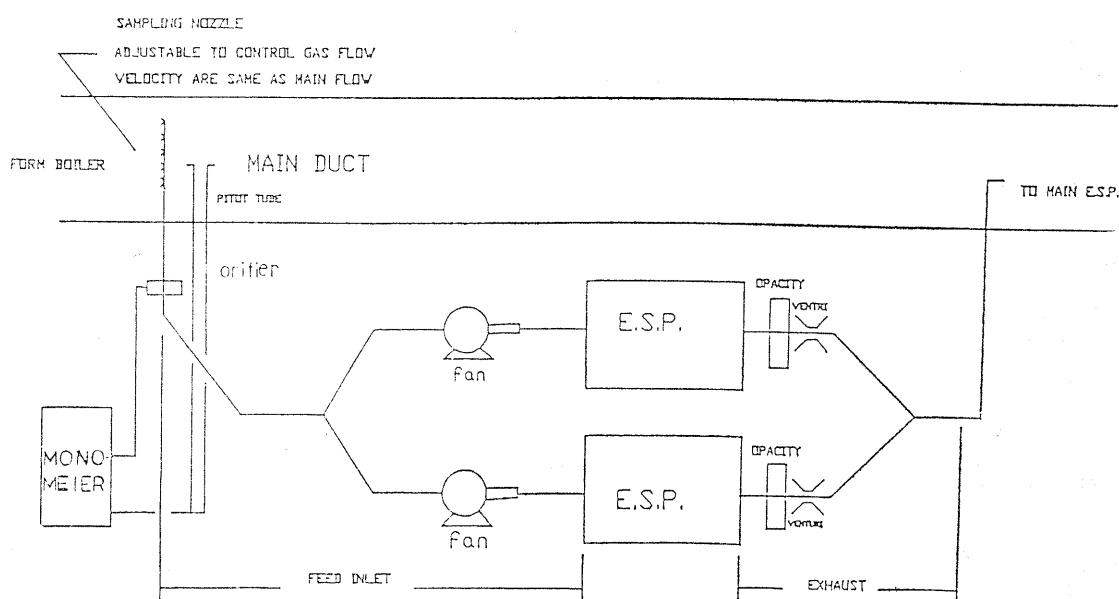
肆、靜電集塵實驗廠之規畫設計

集塵技術之研究與開發計畫的宗旨係設計一多功能之靜電集塵實驗廠，由模擬現場ESP之操作條件，研究改善目前工業界中之操作不良與效率不彰之靜電集塵器，以達到突破產能上限並兼顧污染防治之雙重效果。從各行業操作條件的了解以建立 ESP 之設計準則。

本計畫多功能實驗廠之規畫，即針對靜電集塵器中各種影響集塵性能之現象作深入的探討，主要的研究項目如下所列：

1. 間歇性充電方式 (intermittent energization) 研究。
2. 寬板間距 (Wide plate spacing) 研究
3. 放電極與集塵板效能研究
4. 電極安裝偏差與電力可容裕度 (electrical clearance) 研究
5. 集塵器飛灰聚積效應 (dust build-up effects) 研究
6. 再散逸效應 (effect of reentrainment) 之研究
7. 擾流分佈研究
8. 表面調節 (conditioning) ，如添加 NH₃, SO₃ 等研究
9. 飛灰粒子特性 (particulate characteristic) 研究

本實驗廠之原始規畫係採用現場實際 (in-situ) 改善之系統，如圖(+)所示，包括兩部平行且獨立操作之靜電集塵器，兩部風車與濁度計 (opacity meter) ，一組採樣孔 (



