

廢氣處理

各型煤炭燃料電廠移除二氧化碳之探討

薛少俊*

摘要

深受地球溫室效應，管制綠室氣體的排放量，特別是經由增進能源產出和使用的效率。為了回應國際的要求，對於石化燃料電廠移除二氧化碳調查選用趨於必要，抉擇考量以電廠總熱能效率比較作為基礎。一般慣常粉煤燃燒電廠總熱能效率約38%，而整合氣化複循環電廠約42%，後者更適合增設移除二氧化碳的相關製程設備，主要是在高壓運轉，促成增進二氧化碳分壓，降低分離的能源損耗，減少總熱能效率亦較低（33%高於前者的26%），尤其使用薄膜分離方式只降至36%。

【關鍵字】

1. 地球溫室(global warming)
2. 慣常粉煤燃燒(conventional pulverized fuel combustion)
3. 循環式流體化床(circulating fluidized bed)
4. 整合氣化複循環(integrated gasification combined cycle)
5. 總熱能效率(total thermal efficiency)

*臺灣機電工程服務社經理

一、前　　言

地球溫室是一項威脅而引起全世界的注意，此複雜的自然機構難於適當表示，唯一可能為加速相關效應或降低地球溫室至疏忽的比例。這二十年無法釐清任何溫室的範圍和意義，世界人口繼續以指數成長，對於生活水準要求改良接踵而至，包括能源產出與農業均是主要的綠室氣體根源。

現今每個人無責延遲而要完成下列審慎的回應：

1.短期

- (1)增進發電效率、終期使用和輸電。
- (2)減少氟碳氯化物(chlorofluorocarbons, CFC)的生產與使用。
- (3)終止砍伐森林，維持森林的來源。
- (4)協助發展產電效率。

2.中期

推展更有效的高等燃煤發電系統。

3.長期

研究發展煤炭發電系統整合二氧化碳移除和處置。

以上各項必須衡量經濟與環保要求。源自煤炭的綠色氣體只有19%可能為溫室效應，全世界大部份能源短缺，仰賴煤炭要博鬥溫室，因此致力降低二氧化碳的排放量，以及配合減少發電費用。

本文旨在說明慣常粉煤燃燒和整合氣化複循環兩種電廠，搭配移除二氧化碳的製程設備對總熱能效率的影響，以作為發電與汽電共生業者規劃設計之參考。

二、各種發電降低二氧化碳製程介紹

2.1 慣常粉煤燃燒電廠

在粉煤燃燒過程中，煤炭首先於粉煤機研磨成細粉，然後掉入主爐膛室，經由燃燒空氣預熱，迅速放熱燃燒，產製二氧化碳和水蒸汽，燃燒為階段式，使用一次與二次空氣抑制氮氧化物排放。爐膛壁襯以水管，自燃煤火焰移除輻射熱。部份未燃礦物質和未燃碳在爐底移出作為底灰，剩餘灰份由爐膛熱煙氣攜出。這些熱煙氣

受過熱器、再熱器、節熱器與空氣加熱器冷卻，藉靜電集塵器移除殘餘飛灰，從煙囪通氣排至大氣。自鍋爐和熱煙氣移出的熱能昇起蒸汽，在傳統蒸汽循環藉汽輪機產生電力。

關於二氧化硫排放，通常添加最終排煙脫硫步驟來符合環境法規。大部份普遍的方法採用濕式石灰石／石膏製程，煙氣中二氧化硫與石灰石漿體在噴霧塔接觸，隨著具有空氣和水份反應產製水合硫酸鈣的石膏，屬於有價值的副產品，其流程見圖1⁽¹⁾。從煙氣中移除二氧化碳要在約大氣壓力冷卻，及含約15%摩爾乾基二氧化碳。具有水溶性胺液的化學溶劑洗滌，其為白煙流移除二氧化碳的商業化可用製程。從溶劑再生二氧化碳需有可靠份量的低級熱能，可由電廠汽輪機低壓蒸汽抽取。

