

流動床式石灰石粒煙道氣脫硫技術

李百芳* 周治雲**

一、前 言

如今酸雨已成為一全球性的共同問題，更進而促使各工業國對因燃燒所產生的二氧化硫之排放管制日趨嚴格。然而當今之煙道氣脫硫設備常因在投資費用太高，或技術太複雜，或除硫率不高等缺陷，而不易被業界接受。例如有的因須再處理廢水而造成所投資費用太高，如一般之濕式脫硫設備(wet scrubbing)；有的因機械設計精密複雜而使操作保養不易，如一般之半乾式脫硫設備(spray drying)；有的因脫硫率太低而無法被使用，如一般所謂之乾式設備。感於當今脫硫設備的技術，投資費用及除硫率均不能滿足市場的須求下，美國ETS公司特別於1982年起即著手研究開發最新的脫硫技術，歷經10年的努力已先後完成固定床式及流動床式的石灰石粒煙道氣脫硫設備(Limestone Emission Control)又簡稱LEC的示範場試驗，本文即針對LEC的研發經過及結果作一報告，並把LEC與當今各種脫硫技術作一概括性的經濟分析比較，俾使國人對此最經濟、簡易、且高除硫率的設備能有初步的認識。

二、原 理

石灰石粒煙道氣除硫系統，是利用一般道路級的石灰石粒當反應劑來去除燃煤鍋爐煙道氣內所含的二氧化硫(SO_2)的系統。LEC除硫的基本原理是讓熱煙道氣($<180^\circ\text{C}$)通過一反應槽，槽內裝有表面覆蓋一層水膜的石灰石粒，煙道氣中的二氧化硫在接觸到石灰石粒時即被石粒表面的水膜吸附，並迅速與溶於水膜的石灰石起化學反應。此反應結果將在石灰石表面產生一層硫酸鈣及亞硫酸鈣的反應生成物。

*友大工業公司工程師

**友大工業公司總經理

三、早期固定床式LEC的發展過程

3.1 源起

1970年代的初期美國能源部(the U.S. Department of Energy)即開始作實驗室規模的測試以研究利用乾石灰石來作煙道氣除硫的可行性。Shale和Stewart(1979)¹的研究結果證明石灰石的除硫率可相當長時間的保持在90%以上，而且反應過的石灰石可容易地利用輕度的攪動而予以再生。此研究結果獲得美國專利局第3976747號專利，名稱為「改良型的乾式石灰石煙道氣除硫方法」(Modified Dry Limestone Process for Control of Sulfur Dioxide Emissions)²。

3.2 初步結論

ETS公司從1982年中間開始進行LEC的研發工作。在1983年6月，ETS公司及美國環保局(EPA)認為LEC是一個簡易且低成本的煙道氣除硫系統。雙方並同意進行下列三項研究工作：

1. ETS進行一系列的實驗室規模的測試以印證基本的二氧化硫去除效果。結果證明其具有高於90%的去除率。
2. 環保局及電力研究院(IERL)要求田納西流域管理局(TVA)針對LEC作初步的經濟分析。其結果與ETS的分析結果相同，均證明了LEC的方法比半乾式除硫(spray drying)及濕式除硫(wet scrubbing system)有非常顯著的經濟利益。
3. 環保局及電力研究室本身並進行測試以證明ETS的實驗是否正確。雖然環保局及電力研究室的本身測試結果並沒有對外作正式發表，但ETS由環保局的測試結果得到二個顯著的結論：
 - (1)環保局的模擬氣體的測試充份印證了ETS利用真實氣體測試的結果，及Shale在能源部所發表的研究結果。
 - (2)石灰石雖可再生，但卻不像Shale及Stewart所發表的可輕易攪動即可再生，而是須要更強烈的研磨始可再生良好。

3.3 固定床實驗設計

在1986年的秋季美國俄亥俄州煤礦研究中心(Ohio Coal Development Office)撥款給俄亥俄大學(Ohio University)進行設計、裝設及操作一個固定床式LEC試驗場。此試驗場所處理的煙道氣為從俄亥俄大學的32,000kg/hr的燃煤蒸汽鍋爐的排氣接引出12ACMM的風量來處理。圖1表示固定床式LEC試驗場的流程圖。導出的煙道氣首先進入一噴水冷卻室以把煙道氣調理成所須要的溫度和濕度。其冷卻調理的方式是把霧狀的水噴入冷卻室，或是將蒸汽導入冷卻室。調理後的煙道氣被導入固定床式反應槽，由上而下與槽內的石灰石接觸。此固定床式反應槽內有一可移動式的容器，其尺寸是55cm²，而在

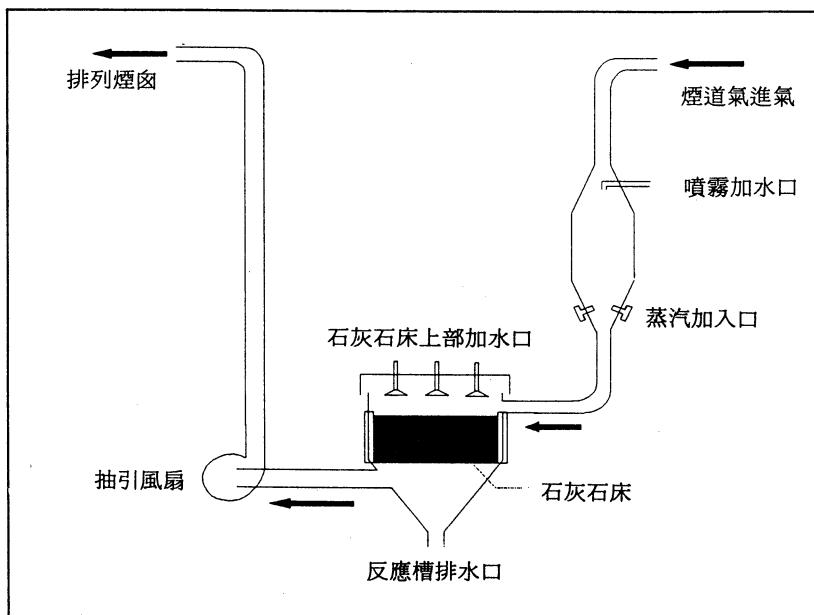


圖 1 固定床式 LEC 流程的示意圖

煙道氣進行的方向此容器可作 0~60cm的厚度改變。被處理過的煙道氣由反應槽的下方利用抽引風扇導出並送入排氣煙囗排出。

3.4 固定床實驗過程

從1987年的 5月28日到1987年的12月18日利用 LEC 固定床式的試驗場共進行了 100 多次的實驗。(Prudich et al. Appell 1988; Visneski, 1991)^{3,4,5}。在這些實驗裡共採用三種不同的俄亥俄州當地的石灰石。此三種石灰石可涵蓋俄亥俄州的各種石灰石組成。這些實驗主要是求證不同的石灰石床厚度，煙道氣通過石灰石床的速度、煙道氣的濕度、二氧化硫的濃度及溫度等對去除效果的影響。實驗結果證明所使用的三種石灰石都可達到高於90%的去除率。很多次試驗的去除率更高達99%。

這個固定床式的 LEC 試驗場證明其對於含二氧化硫濃度從 500~3,500ppm 都有很高的去除率。在一個15cm厚的石灰石床，進氣的二氧化硫濃度 700ppm，連續16小時其二氧化硫的去除率都可達90%以上。而24小時之後也可達50%以上的除硫率，如圖 2 所示。至於在3,500ppm的二氧化硫濃度，以15cm的石灰石床厚度也可持續 1個小時，維持90%以上的除硫率，而在 2小時之後可維持50%的除硫率。

3.5 固定床實驗結果

這些固定床式 LEC 的實驗歸納出二個影響固定床式 LEC 的操作的因素：

1. 石灰石表面的水膜會逐漸乾掉。
2. 反應過的生成物會在石灰石表面形成積層。

在LEC的反應過程，如果石灰石粒表面是乾燥的情形，石灰石將不具反應的效果。而石灰石粒表面的反應物積層也將降低反應速率，當積層達到相當厚度，石灰石甚至不具反應的能力。