圖十 採用二個 E. S. P. 之設備圖

sampling nozzle) 設備及煙道採樣裝置 (universal stack sampler)。在操作過程中，原始煙道氣經採樣孔後均分成兩道氣體進入兩部平行靜電集塵器；為使實驗場之集塵器保持與現場集塵器相等之速度，可依 EPA method-5 規章調整氣嘴 (orifice) 將原始煙道氣等速吸引進入採樣孔內。其中一部集塵器將模擬現場 (real site) 集塵器之操作狀況，另一部集塵器則可改變其操作狀況、極線、極板與板距，並從濁度計之比較可得知其集塵性能的差異。由此靜電集塵實驗廠所獲得之最佳模擬操作條件，可作為現場集塵器改進集塵性能的考慮因素。如此，可在不需增大有效集塵面積下，有效地提高原有集塵器之效率及達成其最高操作負載，非常符合經濟效益。這個構想是瑞典 Flakt 公司在1980年所創 [11]，主要用於測試不同煤燃料對集塵性能的影響以作為設計的參考。目前我國發電鍋爐所用之燃煤中，90%以上仰賴進口，而且分成許多種 [12]，因此煤質無法掌握是集塵器效率不彰之主因。若藉著這種兩部平行集塵器實驗廠，可使現場集塵器因酸性氣體排放控制之需要而改用低硫煤時，提供保持集塵效率之最經濟改善工程。從長遠眼光而言，也可為我國發電鍋爐業提供一套不同煤質對集塵性能的影響資料，以為業者選用靜電集塵器的參考。

由於預算經費有限無法同時建造兩部平行集塵器，因此本計畫將先行規畫設計一部具有兩段 (field) 的集塵器，如圖 (十一) 所示，並輔以集塵器之性能電腦模擬 [13]，以分析各種影響集塵性能之因素。其原理仍同於前述兩部平行式集塵器，採樣氣體從現場煙道氣以等速吸引方式進入實驗型集塵器，當研究其改變操作條件對性能的影響，可與模擬現場集塵器操作條件之集塵效率相比較。此方式的缺點即無法在一方面作模擬實驗之同時，也同步進行操作條件改變下之集塵性能改善研究；除使實驗所需時間加長外，其不同步誤差所影響之效果亦難預估。為彌補此缺憾，本計畫在改變不同操作條件時，將輔以電腦模擬掌握較具改善性能之操作條件。從過去半年的規畫，本計畫將利用此實驗場研究各種操作條件對集塵性能的影響，以達到本計畫之宗旨—靜電集塵器設計準則的研究。

為符合多元化研究目的，此單一式集塵實驗廠之設計與建造上和一般工廠之集塵器大不相同，以下為幾項重要特色的說明：

(1) 可移動性 (mobile) 之構造

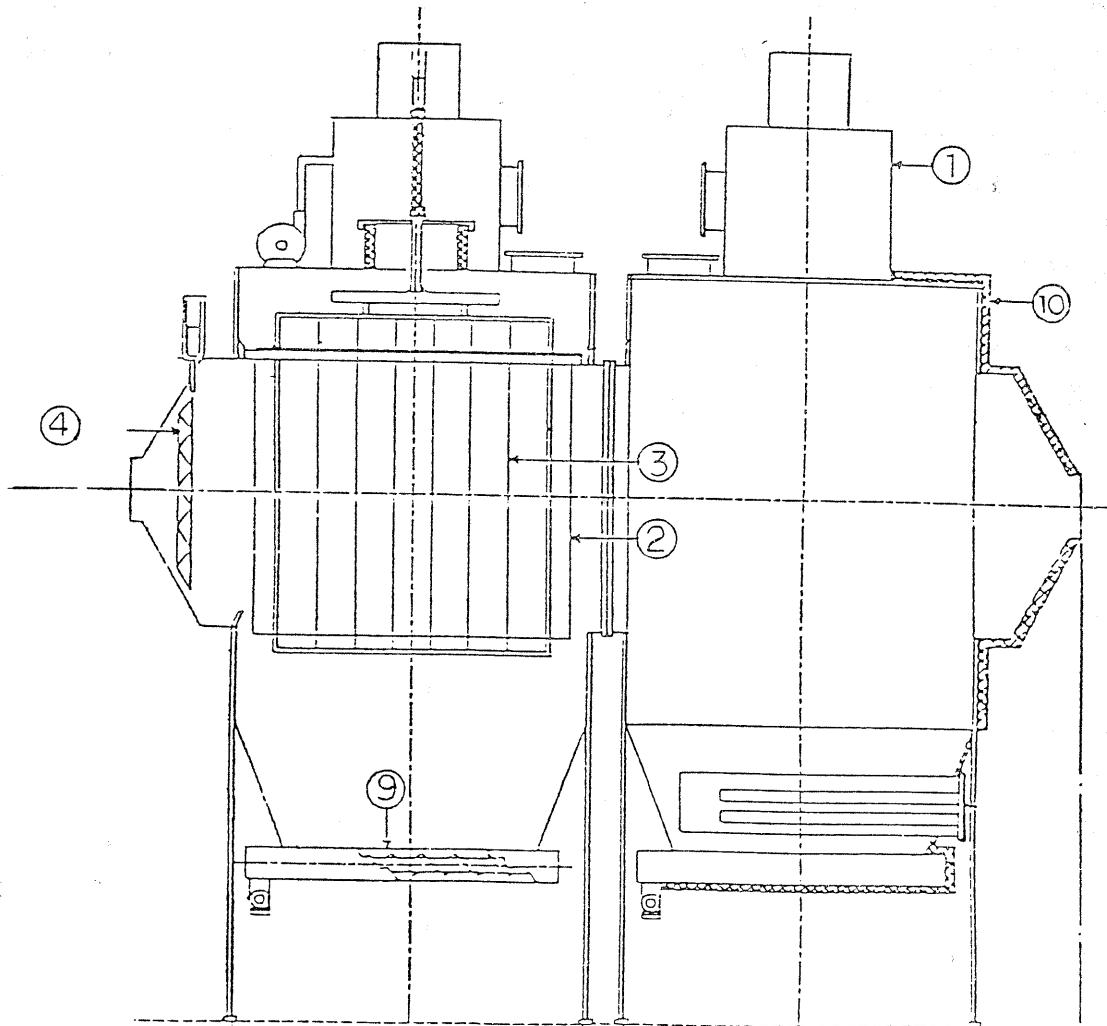
一般 ESP 是固定於工地現場，本實驗用 ESP 將可拆成適合卡車裝載之三部分，並易於組合。另外，本實驗廠連接部分皆有凸緣 (flange) 之設計便於安裝。因此，可機動性提供性能改善服務。