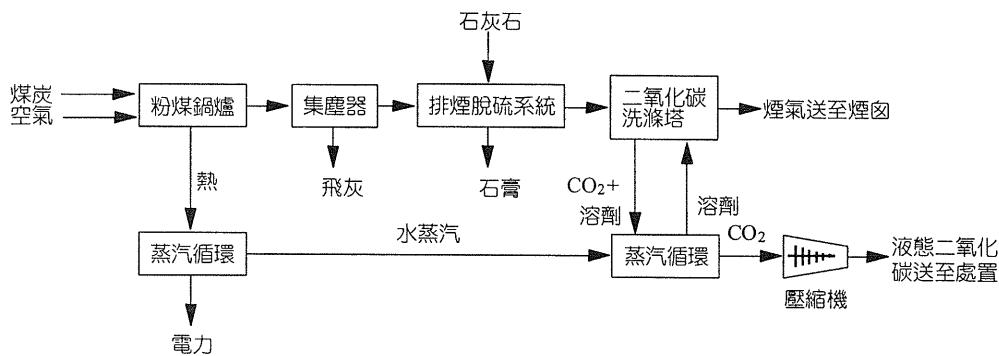


圖1 慣常粉煤燃燒電廠增設移除二氧化碳流程

2.2 循環式流體化床燃燒電廠

在循環式流體化床(circulating fluidized bed, CFB)燃燒中，煤炭和石灰石一齊粉碎，然後飼入流體化床頂端。此床含有未燃炭、灰燼與惰性物質的混合物，由注入空氣流體化。空氣亦促進煤炭氧化燃燒，床內顆粒維持湍流狀態和良好內部混合，在相對低溫800~900°C引導快速有效燃燒。此溫度為其優點，使得熱氮氧化物不易形成，此外石灰石在這情況鍛燒與自煤炭抓取硫份。硫氧化物和氧化鈣反應形成硫酸鈣，其與乾灰在燃燒器底部迅速移除，集塵器移除飛灰，此能大力降低電廠硫氧化物的排放。在燃燒過程，流體化床本身熱交換器將熱能傳至蒸汽循環，緊接用於發電，圖2為其流程⁽²⁾。有關回收二氧化碳普遍常用的方式是胺類洗滌(amine scrubbing)製程，最適合的胺類為一乙醇胺(monoethanolamine, MEA)，因其具備高