二種方式可用來解決因石灰石表面乾燥而不能反應的問題。第一種是把煙道氣的濕度提高到過飽和的濕度以防止石灰石表面的水膜蒸發。另外一種方式是在石灰石床上頭不斷加水以保持石灰石床的濕潤。所加的水量必須等於或多於蒸發的量。

表面積層的情況是不能避免，但可藉由除去表面反應生成物的方式來克服。當因表面積層而失去反應能力的石灰石，其內部的石灰石其實仍具有反應能力。而這層表面積層可藉適度的攪動來去除。在這個小型的試驗場，表面積層的反應生成物可利用一攪拌式研磨機(stirred ball mill)予以去除。去除表面反應生成物的石灰石又可放回反應槽繼續反應。當表面積層又達到相當厚度而影響反應速率時，再取出予以攪動去除表面積層。如此反覆進行直到石灰石被完全反應為止。被再生過的石灰石其反應效率和完全未使用過的石灰石具有相同的二氧化硫去除率。

3.6 固定床實驗結果分析討論

在固定床式LEC的試驗場實驗採用了三種加水的方法。第一種是在試驗開始前先把石灰石床加水，也就是先倒入水於反應槽後再把反應槽封起來以進行試驗。用這種加水方式的反應槽其具反應能力的時間將依煙道氣濕度的高低而變化。煙道氣相對濕度越高，其具反應能力的時間越長。第二種方式是利用水蒸氣凝結的原理。由於石灰石床的溫度較煙道氣的溫度為低。當煙道氣碰到溫度較低的石床時，水蒸氣將會凝結在石灰石表面。其凝結的量將依煙道氣的濕度而定。當相對濕度較高時其凝結的量越多。凝結的量將隨著石灰石床的溫度升高而逐漸減少，最後並完全不凝結。當水蒸氣不再凝結後，石灰石床的反應能力將依煙道氣的濕度而定。第三種方式是把水直接噴在石灰石床上。參閱圖1，石灰石床上邊裝有噴嘴，如此石灰石床的反應能力將依所加水量及煙道氣的濕度而定。

圖3說明了，由於表面乾燥或表面積層而使反應能力降低的情況。第870714A¹，870716A，870716B，870717A，870720A及870720B的試驗代表了利用同樣厚度(30cm)的石灰石床所進行的連續試驗。其中煙道氣通過石灰石床的速度保持一定，但二氧化硫的濃度則在620~870ppm之間變化。煙道氣的相對濕度約在50%，但每次試驗均不同。二氧化硫濃度及煙道氣相對濕度的變化是由於煙道氣本身的變化。第870714A¹是先把石灰石床加水後再開始試驗，在1.5小時之後反應能力幾乎降到沒有。於是把反應槽弄濕之後再開始870716A的試驗。結果顯示除硫率又回復到剛開始的狀況。再經一段時間後，由於表面乾燥的原因，除硫率又逐漸下降。如此地把反應槽濕潤的方式又繼續進行四次試驗，直到第870717A的試驗，反應槽雖被濕潤也無法再回復其原來的反應能力。此時反應能力的降低可歸因於反應生成物在表面產生一層積層而阻礙反應的進行。

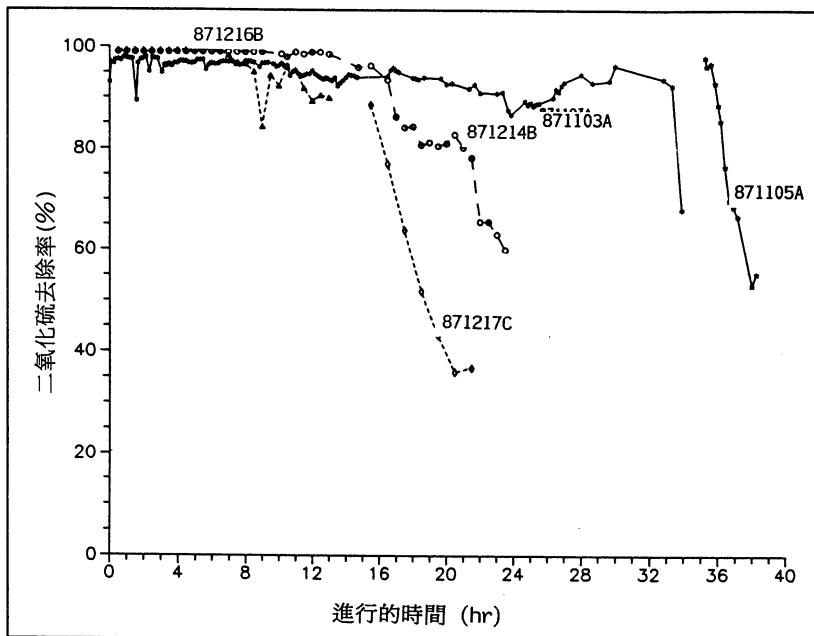


圖 2 固定床式 LEC 的實驗結果

(煙道氣持續進入固定床式反應槽。在石灰石粒表面有反應生成物的積層後，反應便逐漸失去反應能力。[由Prudich等(1988)所作的實驗結果。石灰石床厚15cm，煙道氣通過的速度為0.3m/s)

圖 2 說明了單獨由於表面積層的影響而使反應能力降低的情形。此數據說明了 3 個不同的 15cm 厚的石灰石床的反應情形。這些實驗都把煙道氣的濕度增加到飽和濕度以上，因此石灰石床的乾燥與否並不影響反應除硫率的因素。實驗第 871217C 是實驗 871216B 的繼續，而且用的是同一個石灰石床。實驗 871105A 是實驗 871103A 的延續，而且用的是同一個石灰石床。從圖 2 可看出石灰石床在不同的時間裡失去其反應能力。石灰石床的壽命是和二氧化硫濃度與煙道氣流量的乘積成反比。第 871103A 及 871105A 在 344ppm 的二氧化硫濃度的煙道氣情況下，其反應能力維持最久。其次是第 871214B 在 702ppm 的二氧化硫濃度的煙道氣的情況下的實驗。第 871216B 及第 871217C 的實驗在二氧化硫濃度 736ppm 的情況下其反應能力持續時間最短。在以上三組試驗煙道氣的進氣量都保持一定。

四、流動床式 LEC 的技術討論

4.1 流動床式 LEC 之流程說明

為了進一步解決固定床式 LEC 的二個基本問題：保持石灰石表面的水膜及再生有反應生成物表面積層的石灰石，一個連續流動床式的 LEC 示範場被安裝在俄亥俄大學的蒸汽鍋爐場。此連續流動床所處理的煙道氣是從 32,000kg/hr 鍋爐排氣接引出 140ACMM 的風量來處理。圖 4 表示了此流動床式 LEC 的簡易流程圖。圖 5 表示此一流動床式 LEC 的詳細流程圖。石灰石粒藉一箕式輸送機由反應槽頂部加入。箕式輸送機的石頭來自主進料斗

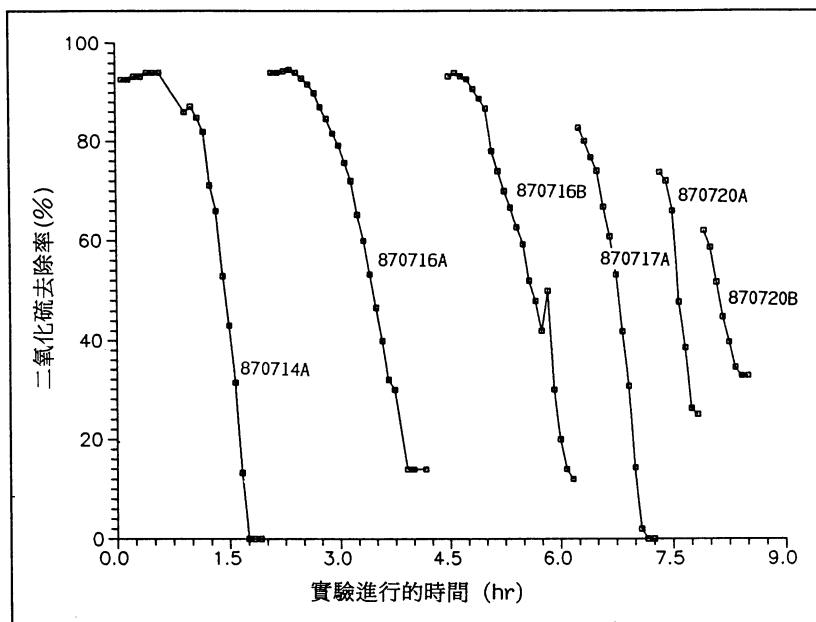


圖 3 石灰石床反應能力降低之情況

(由於石灰石表面乾燥，或表面有反應生成物之積層，而使石灰石床的反應能力降低 [由Prudich等所作的實驗(1988)，使用30cm厚的石灰石床，煙道氣通過的速度為0.3m/s])