(2) 極線影響集塵性能研究

基於不同極線之選擇有不同電場分布效果，一般採用圓形、正方形、絞形或菱形之放電極線，如圖 (十二) 所示、本實驗用電極座 (holder) 之設計即考慮可銜接不同極線，以選擇安裝不同極線作性能評估研究。

(3) 板間距空間 (wide spacing) 可伸縮式設計

近年來 ESP 發展之新領域朝向板間距之研究，由於不同寬距將影響收集板間各種物理現象，如平行流向、塵粒有效集塵速率 (migration velocity) 與決定選擇最佳化操作之極板電壓、電流、極板數等關係。如圖 (十三) 所示，本實驗廠所設計之板間距將可伸縮於



①外殼和結構 ②集電塵極 ③放電電極 ④氣體分流板 ⑤軸襯裝置
⑥敲擊裝置 ⑦DC 整流器 ⑧控制面板 ⑨輸灰設備 ⑩保溫材

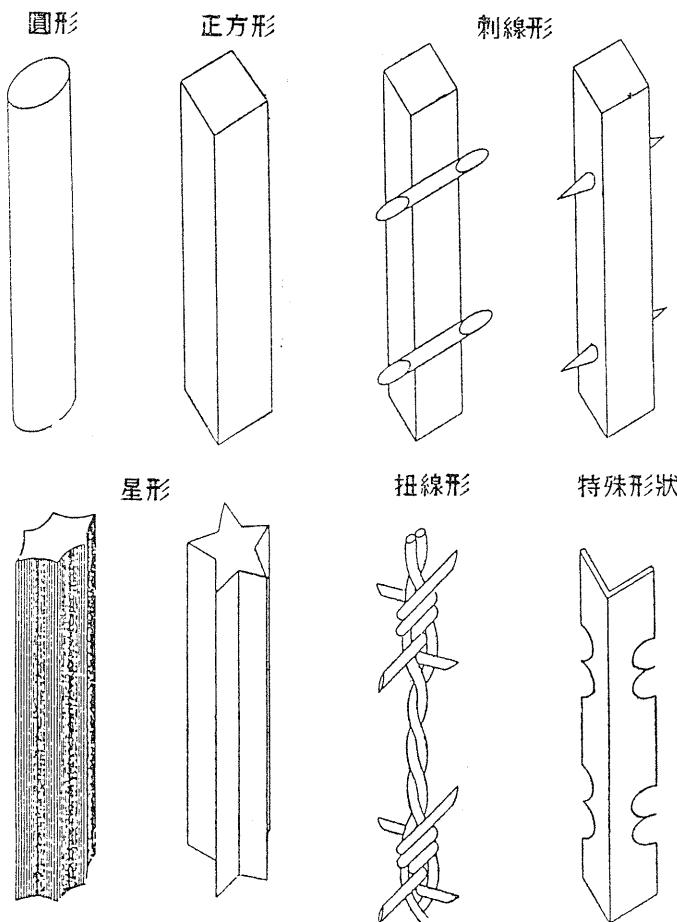
圖十一 實驗廠 E. P. 剖面圖

260 至 500mm 作研究。

(4)高直流電壓

即 100KV 之變電整流 (T/R Set)，為具上述極板寬距選擇性，本實驗用 ESP 將採用高於同等規格大小 ESP 電壓值 (一般為在 55~75KV) 之電力控制。