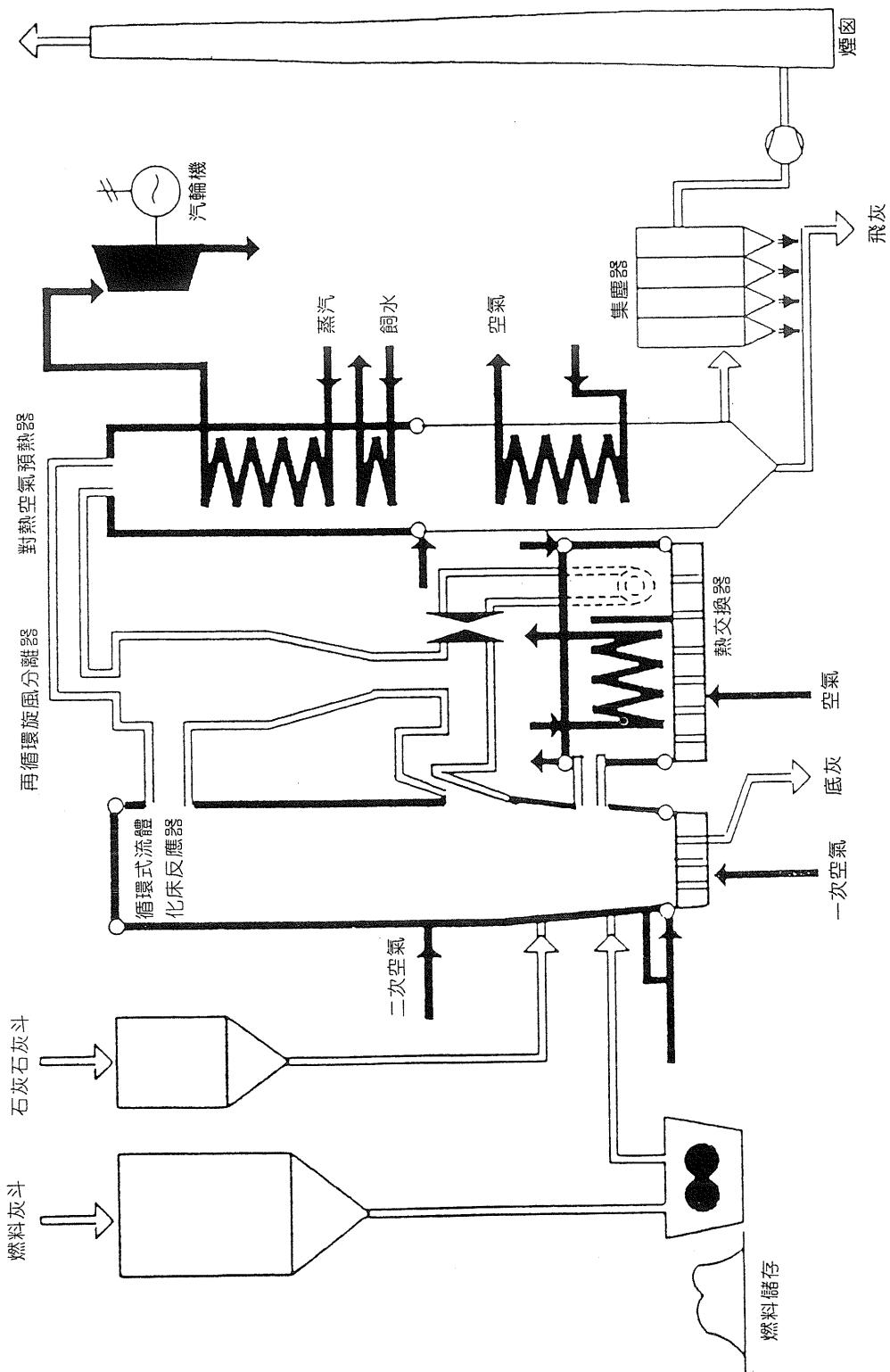


圖2 循環式流體化床燃燒電廠流程

攜行量或負荷（每溶劑單位容積之二氧化碳吸收量），此意謂著特定系統性能所需溶劑循環量較少，基本流程如圖3所示。主要設備是吸收塔、汽提塔與二氣化碳交換器，首先煙氣進入吸收塔經一乙醇胺溶液逆流移出二氧化碳，其次此二氣化碳富一乙醇胺溶液泵入汽提塔沸騰汽提出二氧化碳，一方面汽提出的一乙醇胺冷卻泵回吸收塔，另一方面二氣化碳淨化後送至壓縮液化，即可作為各種工業用途的產品⁽³⁻⁵⁾。

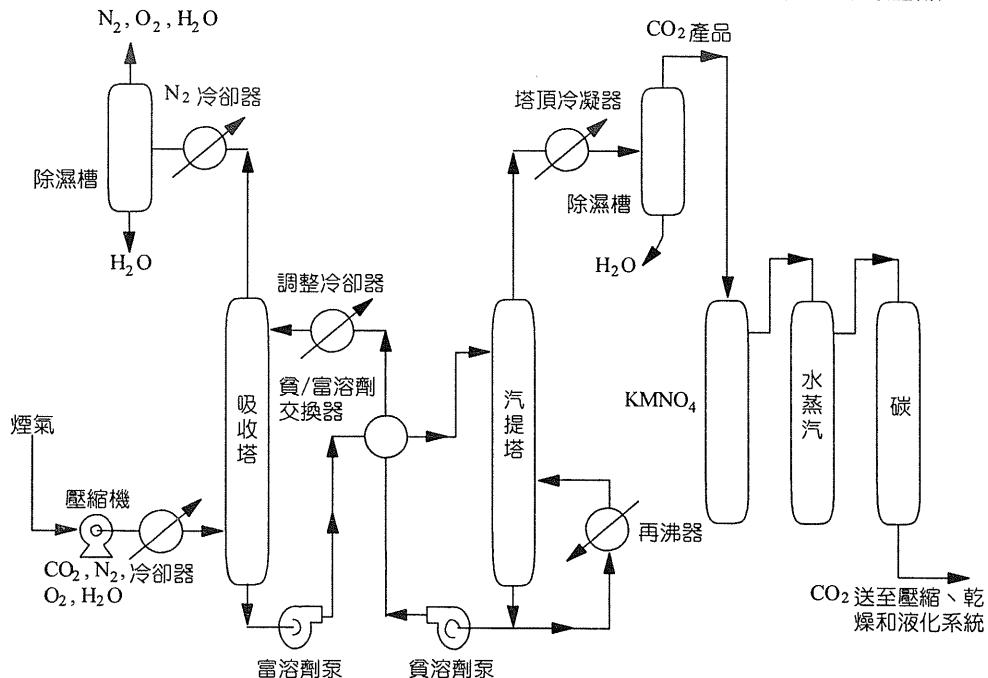
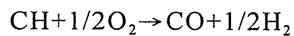