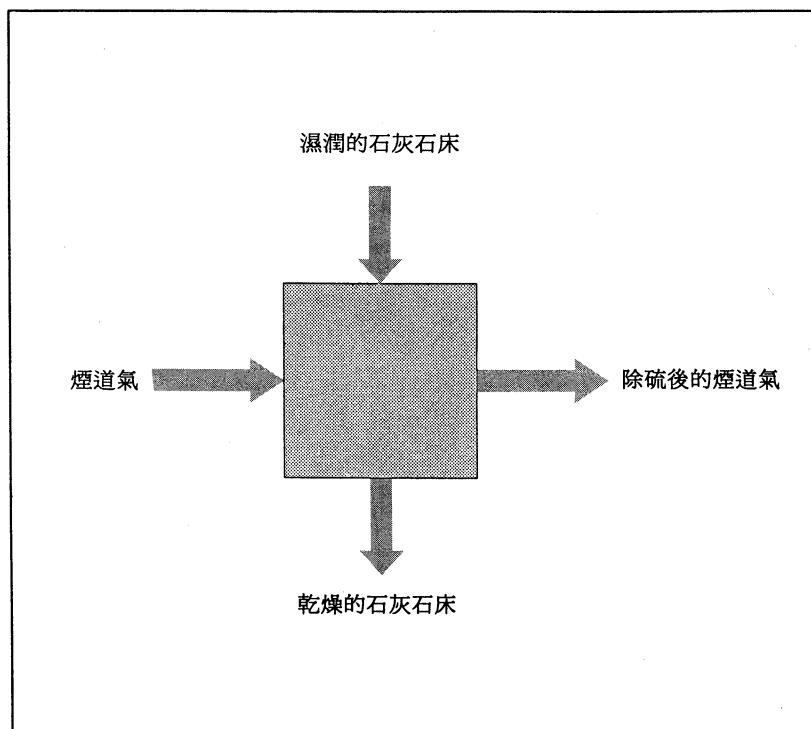


圖 4 流動床式LEC的簡易流程圖

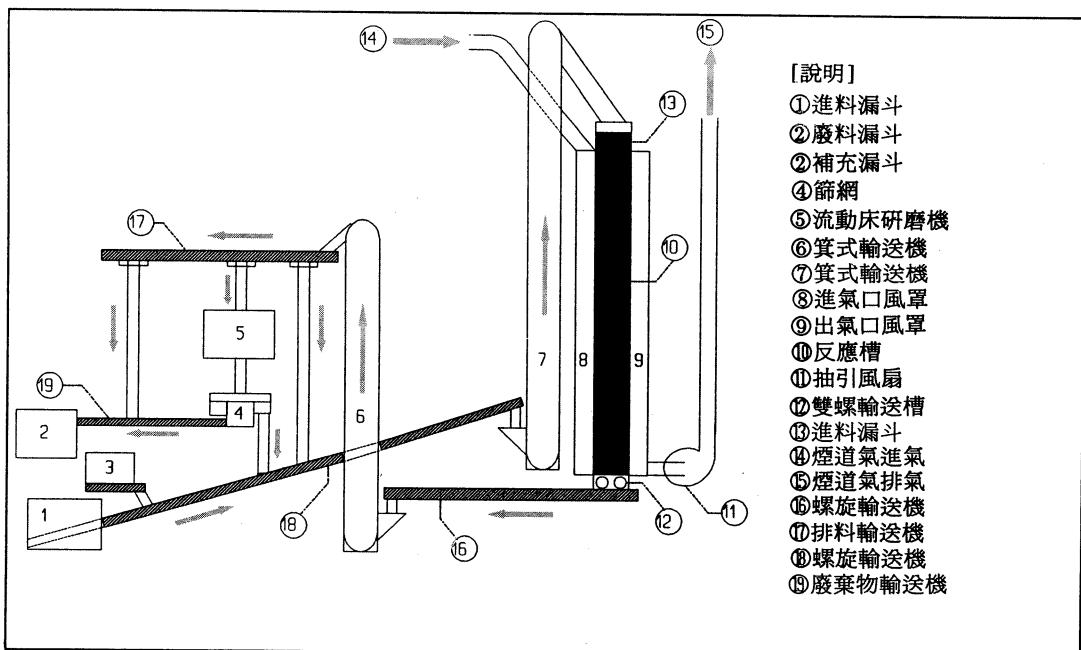


圖 5 流動床式 LEC 的流程圖

、補充進料斗、及再生料進料斗。補充進料斗是補充因反應後所損失的石灰石。反應槽的尺寸是35cm×90cm×325cm（請參閱圖6）。反應槽的內部包括進氣口百葉板，出氣口百葉板，噴水口及出氣口篩網。反應槽的前後則加裝進氣口及出氣口風罩，再與風管相接。進氣口風罩並具導流功能，使進入反應槽的煙道氣能平均分佈到整個石灰石床。煙道氣藉一抽氣風扇將氣體從一靜電集塵器抽出，導入反應槽後再送至排氣煙囪排出。

石灰石粒由上而下垂直流入反應槽。由反應槽底部排出的石灰石被送到一箕式輸送機後再進入一排料螺旋輸送機。這一排料輸送機有三個出口。第一個出口可將石灰石直接導入再生後石灰石進料斜槽，再進入進料輸送機後被送回反應槽。第二個出口是將反應過的石灰石粒導入再生系統。此石灰石再生系統是將石灰石表面積層的反應生成物以濕式或乾式的再生方法除去表面積層後再送入一振動篩網分離出可再反應的石灰石粒及反應生成物。可再反應的石灰石粒再被導入進料螺旋輸送器以便送回反應槽頂部。第三個出口是將反應過的石灰石直接送到廢棄物漏斗。LEC在正常的操作情況下是將反應過的石灰石導入石灰石再生系統。

4.2 實驗結果分析

4.2.1 流動床式 LEC 初期的實驗結果

流動床式 LEC 的示範場從1991年 5月 29日到1991年 7月 25日總共做了30次的實驗。每一次的實驗時間約為30分鐘到 290分鐘。實驗的主要目的是證明除硫率與下列變數的關係：