(5)不同模擬煙道氣之研究



圖十二 各種不同放電極線形狀

包括採直接由鍋爐燃燒排放煙氣或利用進料器輸入人工瓦斯混合氣（如圖十四）。也可利用本設備做為添加如二氧化硫、氨氣等調節煙塵表面性質之研究。

(6) 敲擊系統 (rapping)

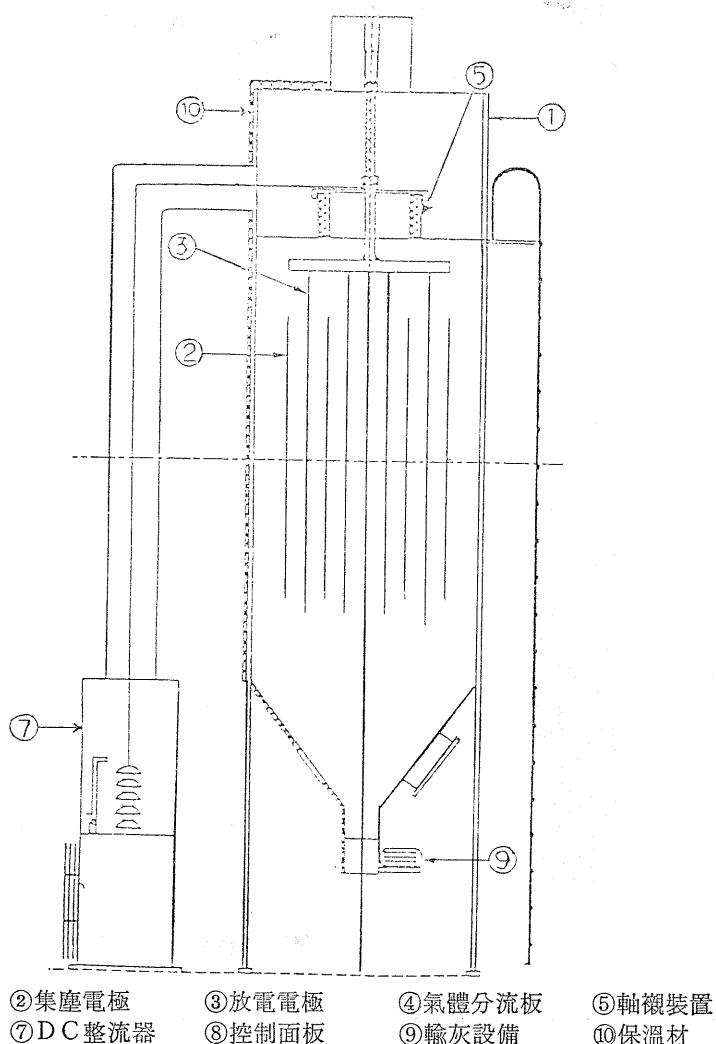
係採用可調變頻率，吸力之電磁感應線圈式。控制方法之改變可從快速振盪到間斷敲擊的不同情況，觀察各種敲擊頻率與強度對性能的影響。