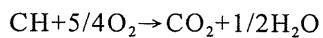
圖3 典型胺基二氣化碳回收製程

2.3 整合氣化複循環電廠

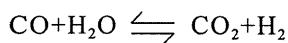
在整合氣化複循環(integrated gasification combined cycle, IGCC)電廠中，煤炭於有限空氣反應槽燃燒氧化，產製合成氣體產物，提供氣渦輪機燃燒室燃燒，其主要為氫氣與一氧化碳



及少量水蒸氣、二氣化碳、硫化氫、甲烷和氮氣



另有可逆水一氣體轉移反應



氣化反應槽產生的蒸汽與氣渦輪機的排氣在傳統蒸汽循環用於汽輪機，和氣渦輪機共同發電。二氧化碳移除過程整合於發電流程，如圖4所示⁽¹⁾。過程中最適合自合成氣移除二氧化碳之處，位於轉移反應器內一氧化碳轉化成二氧化碳。此時合成氣含有40%二氧化碳、40%氫氣、20%水蒸氣與小量氣體（特別是硫化氫）。硫化氫亦需加以處理來符合環境要求，關於氣體分離問題的不同技術說明如后^(1,6-8)。

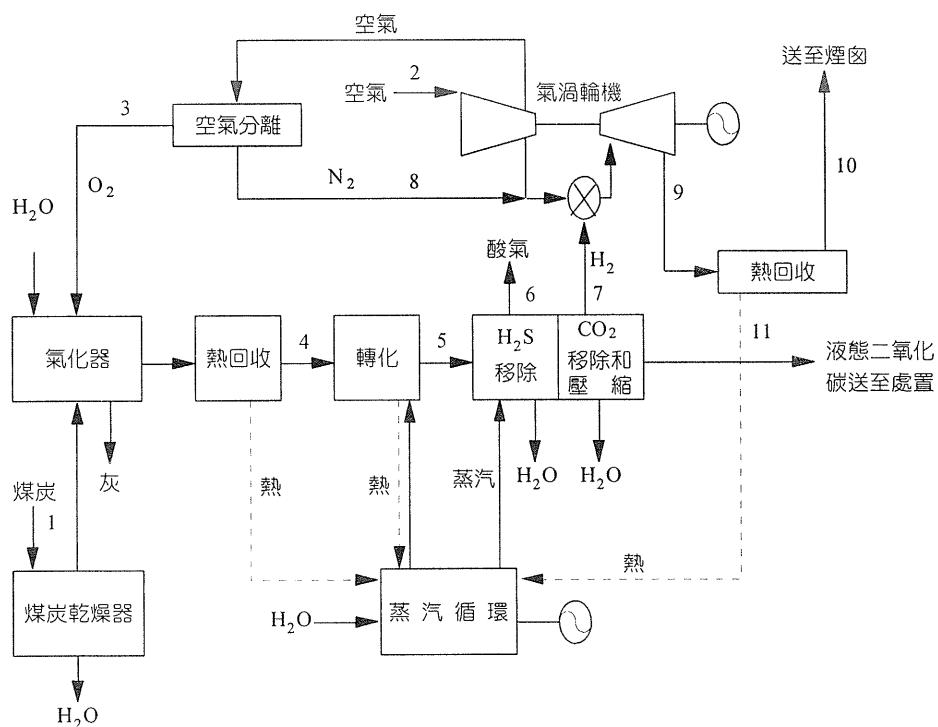


圖4 整合氣化複循環電廠增設移除二氧化碳流程

2.3.1 物理溶劑洗滌

氣體與諸如selexol專利物理溶劑接觸，二氧化碳和硫化氫溶解於其中，溶解度與分壓成比例，氣體隨後藉降壓自溶劑釋出，選擇適當的製程設計促使硫化氫從二氧化碳分離再生。整合氣化複循環製程適合此種二氧化碳移除的型式，可由廣泛不同溶解度分離氫氣和二氧化碳。