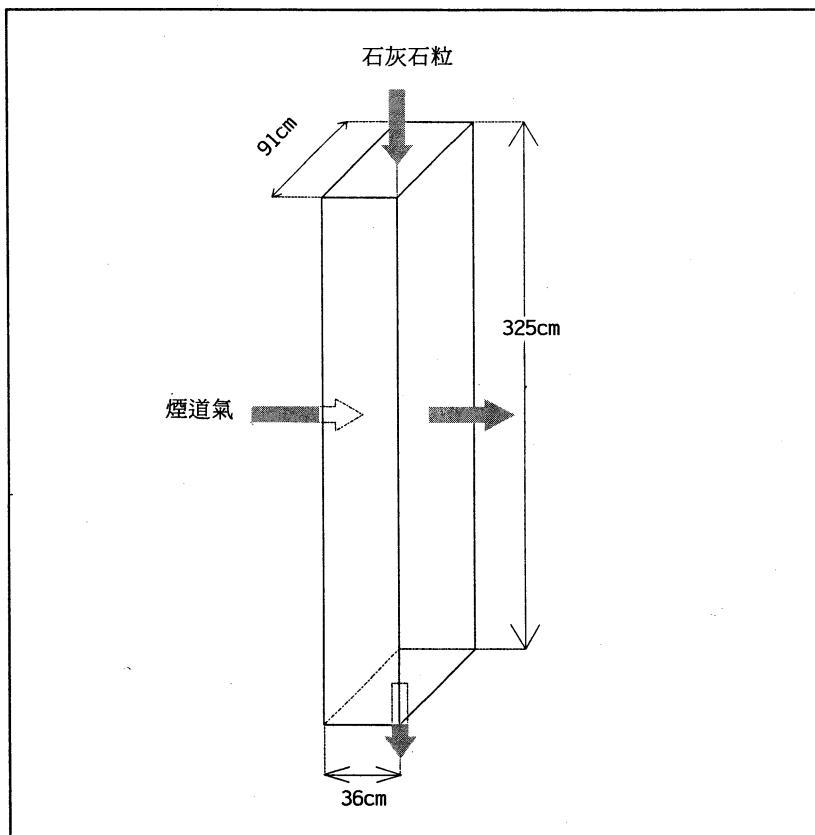


圖 6 流動床式 LEC 的反應槽尺寸

1. 煙道氣通過石灰石床的速度。
2. 石灰石床流動的速度。
3. 煙道氣進氣的含硫濃度。
4. 加水量及其方法。

反應機構裡二氧化硫與碳酸鈣的反應須有水當介質。因此為了促進反應之發生，石灰石粒表面須有一層水膜。另一方面為了方便石灰石的再生及廢棄物的處理，也希望 LEC 的操作能使石灰石粒在排出反應槽時，其表面能夠達到乾燥的情況。為了達到以上二個要求 LEC 的操作須予以控制以使石灰石床的乾濕分佈情況如附圖 7 所示⁸。從圖中可看出越接近反應槽底部其濕潤部份越趨近於零。雖然這種情況會造成越接近石灰石床底部的除硫率會越低，但就整體除硫率而言還是可達到非常高的除硫率，因為石灰石床上部及中部可有非常的高除硫效率。

直到目前的實驗結果均證明流動床式 LEC 的除硫率均超過 90%，而且經常超過 99%。三個實驗 (910723A, 910724A, 910725A) 以煙道氣二氧化硫的濃度為 1,000ppm 的實驗結果請參閱圖 8 ~ 10。這些圖又顯示在進行這些實驗時由於機械上的一些問題而使實驗不

能作長期的運轉。此機械問題是由於流動床式LEC的出氣口百葉板是唯一用來阻擋石灰石留在反應槽的設計。但此百葉板的設計並不能滿足原先設計的構想，而造成石灰石粒在運轉時會被吸出反應槽並進入出口風罩及抽引風扇。為了防止石灰石被吸出反應槽及為了保護抽引風扇，特別在反應槽出口之百葉板前加了一過濾網。如此一來石灰石已不被吸出反應槽，但卻產生了另一問題，即細粉容易積在過濾網而造成通過反應槽的壓降損升高。而且過濾網的阻塞情形以反應槽上部最嚴重，而此部份也是反應效率最好的部份，通過反應槽的煙道氣由於反應槽上部阻塞而大部份的風量轉由反應槽下部通過，而反應槽下部其反應效率較低。因此在過濾網逐漸被細粉阻塞後，容易產生壓降損升高，除硫率下降，及煙道氣流量降低。這種現象可明顯的由圖8、9、10看出。

為了解決這個機械問題，出口百葉板及出口風罩經過重新設計，並在1991年9~12月的停機時間依新設計作實體上的修改。新的百葉板在每片百葉板間有9cm的重疊處，新舊之間的差別請參閱圖11。在1992年2月的實驗中已證明了此一新的百葉板設計已大大降低石灰石被吸出反應槽的量。

另外實驗中又發現石灰石粒在石灰石床內往下移動時亦產生相當顯著的相互磨擦的現象，而此相互摩擦就可使反應過的石灰石有再生的功能。因此圖5內的第5項元件，流動床式研磨機可被省略。

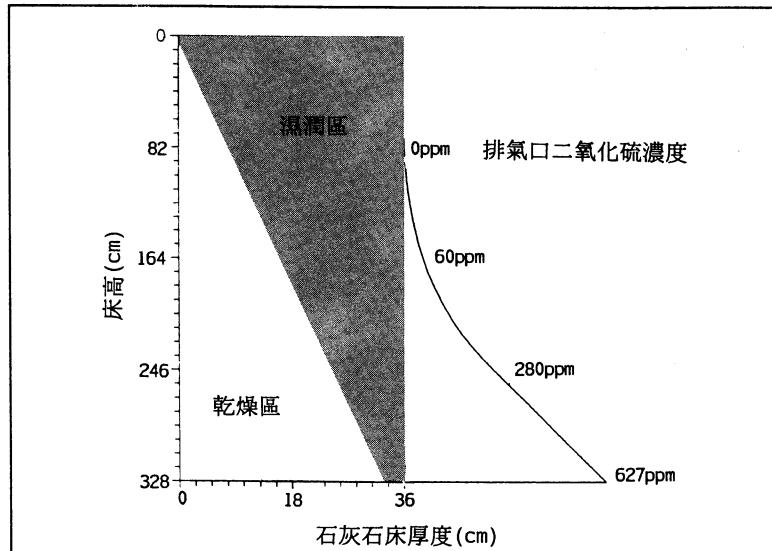


圖7 排氣口二氧化硫濃度與乾燥區分佈情況之相對關係

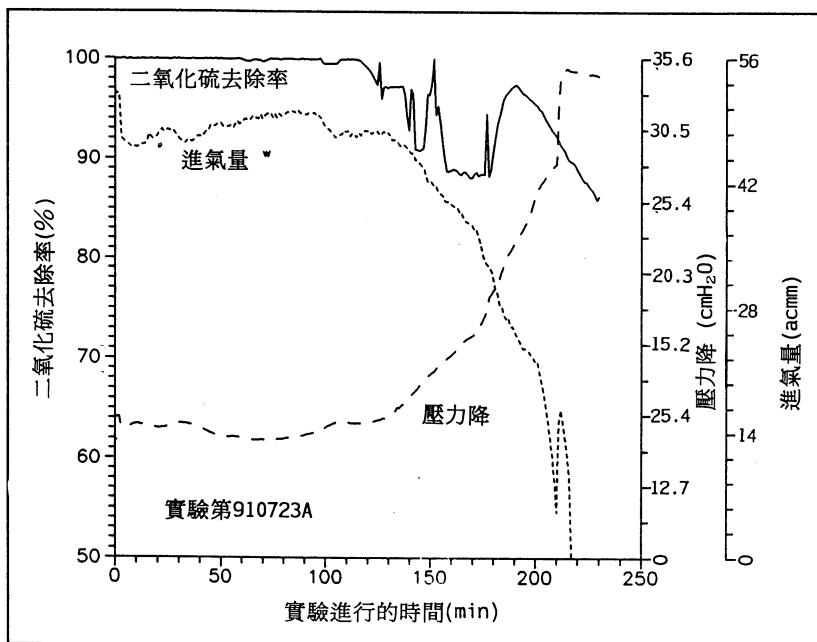


圖 8 流動式床 LEC 的實驗結果
(第910723A實驗記錄)

