

行政院國家科學委員會空污費科技計畫成果報告

海洋儲存溫室二氧化碳氣體之功能評估

Ocean Storage of CO₂ Greenhouse Gas

計畫編號：NSC-89-EPA-Z-009-001

計畫期間：88年7月1日至89年6月30日

計畫主持人：白曠綾 國立交通大學環境工程所

專任研究助理：陳佩貞

兼任研究助理：康育豪

E-mail : hlbai@green.ev.nctu.edu.tw

一、中文摘要

利用海洋儲存自煙道回收的 CO₂ 氣體，可在較短的時間內達到抑制 CO₂ 氣體排放至大氣中之目的，以減緩地球的溫室效應。評估的結果顯示，將 CO₂ 以液體的形式進行海洋棄置，應是目前較可行的技術，而利用拖曳管船將壓縮的 CO₂ 液體運輸至深海稀釋處置的方法，則是目前最有效率且本土適用性較高的運輸方式。

經由 CO₂ 回收及深海處置之防治成本的分析結果顯示，加裝 CO₂ 防治設備的電廠，總發電成本增加為 2.4 NTD/kWh，約增加了 50% 的成本，CO₂ 回收及深海處置之總單位防治成本約為 880 NTD/ton。

而在 CO₂ 溶解傳輸模式方面，當液滴之粒徑愈小或注入之深度愈淺時，其溶解速率將變得愈快。當注入之深度愈深時，可容許之最大液滴粒徑將隨之增加，其中若是注入深度為 1500 公尺深，可容許之最大液滴之半徑值為 0.72 cm，而在 1000 公尺之注入深度下，可容許之最大液滴半徑值則為 0.48 cm。

關鍵字：CO₂ 深海儲存技術、CO₂ 防治成本、CO₂ 傳輸模式。

Abstract

The ocean storage of carbon dioxide recovered from the flue gas of coal-fired plant is one of the CO₂ mitigation options considered by many countries. It is evaluated and reported in this study to find out the most applicable and cost-effective CO₂ ocean storage technology in Taiwan.

The investigation shows that the towing ship system is the most effective and applicable transportation way of CO₂ ocean disposal for Taiwan at the present time. The electric production cost of the power plant equipped with the CO₂ treatment and disposal

equipment is about 2.4 NTD/kWh, which is increased by around 50% as compared to the original electric production cost. And the marginal cost is about 880 NTD/ton CO₂ avoided.

The prediction results of CO₂ mass transfer model show that the shrinkage rate of the CO₂ droplet decreases with the increasing injection depth. The maximum allowable injection radius of the CO₂ droplet is 0.72cm at the depth of 1500m, and 0.48cm at the depth of 1000m.

Keywords: CO₂ ocean storage technology, cost analysis model, hydrate film, CO₂ dissolution.

二、緣由與目的

由於目前石化燃料的持續使用，大氣中之 CO₂ 含量因此而逐步增加，為了解決因 CO₂ 排放所造成溫室效應問題的持續惡化，將大量之 CO₂ 以壓縮液態的形式注入於深海中，使之溶解於海水或是以一較安定的形態儲存於海底窪地中，將成為一較有效減緩溫室效應之處置方案。

本研究主要目的如下：

1. 評估我國執行深海儲存 CO₂ 方案之可行性，並進行深海儲存 CO₂ 的成本-效益分析。
2. 建立 CO₂ 回收及深海處置的成本估算模式。
3. 考慮 CO₂ 於深海中之水合行為、擴散行為及運動情形，以建立一液滴溶解模式。
4. 建議最佳之深海掩埋方式、深度及注入之 CO₂ 液滴大小，提供決策者評估二氧化碳處理策略之適用性參考。

本研究主要內容則可分為：

1. 藉由蒐集國際間海洋儲存 CO₂ 之相關資料，了解各項掩埋技術及 CO₂ 於海水中之物理與化學特性。

2. 依據各項深海掩埋技術之評估，先篩選出適合國內之技術性資料，再估算其經濟成本需求，以提供國內實際應用之參考。
3. 根據質傳理論與分子擴散理論，建立一液滴溶解模式，以求得各深度達完全溶解時所允許最大粒徑值。

三、二氧化碳海洋掩埋技術

大氣中的 CO₂ 會與海洋形成自然的平衡狀態，自 1970 年代後期起，科學家即著手研究將 CO₂ 注入海中之可行性，Marchetti¹ 即為文獻中第一位提出深海處置 CO₂ 之方案，隨後 Hoffert *et al.*² 亦建議了多個深海處置 CO₂ 之方案。其中，CO₂ 之儲存技術逐漸被區分為兩大類，一類為以“CO₂ 湖泊”的方式(lake-type storage concept)將 CO₂ 儲存於深海中；另一種則利用“稀釋儲存”的概念(dilution concept)將 CO₂ 溶解於海水之中。

3.1 二氧化碳注入形式

- € 高 CO₂ 濃度的海水溶液注入
- € 氣體形式注入
- € 純液體形式注入
- € 固體形式注入
- € 固化 CO₂ 水合物形式注入

3.2 二氧化碳注入深度

- € 淺海注入(Shallow injection)
- € 中間深度釋放(Intermediate-depth release)
- € 深海隔離(Deep-sea sequestration)

3.3 二氧化碳的儲存方式

- € 稀釋儲存概念(Dilution concept)
- € 湖泊式儲存(Lake-like concept)