(7) 透明視窗之設計

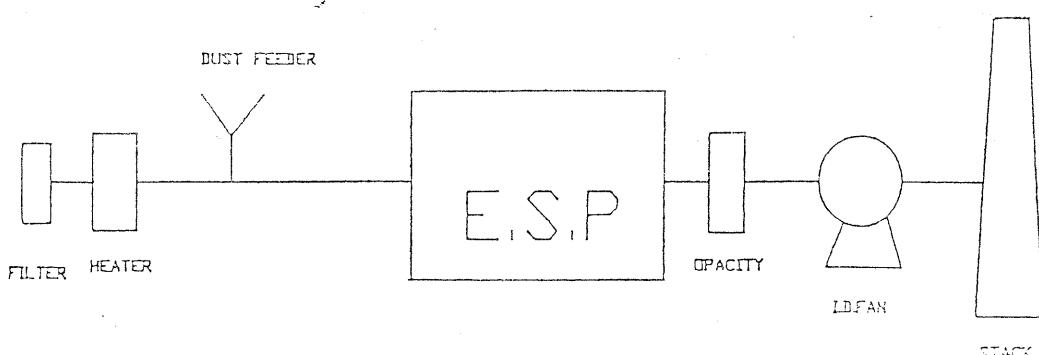
在集塵器頂部裝置透明視窗，可用以觀察並照相電暈分佈、火花（spark）及反電暈發生之情形。此外，本實驗廠所採用之間歇式供電方式以防止火花並有效節省電源的效果亦可經由視窗觀察得之。

伍、靜電集塵器實驗廠測試

靜電集塵器性能之測試，從操作、觀察至記錄，依分析之難易程度不同，可區分為三個



圖十三 本實驗用 E. P. 橫切側視極板空間設計



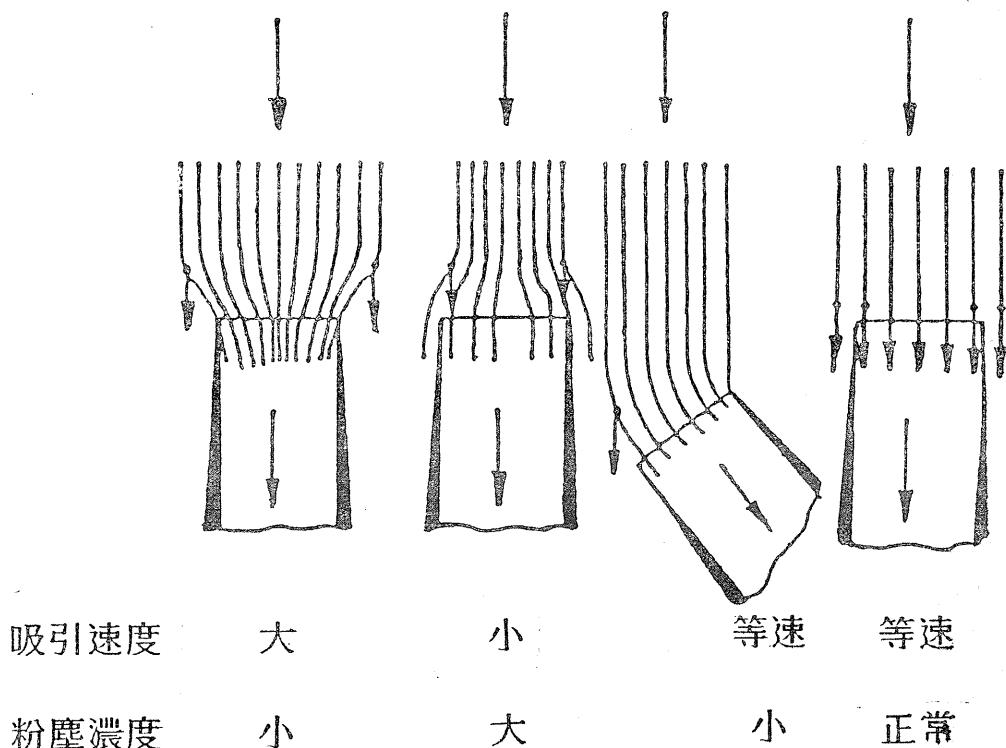
圖十四 採用人工瓦斯之流程圖

階段：

(1) 基本性能測試——包括下列五點：

1. 基本操作數據之獲取，由讀取操作現場資料，包括對集塵設備、電系、敲擊除灰等數據之記錄，並依照設計與操作規範計算。
2. 利用濁度計光學原理量取出口煙道氣濁度。
3. 塵粒電阻性分析；可分二種方式，溫度 200°C 以上採實驗式測試法測試至崩潰電壓發生前之 V-I 曲線；或採用現場測試法選用點面式 (point-to-point probe) 或圓筒式 (cyclone resistivity probe) 電阻量測儀測試。
4. 煙道氣定性分析；量取流率、溫度及組成性。
5. 使用敲擊系統下獲取再散逸之資料。