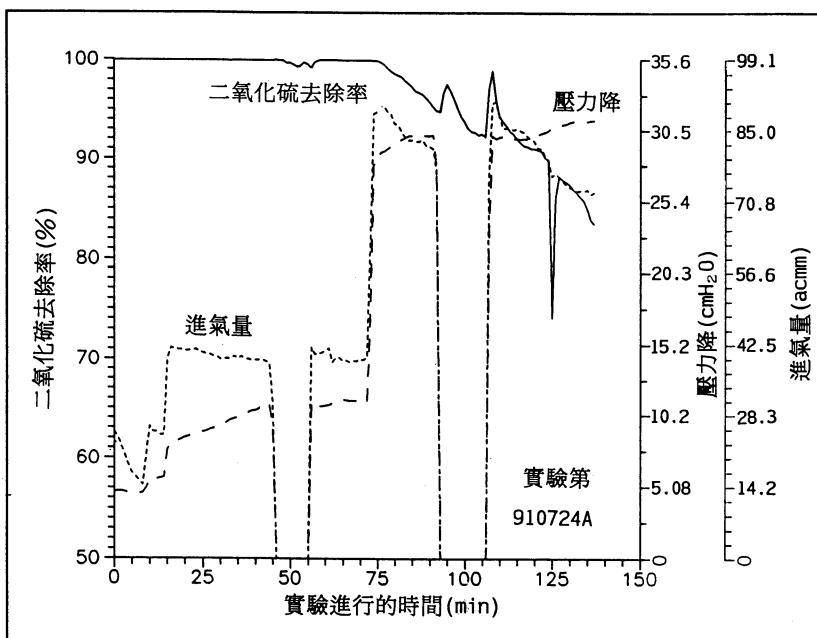


圖 9 流動床式 LEC 實驗結果
(第910724A實驗記錄)

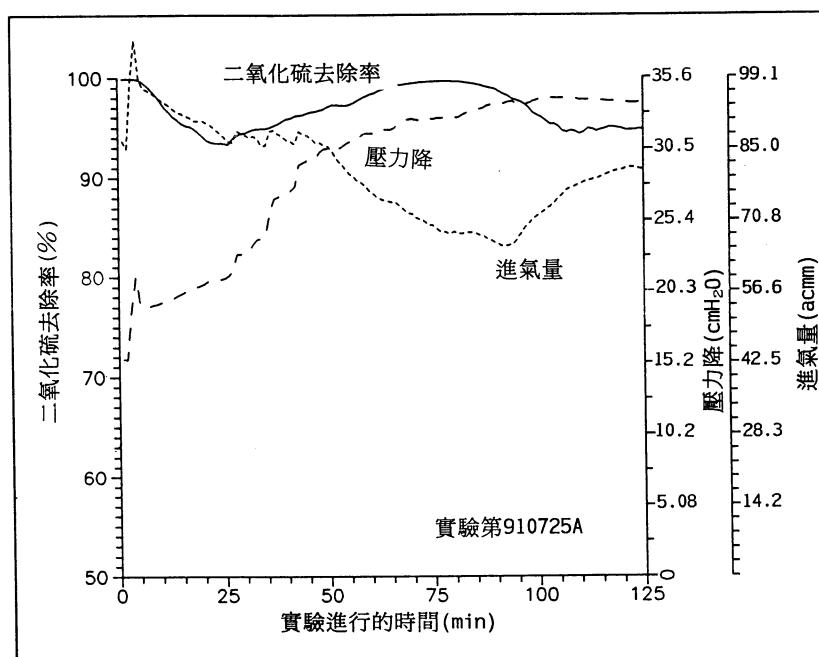


圖10 流動床式LEC的實驗結果
(實驗第910725A)

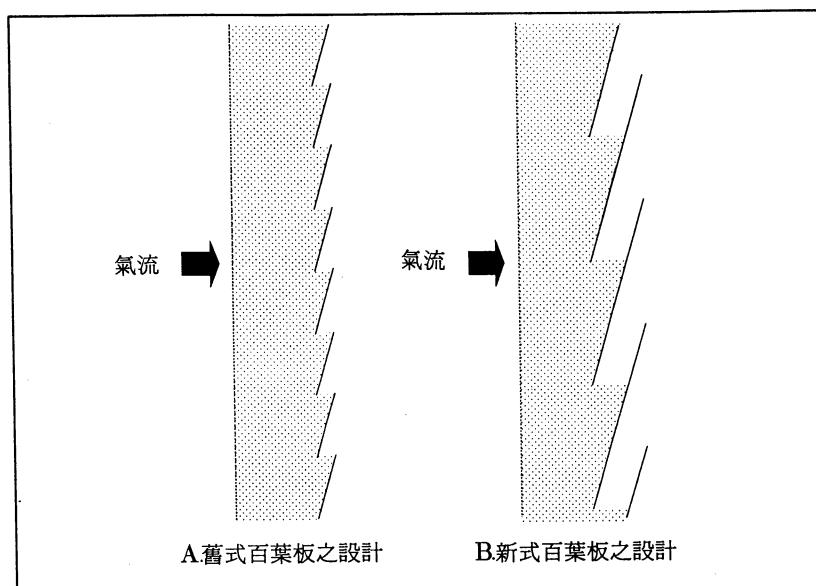


圖11 流動床式新舊百葉板之設計

4.2.2 加大百葉板後之實驗結果

從1992年5月5日到1992年11月24日共進行了約60次的實驗。實驗的進行時間最長會達到134小時以上。這些實驗是探討二氧化硫去除率，反應槽壓損，及被吸出之石灰石與下列主要變數的關係：

- (1)平均石灰石粒的大小。
- (2)煙道氣通過反應槽的速度。
- (3)進氣煙道氣二氧化硫的濃度。
- (4)加水的位置。

1. 石灰石粒徑大小的影響

在這一階段的實驗裡共有四種粒徑的石灰石被試驗，這四種石灰石粒的粒徑如下：

- (1) AASHTO 9號石一粒徑0.25cm。
- (2) AASHTO 8號石一粒徑0.71cm。
- (3) 50/50 9號與8號石一粒徑0.51cm。
- (4) AASHTO 9號石用8號網預先篩過一粒徑0.30cm。

實驗結果顯示9號石因粒徑最小，故有最多的總反應表面積，所以除硫效率最高。但由於粒徑最小也最容易被通過的煙道氣帶出。當通過反應槽的煙道氣大到一定速度時(0.22m/s)，被帶出的石灰石的量亦顯著增加。當使用8號石時由於粒徑增大很多所以從百葉板被帶出的石灰石量就明顯下降。即使風速達到 0.36m/s 被帶出的量仍不多，由於被帶出的石灰石量減少，故實驗也能長時間的被進行請參閱圖12。實驗第920430連續操作了134小時，其平均除硫率達到85%。而實驗第920601及第920602亦使用8號石，但煙道氣通過反應槽的風速較低(9cm/s)，並只使用石灰石床上所凝結的水份，結果其除硫率僅有40%。從以上的數據歸納出當石灰石粒徑增加時其除硫效率明顯下降。雖然大粒徑的石灰石粒較不易被帶出出氣口的百葉板，但由於其總反應表面積減少所造成的低除硫率，在實際應用上較不合適。

接下去的實驗是想在減少石灰石被帶出百葉板的量下又得到90%以上的除硫率而採用50/50 8號石和9號石的混合。實驗第920604及第920605的結果顯示使用此混合的石灰石其平均除硫率比單單使用8號石的除硫率增加約10%。但石灰石被帶出百葉板的量卻與單單使用9號石的量一樣。因此混合8號石及9號石的結果導致最高的百葉板石灰石被帶出量及相當低的除硫率。

第四種實驗是利用經過8號篩網篩選過的9號石以除去9號石中的粉末來當作反應吸附劑，藉以達到高除硫率而低百葉板石灰石被帶出率的目的。這個實驗是依較小的粒徑的石灰石粉粒將較容易被帶出百葉板為假設前提。因此把9號石中40%較小粒徑的石灰石先行篩離，將可增加剩下較大9號石的終端速度而較不容易被帶出百葉板，而同時又可比使用8號石有較大的總反應面積。實驗第920810，920811及920812是使用被篩選過的9號石，其結果是被帶出百葉板的量比單用9號石的實驗一樣，但除硫率卻低於90%。