此種過程的缺點是在低溫操作，因此飼料氣體必須冷卻下來和產品氫氣需再熱。溶劑再生時二氧化碳一些壓力失去，其能藉階段抑壓來減少損失。

2.3.2 化學溶劑洗滌

諸如水溶性胺液化學溶劑用於移除氣體混合物中的二氧化碳，此兩者化學併合藉熱能再生，熱解混合物。化學溶劑洗滌分離優於物理溶劑洗滌，但為了再生需大量熱能，對於氣體中的二氧化碳分壓沒有明顯的助益。

2.3.3 水洗滌

傳統物理與化學溶劑洗滌系統需再生和溶劑再循環，衍生能源損耗，因此可考慮使用價廉的海水非再生物理溶劑。

水中二氧化碳溶解度隨壓力而增加，以致需求高壓洗滌系統。部份氫氣亦會溶解，影響其自二氧化碳分離，海水中產生的二氧化碳溶液必須維持放流至深海的壓力。同時部份硫化氫亦溶解於海水，殘餘者要從氫氣洗出。

2.3.4 薄膜分離

考慮使用氣體滲透膜自氫氣分離二氧化碳，氫氣移除的問題大於二氧化碳移除。對於薄膜系統的需求規格說明如下：

- 1.低壓力降限制分離的能源損耗。
- 2.高氫氣／二氧化碳分離因子促成90%以上二氧化碳移除。
- 3.調整轉移反應器出口運轉溫度，限制相關氫氣冷卻與再熱的能源損耗。
- 4.高氫氣滲透率，確定薄膜區域需求不會過量而導致高成本。

因此金屬薄膜較適合此種性能的目的，其在陶瓷基質覆上相當薄的鈀金屬層，一旦升溫允許氫氣滲透而沒有其他氣體，促成高溫氣體分離製程。氫氣滲透率依薄膜兩側分壓差而定，衍生氮氣作為滲透的攜行氣體，降低其分壓促進滲透率，圖5為整合氣化複循環電廠與氫氣薄膜分離的流程⁽¹⁾。剩下的富二氧化碳氣體緊接冷卻而自水中冷凝出來，洗滌移除硫化氫。殘餘的氫氣和一氧化碳從二氧化碳液化工廠回收，送至氣渦輪機進料。

三、總熱能效率比較

3.1 整體說明

由圖6可知⁽¹⁾，慣常粉煤燃燒電廠總熱能效率最低，無庸置疑地受添加排煙脫硫系統影響。循環式流體化床燃燒電廠總熱能效率稍高，替代慣常粉煤燃燒電廠的效

果很小，主要是仰賴慣常蒸汽循環而使實際發電機構沒有改變，唯有降低粉煤過程能源損耗，但效率提昇並不明顯。更明顯增進總熱能效率，是在整合氣化複循環電廠使用氣渦輪機brayton循環的優勢，脫離rankine循環的溫度限制。