(2) 現場 (in-situ) 性能模擬測試——除包括第一階段之基本測試外，必須對現場之安裝、取樣設備，作詳細規劃並量取煙道氣作定量分析。為避免取樣之不正確性，必須利用等速吸引原理（如圖十五）。對採樣計的口徑、入口角度、分布採樣點及水氣之影響小心處理。量取平均時間段內之取樣值後，再進一步針對敲擊時濃度突增變化狀況加以研究。至於定量分析法可採用 ORSAT 法測 O_2 , N_2 , CO , CO_2 ；利用 EPA 法測 SO_2 , H_2SO_4 , NO_x , SO_3 等。



圖十五 吸引速度與粉塵濃度之關係

(3) 粒徑分佈之測試——除第二階段所有資料必須同時測試外，在 ESP 進出口處塵粒分佈作更進一步分析，如此，方可建立集塵效率計算之準確性，亦為研究集塵器設計準則之重要基礎。

考慮粒子分布分析，一般可選擇慣性法、光學法、電子式與擴散式等四種方式。在量測粒子大小分佈時，必須考慮控制流速、採樣限制區段、管徑、決定粒子篩選大小、水氣之影響、加熱之溫度控制，以及測取之時間選定。

陸、結論與未來空氣防治整合

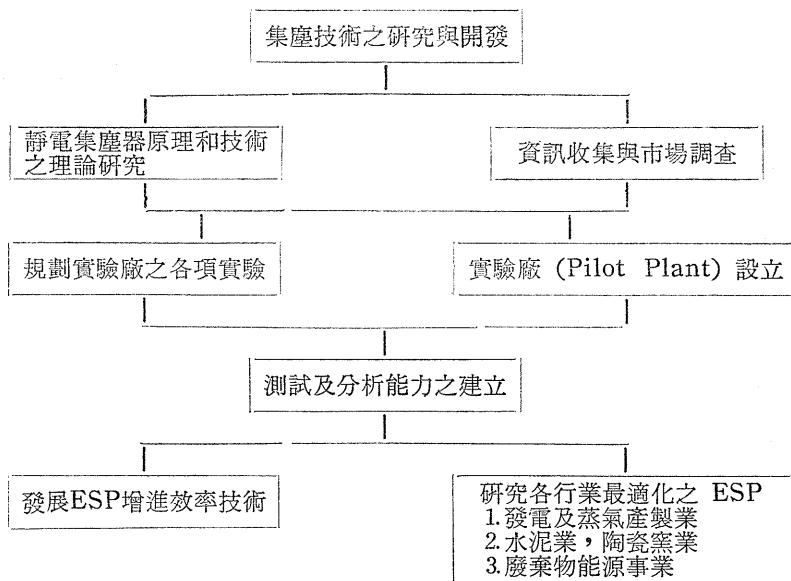
面對日趨嚴格之環保法規，工業界一方面須投資增添集塵設備，以符合粒狀物排放標準，另一方面也須對已存設備之操作，保養與維修能力加以提昇〔15〕、〔16〕。以臺電公司為例，其各火力發電廠為達成1993年之空氣污染排放標準，其靜電集塵設備需求數量將激增，如表（一）所示。

針對靜電集塵技術之研究開發，工研院提出全盤構想，如表（二）所列，自產業界調查訪問中建立當前燃煤工廠廢氣污染問題資訊，配合理論及技術研究，設計建造 ESP 實驗廠，期從實驗操作評估影響集塵效率性能重要之參數，由此所建立之設計技術與分析能力，希

表一、臺電火力電廠為符合1993年空氣污染物排放標準之探行方案

電廠及機組	粒狀污染物	二氧化硫	氮氧化物
*燃煤機組			
南部 #1 & 2	改換燒液化天然氣		
南部 #3	改換燒液化天然氣		
深澳 #1	新增靜電集塵器		
深澳 #2 & 3	配合脫硫系統改善	脫硫系統	燃燒改善
林口 #1	配合脫硫系統改善	脫硫系統	燃燒改善
林口 #2	SO ₂ 注入系統	低硫煤	
大林 #1 & 2	加大靜電集塵器或 SO ₃ 注入系統	低硫煤	燃燒改善
興達 #1 & 2	加大或新增靜電集塵器	脫硫系統	
林口 #3 & 4	加大靜電集塵器或 SO ₃ 注入系統	低硫煤	燃燒改善
*燃油機組			
大林 #3 & 4	新增靜電集塵器及焚化爐	不需改善	燃燒改善
大林 #5	改換燒液化天然氣		
協和 #1 & 2	新增靜電集塵器及焚化爐	不需改善	燃燒改善
協和 #3 & 4	新增靜電集塵器及焚化爐	不需改善	燃燒改善
通霄 1~3	改換燒液化天然氣及新增煙囪		
澎湖 1~8	不需改善	不需改善	催化式轉換器