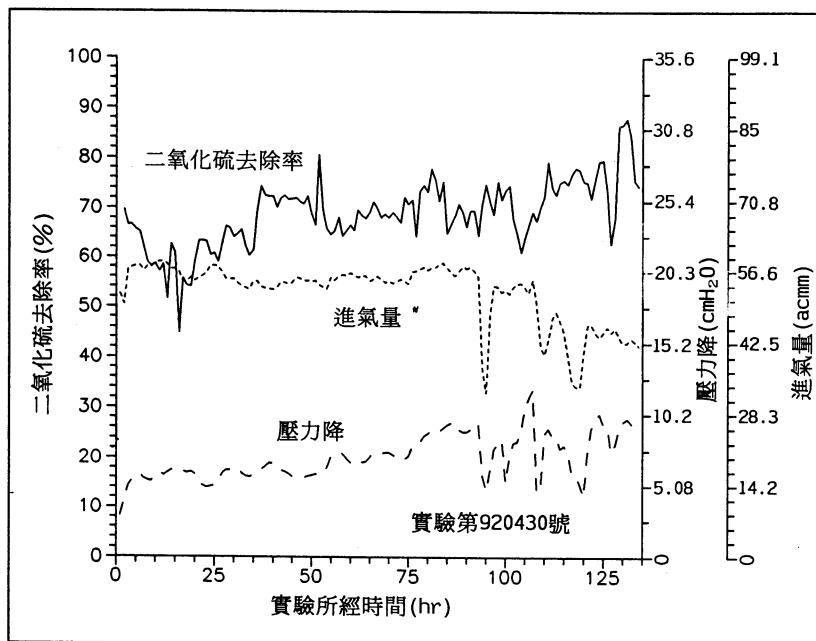


圖12 長時間流動床式LEC的實驗結果
(使用8號石，實驗第920430)

由以上利用四種不同粒徑石灰石的實驗歸納出：利用改變石頭粒徑的方法而想找出最適當的石灰石粒徑以達到高的除硫率，但卻可減少石灰石粒被帶出百葉板的量的構想是行不通的。要解決石灰石被帶出百葉板的問題要靠機械設計來解決。

2. 煙道氣通過反應槽速度的效應

煙道氣通過反應槽的速度對以下三個變數產生影響：

- (1) 反應原理。
- (2) 石灰石粒被帶出百葉板。
- (3) 通過反應槽的壓力降。

關於LEC系統的化學反應動力與煙道氣通過反應槽速度的關係，Visneski⁵ 和 Reddy⁶ 已經作過多方面的研究。而他們所歸納出的原理原則也由此流動床式LEC的實驗予以驗證確認。

關於石灰石粒被帶出百葉板由實驗結果得知當煙道氣通過反應槽的速度如果超過 0.23m/s 時，對於使用 9 號石當反應劑將會造成過量的石灰石粒被帶出百葉板。這個流動現象被認定是發生在出氣口百葉板間的孔隙，因為煙道氣在通過百葉板間的孔隙時，其速度變成了二倍之多。如果使用的是 8 號石，則煙道氣通過反應槽的速度可以高到 0.36m/s 而仍不見過量的石灰石被帶出百葉板。

反應槽所造成的壓力降是和煙道氣通過反應槽的速度的二次方成正比。而且可用尤根公式(Ergon equation)來計算。這一現象可由實驗第921020來驗證，當煙道氣通

過反應槽的速度在 0.09m/s 時，通過反應槽的壓力降低於 5.08cm 的水柱高。圖13說明了在接近 26 小時的運轉時，煙道氣通過反應槽的速度增加為 0.14m/s ，其通過反應槽的壓力降約為 17.78cm 水柱高。

石灰石床的阻象，如石如石灰石粒間空隙的阻塞或是百葉板的阻塞都會影響反應槽的壓力降。圖14（實驗第921117及第921118）可看出在約 30 小時的實驗中煙道氣流量開始降低而反應槽壓力降同時間升高的現象。此現象是由於出口百葉板阻塞造成的。

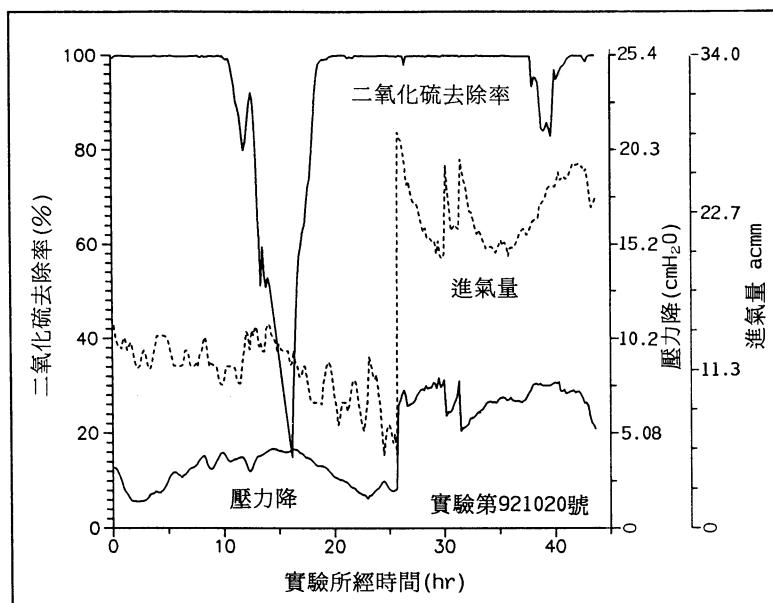


圖13 進氣量與壓力降的關係
(第921020實驗，平均二氧化硫濃度是500ppmdv)

3. 進氣煙道氣二氧化硫濃度的影響

所有 LEC 示範場的實驗，其進氣都是由俄亥俄大學蒸汽鍋爐場燃煤鍋爐廢氣所接引出的實際煙道氣。此燃燒鍋爐是燃燒含 2% 硫的煤。因此大部份實驗所處理的煙道氣其二氧化硫濃度在進入反應槽時是少於 1500 ppmdv 。為了模擬一電廠使用鍋爐燃燒 3.5% 含硫量煤的情況，實驗中在反應槽進氣口注入裝於可移動鋼瓶的 99.8% 濃度的二氧化硫。利用注入高濃度的二氧化硫的方法，實驗第920716第920718及第920719其進氣之二氧化硫的濃度高於 $3,000\text{ppmdv}$ （請參考圖15）。此三次實驗結果顯示二氧化硫的突破曲線是在全濕的 36cm 的石灰石床之內。為了得知在含高濃度二氧化硫的進氣煙道氣與石灰石床濕潤部份的大小關係，在第 4 第 6 及第 11 小時的時候三度把石灰石床的濕潤部份減少。從圖15中可看出當石灰石床的濕潤區域減少時，除硫率顯著的下降。這表示二氧化硫的突破曲線是座落在石灰石床的出氣口部份，即使煙道氣的通過速度在 0.09m/s 的慢速情況。因此在煙道氣含二氧化硫濃度較高時，良好的加水位置對確保石灰石有最大的濕潤區域是很重要的。如果在實際的商業運用裡，煙道氣的二氧化硫濃度偏高時，則採用比 35.6cm 還要厚的石灰石床是較好的。