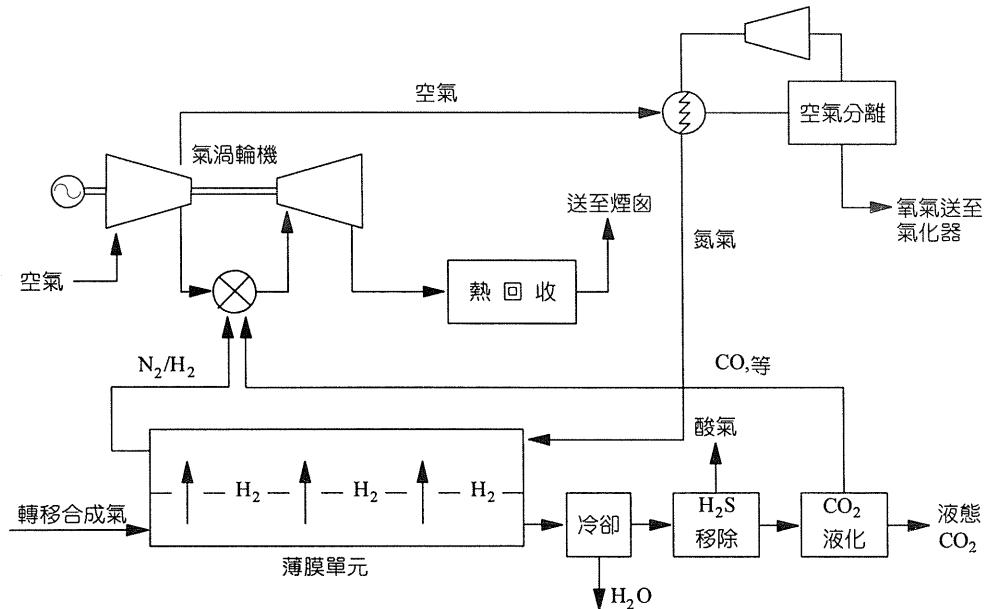


圖5 整合氣化複循環電廠增設薄膜分離氫氣流程

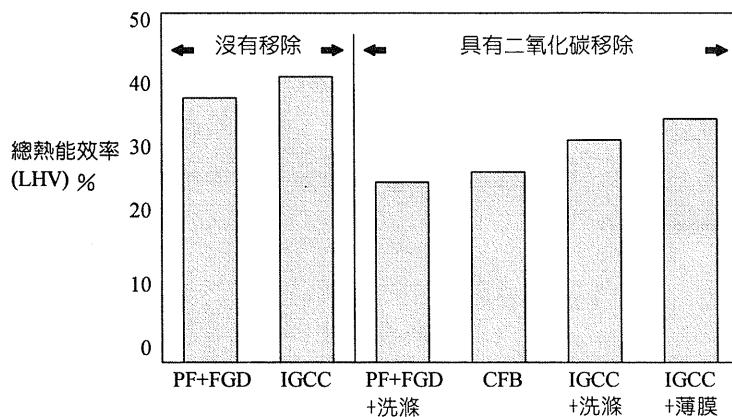


圖6 電廠發電效率比較

3.2 具有降低二氧化碳製程

一般慣常粉煤燃燒電廠的總熱能效率約38%，利用氨基溶劑洗滌煙氣移除二氧化碳(90%摩爾乾基)，降到26%的總熱能效率⁽¹⁾。就整合氣化複循環電廠而言，其總熱能效率約在43%，相形之下降至33%的總熱能效率，而使用薄膜分離方式的總熱能效率約在36%⁽¹⁾。

論 論

1. 在既有慣常粉煤燃燒電廠增設移除二氧化碳的化學溶劑洗滌製程設備可行，總熱能效率由38%降至26%。
2. 整合氣化複循環電廠增設一氧化碳轉移反應器、二氧化碳洗滌塔或薄膜氣體分離器，均是移除二氧化碳的可行方式，總熱能效率由43%降至33~36%。
3. 在增設相同移除二氧化碳的製程設備情況下，整合氣化複循環電廠總熱能效率降低程度少於慣常粉煤燃燒電廠，投資成本較低。
4. 就整體氣化複循環電廠增設不同移除二氧化碳的製程設備而言，使用薄膜分離方式的總熱能效率降低程度少於氨基溶劑洗條方式，屬於能源有效製程，具有較高的二氧化碳回收率。

參考文獻

1. Summerfield, I.R., Goldthorpe, S.H., Bower, C.J., Combating Global Warming-Reducing CO₂ Emissions from Coalfired Power Plant, Proc. Instn. Engrs, Vol.207, Part A, pp.81-88, 1993.
2. Bandel, G., Hirschfelder, H., Schaub, G., Circulating Fluid Bed Combustion for Efficiency at Low Emissions, Power Generation Technology, pp.49-56, 1990/1991.
3. Rushing, S.A., CO₂ Recovery Improves Cogen Plant Economics, Power Engineering, pp.46-49, April, 1994.
4. Rushing, S.A., Cogeneration Projects Can Profit from CO₂ Recovery, Power Engineering, pp.33-34, May, 1993.

22 各型煤炭燃料電廠移除二氧化碳之探討

- 5.Collins, S., Cogen Plant Cycles Large CFB Boilers, Recovers CO₂, Power, pp.47-52,April, 1992.
- 6.Wolsky, A.M., Daniels, E.J., Jody, B.J., CO₂ Capture from the Flue Gas of Conventional Fossil-Fuel-Fired Power Plants, Environmental Progress, Vol. 13, NO.3, pp.214-219, August, 1994.
- 7.Herzog, H.,Golomb, D., Zemba, S., Feasibility, Modeling and Economics of Sequestering Power Plant CO₂ Emissions in the Deep Ocean, Environmental Progress, Vol. 10, No.1, pp.64-74, February, 1991.
- 8.Louks, B., CO₂ Poduction in Gsification-Cmbind-Ccle Pants, EPRI Journal, pp.52-54, October/November, 1987.