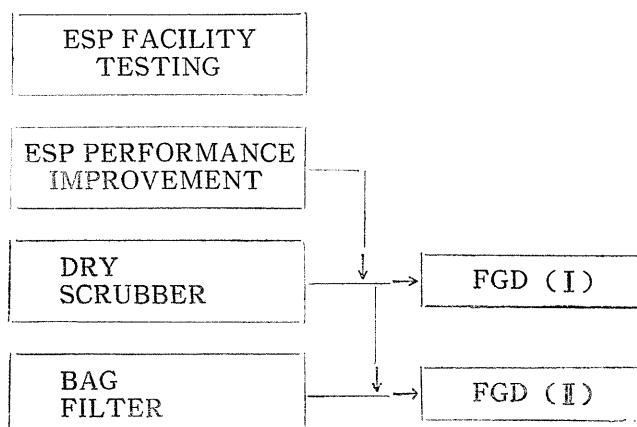
表二 全程構想規劃



冀對產業界，特別是發電鍋爐、水泥與陶瓷窯業和廢棄物焚化業之靜電集塵器規劃與性能改善有所裨益。迄本實驗廠發展完成，將成為國內集塵技術中心，並可將技術轉移民間，以落實本土化靜電集塵技術之目標。

從長程之空氣污染防治而言，煙道氣脫硫與除塵系統之整合已是時勢所趨。因此由本實驗廠建立之集塵技術能力，可再進一步配合乾式滌氣塔 (dry scrubber)，除可作除硫研究外，並可用以改變煙道氣之濕度與溫度，以控制適合靜電集塵器操作條件之範圍。工研院能礦所希望藉空氣污染防治技術之開發，如表三之構想，為正邁入已開發國家之林的我國提供良好之空氣品質環境。

表三 空氣污染技術之整合構想



染、參考文獻

1. 臺灣省政府公告「臺灣省固定污染源空氣污染物排放標準」中華民國七十五年八月十八日。
2. 張瑞進「乾式洗滌塔與電子光束整合以控制煙道氯除硫／硝之可行性評估」，工業污染防治期刊，民國77年10月。
3. Ramsdell, R.C., Proc. Am. Power Conf. 30, 129, 1968.
4. Graggs, J. M. and Meek, J. D., Electrical breakdown in gases, clarendon Press, Oxford, 1953.
5. Burton, C. L., and Smith, D. A., Precipitator Gas Flow Distribution, PA-650/2-75-016, Jan. 1975, pp191-217.
6. Theodore, L., Proc. Annu. Northeast Regional Antipollution Conf., July 1969, 89.
7. Dahlin, Robert S. and Gooch, J. P., A technical paper of Southern Research Institute, NO. DE-AC18-80FC10225.
8. Feldman, Land Kumar, K. S., A Technical Report of Research Cottrell.
9. P.L.Feldman/K.S.Kumar,"Enhanced Percipitation by pulse energization" Fine Particle Society 13th Annual Meeting Chicago, Illinois April. 1982.
10. Oglesby, S. and Nichols, G., A Manual of ESP Technology, Southern Research Institute, Brimingham, Alavama, Aug. 1; 970, 380.
11. Sigvard. M. "Pilot ESP Design", Workshop. EMRO. ITRI Hsinchu, Taiwan, Sep. 1988.
12. 陳錫金「臺電火力發電廠空氣污染防治之過去與未來」臺電公司環保處，化工技術與污染防治研討會論文，1988. 11.
13. J. L. Dubard/M. G. Faulkner, "Microcomputer programs for percipitator performance estimates" U. S. E. P. A Research Triangle Park, North Carolina 27711.
14. 楊柳村「ESP 性能的測試」空氣污染防治技術研討會論文集，78. 1.
15. Maartmann, S., "Proceedings of the Second International Clean Air Congress", Paper EN-34F, Academic Press, NY, 1971.
16. Federak Register, Vol. 36, No. 247, Dec. 23, 1971. pp24882-24890.