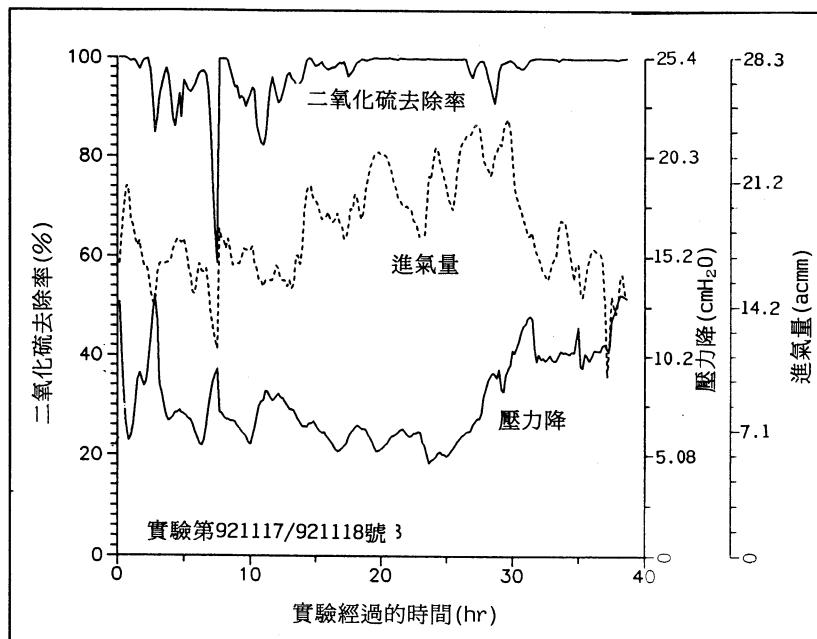


圖14 流動床式LEC的實驗結果

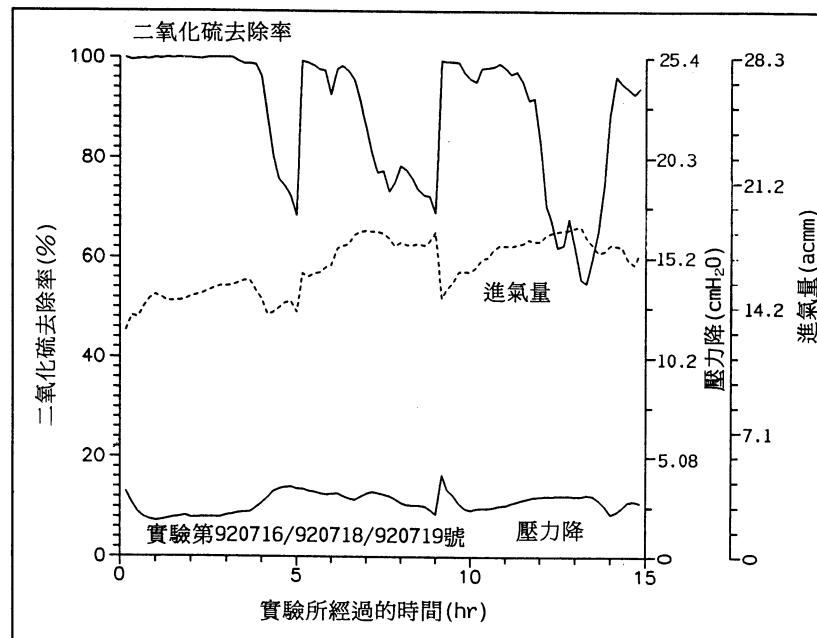


圖15 含高濃度二氧化硫的實驗

(流動床式第920716, 920718及920719實驗)

4. 加水位置的選擇

最先的設計裡，噴水的位置是在石灰石床的最頂部。實驗結果顯示在石灰石床最上部所加的水在未能對除硫率有貢獻時已在石灰石床的上半部被氣體帶走。為了改善這個問題，二個噴嘴被裝在進口風罩靠近最高的百葉板的地方。這個改良使水份能濕潤整個石灰石床，以減少多餘的水份被帶出出氣百葉板而進入出氣風罩。而且此改良可減少液態的水被帶出到出氣風罩，而減少能夠達到足夠濕潤部份所須的用水量。此新的噴水位置又因可用較少的水量而可避免有太厚水膜的區域。如果在石灰石床上部份有太厚水膜的區域將使煙道氣流向石灰石床下部份較乾燥且較不具反應能力的區域以通過反應槽。此影響煙道氣流向的結果，將因潮濕的有效反應地區的減少及有效的氣體反應接觸時間的減少，而使除硫率降低。另外亦造成較大的壓力降。因此改變噴水的位置並減少用水量將可使石灰石床有較平均且較薄水膜的分佈。如此可減少煙道氣流方向並增加整體的反應能力。

4.3 結論

流動床式LEC 的示範場試驗，已證明LEC 是一高性能的煙道氣脫硫設備。在進氣煙道氣二氧化硫濃度高達3,000ppmdv的情況下，LEC 仍可長時間的保持99.9%的除硫率，這些成功的實驗可證明LEC 在化學原理上是有效的。

機械上的困難，例如石灰石粒被帶出百葉板及阻塞了過濾篩網等，使LEC 的長時間運轉產生困難。在1991年 9月到12月停機時間所作的出氣口百葉板的改良，已使這些機械上的困難解除。而關於煙道氣除硫設備的商業運轉，因不在本文之範圍，將另為文加以介紹。

五、LEC市場分析及經濟上的比較

由於日趨嚴格的二氧化硫排放標準，發電廠及工業上的煙道氣除硫設備的競爭將會日漸激烈。到1996年時全球每年的煙道氣除硫設備的市場將達70億美元的規模。對於一個新發展的煙道氣除硫系統必須比市場上已經有的煙道氣除硫系統具有以下四個優點才能在市場上具競爭力：

- (1) 產生乾的反應廢棄物。
- (2) 利用石灰石當主要反應劑。
- (3) 整體上機械須簡易。
- (4) 經濟有效的利用反應劑就可達到高的除硫率。

LEC 具備了上列四個競爭優點，而且可裝在新設的電廠或工業用鍋爐，或是現有電廠及工業鍋爐的新設或改良的除硫設備。

5.1 流動床式LEC的經濟利益分析

5.1.1 比較的背景基礎

LEC 與傳統的濕式除硫系統的共同比較基礎是把除硫設備用來處理一 500MW電廠靜

電集塵器所排出的煙道氣為基準。LEC 的設備項目是把依現有的示範場的LEC 放大成一500 MW的處理量的LEC 。而濕式除硫系統的設備項目是依據美國電力研究協會(EPRI)的技術報告所載的項目為準。LEC 及濕式除硫設備的設備費用均是依據經驗估計圖所估計而得。

比較結果顯示LEC 比傳統的濕式除硫系統不論在設備成本或操作成本都有絕對的經濟利益。LEC 的設備成本US\$12,290,000,比起濕式除硫系統的成本US\$23,534,000,可省下48%。在吸收塔部份LEC 因為較簡單的機械設計所以可省下46%的成本。在操作成本方面，由於LEC 不須使用液態或泥漿式的反應劑，而使用較少的水量，所以操作成本也大大降低。而且因為LEC 只用乾式反應劑，其電力消耗將比須用濕式反應劑的濕式除硫系統要更經濟。表1 詳列了各個階段的設備成本及操作成本的比較。除了ETS 自己作的比較分析多，美國田納西流域管理局(TVA)，美國能源部(United Status Department of Energy) 及Babcock & Wilcox 等具公信力的官方機構或大型私人機構也都作了類似的比較分析。表2 也列出了以除去每噸二氧化硫所須費用為基礎把LEC 和其他四種除硫設備作比較。

表1 LEC和一濕式除硫設備的經濟分析比較表

| 使 用 原 料 及 耗 材 | LEC | 濕式除硫設備 |
|------------------------|---------|---------|
| 石灰石(tons/hr) | 32.7 | 33.5 |
| 水(gpm) | 249 | 710 |
| 蒸汽(kg/hr) | 100,788 | 100,788 |
| 所須電力(hp) | 8,769 | 13,058 |
| 產生之廢料(tons/hr) | 86 | 130 |
| 設備成本-US\$1000(1989) | | |
| 反應原料之處理之設備 | 1,316 | 1,486 |
| 進料準備之設備 | 0 | 1,805 |
| 集體處理之設備 | 3,897 | 3,326 |
| 二氧化硫吸收反應之設備 | 3,716 | 11,690 |
| 氣體再加溫之設備 | 2,524 | 2,524 |
| 廢棄物之處理設備 | 837 | 2,703 |
| 總設備成本 | 12,290 | 23,534 |
| 每年之操作成本US\$1,000(1989) | | |
| 總操作及保養成本 | 24,445 | 34,349 |
| 總成本 | 27,872 | 40,601 |

[註] 此以500MW發電量之燃煤鍋爐為基礎

表 2 每 1 噸二氧化硫去除之成本分析比較表

單位：美元

| 發電量 (MW) | 現有之脫硫設備 | | | | |
|-------------|---------|-----------------------|----------------------|-----------------|---------------------|
| | LEC | Limestone Scrubber | Lime Spray Drying | Wellman Lord | Lime Dual Alkali |
| 100 MW | 442 | 736 | 620 | 752 | 659 |
| 350 MW | 317 | 521 | 510 | 499 | 506 |
| 500 MW | 296 | 480 | 487 | 448 | 475 |
| 750 MW | 277 | 439 | 463 | 339 | 444 |

[註] 此以燃燒4%含硫量的煤為基準

與 Noxso (註 1) 及 NaTech (註 2) 的技術比較起來，LEC 具有下列的競爭優勢：

- (1) 系統的尺寸比 Noxso 較小。
- (2) 系統設計及系統操作均較 Noxso 簡單。
- (3) 由於 LEC 不產生有毒廢棄物而 NaTech 的系統會產生有毒廢棄物，所以 LEC 比 NaTech 的系統有較低的廢棄物處理成本。
- (4) LEC 比 Noxso 更容易被加在舊廠的新裝或改裝的使用。
- (5) LEC 所用的石灰石比 NaTech 的 Nahcolite 更容易取得。
- (6) LEC 的石灰石反應劑每噸只須 US\$15 元，而 Nahcolite 則每噸須 US\$220 的成本。

[註 1] Noxso 是美國 Noxso 公司所擁有的專利技術。Noxso 的處理過程是一流動床式的技術，利用粒狀物的吸收劑以去除煙道氣中 90% 以上的 SO_x 及 70% 以上的 NO_x。使用粒狀吸收劑是把有孔隙的氧化鋁 (Al₂O₃) 粒子浸泡碳酸鈉 (Sodium Carbonate) [Na₂CO₃ · H₂O] 而得。此吸收劑由美國 W.R. Grace 公司所生產，其成本 US\$3/lb (US\$6,000/ton)。其處理流程如圖 16。

[註 2] NATECH PROCESS 是屬於美國 NATECH RESOURCES INC. 的專利技術。NATECH 的處理過程是把碳酸鈉注入煙道氣中的除硫技術。吸收劑與煙道氣中的 SO₂ 反應後會產生硫酸鈉的廢棄物。此硫酸的粉狀廢棄物由下游的靜電集塵器或某處理流程如圖 17。

表 3 歸納了 LEC 與 Noxso 及 NaTech 的比較情形。如果以某一範圍大小的電廠當作比較基礎，LEC 的設備成本大概是 50~170 元/kW，而 Noxso 的設備成本約為 300~500 元/kW。就操作成本的比較，LEC 只須 160~400 元/kW，而 NaTech 則須 500~800 元/kW。從這些比較上可看出 LEC 的競爭優勢，將促使 LEC 主宰未來除硫設備的市場。

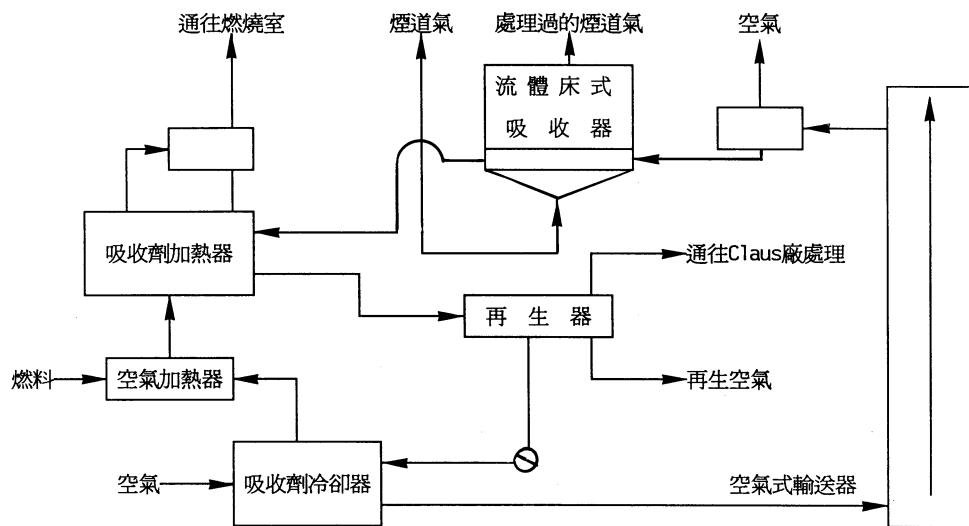


圖16 NOxSO系統流程圖

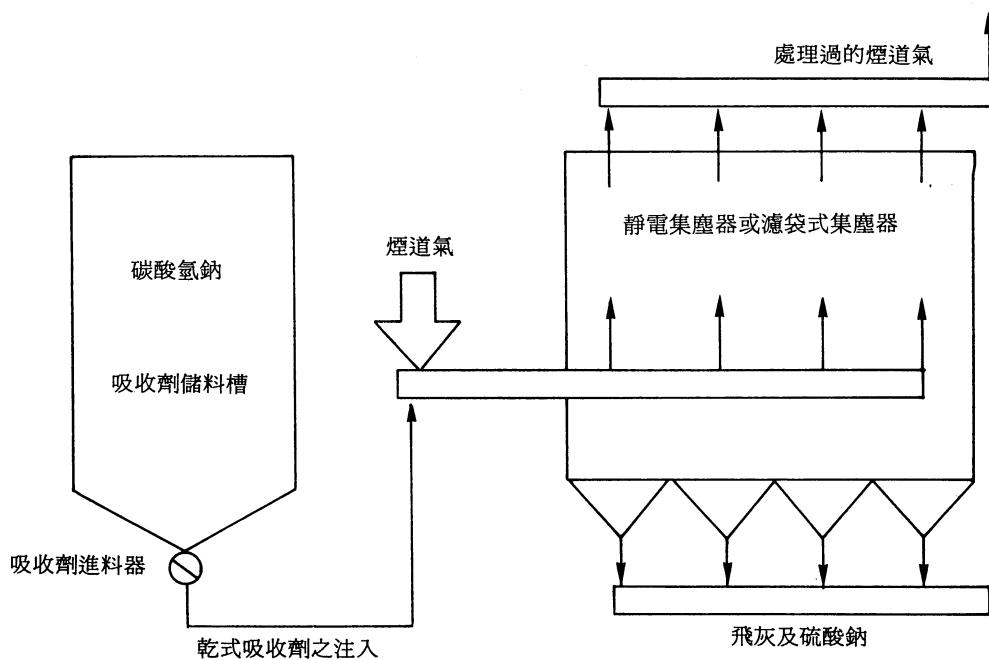


圖17 NATECH乾式煙道氣除硫設備流程圖

表 3 LEC與NaTech及Noxso 的成本比較

單位：美元

| 項 目 | LEC | NaTec | Noxso |
|------------|---------|------------|---------|
| 設備成本 | 50~170 | 70~120 | 300~500 |
| 操作成本 | 160~400 | 500~800 | NA |
| 二氧化硫去除率(%) | +95 | +70 | +95 |
| 目前發展的狀況 | pilot | Field Demo | pilot |

六、參考文獻

1. C.C.Shale and G.W.Stewart,A New Technique for Dry Removal of SO₂,presented at the Second Symposium on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology,Denver,CO,1979.
2. C.C. Shale,U.S.Patent 3,976,747(1976).
3. M.E.Prudich,K.W.Appell,M.J.Visneski,et al.,Small Pilot Demonstration of ETS' Limestone Emission Control System, Vols.1 & 2, Final Report: OCDO Grant No. CDO/R-86-24,1988.
4. K.W.Appell,M.S.Thesis,Ohio University,1989.
5. M.J.Visneski,Ph.D.Dissertation,Ohio University,1991.
6. S.N.Reddy,M.S.Thesis,Ohio University,1991.
7. R. J. Keeth, M. J. Krajewski and P. A.Ireland,Economic Evaluation of FGD Systems, Volume 5:The NOXSO and SOXAL Sodium - Based Processes and Four Additional Calcium-Based Processes,CS-3342-V5,Electric Power Research Institute, Palo Alto,CA,1986.
8. An Economic Evaluation of the ETS Limestone Emission Control Process for Removal of Sulfur Dioxide from Power Plant Flue Gas,Report prepared by the Tennessee Valley Authority for the U.S Environmental Protection Agency,1983.
9. Personal communication to John C.Mycock,Oct.24,1988.

(本文譯自Kenneth W. Appell & Michael E. Prudich 所著之 THE PILOT PLANT PROJECT OF THE MOVING-BED LIMESTONE EMISSION CONTROL (LEC) PROCESS)