3.4 各項深海掩埋技術比較

表.1 所示為各項 CO₂ 深海掩埋技術的比較，其中包括了注入形式、注入深度、儲存方式及對海洋生態的影響等。

四、深海掩埋 CO₂ 技術之成本分析

經由各項深海技術評估的結果顯示，利用拖曳管船將壓縮的 CO₂ 液體運輸至深海稀釋處置的方法，是目前最有效率且本土適用性較高的運輸方式。

表.2 為 CO₂ 回收及深海處置之防治本的分

析表。結果顯示在加裝 CO₂ 防治設備的電廠，其總發電成本增加為 2.4NTD/kWh，此值比基本電價增加了約 50% 的成本，換句話說 CO₂ 回收成本約佔總發電成本的三分之一。

CO₂ 回收及深海處置系統的總成本為 115.307million/yr，其中，CO₂ 回收的成本為 107.612 million/yr，CO₂ 深海處置的成本僅為 7.695million/yr。至於 CO₂ 回收及深海處置的單位防治成本約為 29.25 USD/ton (若以 1 美元兌換 30 元新台幣為基準，則此值相當於 880 NTD/kWh)，其中 CO₂ 回收階段的單位防治成本為 27.30 USD/ton (相當於 820 NTD/kWh)，其佔了總成本之大部分成本，而 CO₂ 深海處置的單位防治成本則僅需 1.95 USD/ton (相當於 60 NTD/kWh)。

此可顯示 CO₂ 深海處置階段的成本相較於回收階段而言明顯地低，因此 CO₂ 深海處置方案的確具有經濟可行性的誘因，但是關於 CO₂ 深海處置對於海洋生態造成的影響及運輸過程安全性方面的風險評估，目前只能進行粗略的估算，但是此部份應為成本分析中的重要影響因子，將來應針對此部份的影響進行更深入的探討。

五、二氧化碳於海水中之擴散模式

液態 CO₂ 於中間深度(500-1500 m)下注入，液滴表面將會很快的形成一類似固體之水合晶體物，此一水合物形成主要是發生在液滴表面層，並不會使整個 CO₂ 液滴轉換成水合粒狀物之固體，而內部則依然保持純液體狀態，此薄膜的結構將主導著質傳溶解速率的快慢。

利用質傳模式及 CO₂ 液滴運動方程式之建立與分析，除了計算出各深度下之質傳速率與溶解速率外，進一步可了解 CO₂ 液滴之溶解距離及溶解時間，以評估所需注入之深度與注入液滴的大小。

由研究結果可知，當液滴半徑為 1cm ~ 0.1cm 左右，注入深度為 500m 到 1500m 時，溶解速率約為 $4.56 \times 10^{-5} \sim 1.27 \times 10^{-4}$ (cm/s)。當注入之 CO₂ 液滴粒徑愈小，其溶解的速率則愈快，而處置注入之深度有所變化時，溶解速率亦會因環境壓力與溫度而改變，並隨著深度增加而溶解速率變得較緩慢。

以下針對過去學者們所做過之實驗與理論分析進行整理比較，結果如表.3 所示。Aya *et al.*³ 以實驗觀測到純 CO₂ 無水合薄膜層與含有薄膜之 -dr/dt 分別為 5×10^{-6} m/s 與 4.67×10^{-7} m/s 於溫度為 1.9~7.2 °C。

Shindo *et al.*⁴ 則由實驗上觀測到含有水合薄膜層之 CO₂ 液滴，在溫度為 3°C、壓力為 28MPa 與 35MPa 時，發現溶解速率皆為 2.5*10⁻⁷m/s。Nishikawa *et al.*⁵ 則由實驗上發現流場之流速將會影響液滴之溶解速率值，當流場速度為 2~9cm/sec 時，溶解速率值約為 2.5*10⁻⁷ 至 7*10⁻⁷m/sec。

Golomb *et al.*⁶ 曾以質傳模式進行質傳現象之研究分析，由於其在進行溶解速率計算時，未考量到液滴表面之水合薄膜物之作用，而將 CO₂ 與水系統視為一液態對液態的系統，其所估算出來的質傳係數 K_m 值約為 1.48*10⁻³ m/s，而溶解速率值則為 1.33*10⁻⁴ m/s。

Teng *et al.*⁷ 在進行液滴溶解現象分析時，利用 Shindo *et al.*⁴ 於實驗觀測之溶解速率值 (2.5*10⁻⁷m/s) 進行計算，其求得質傳係數之值約為 6.48*10⁻⁶m/s。

Teng *et al.*⁸ 利用無因次化圓柱座標形式之質傳方程，去推導表面無水合層與有水合層之液滴質傳係數，並經由初步假設 $r_s=10^{-3}$ m, $U=10^{-3}$ m, $D_s=10^{-10}$ m²/s，所得之質傳係數 $K_m=4.6*10^{-6}$ m/s，而而溶解速率值則為 3.39*10⁻⁷m/s，而在考量液滴表面含有有水薄膜層時， K_m 值則為 1.47*10⁻⁶m/s，而 $-dr/dt=1.25*10^{-7}$ m/s。

在液滴溶解於深海之過程中，由於液滴所需之溶解距離會隨著液滴粒徑大小而有所影響，由模擬結果可知，當液滴粒徑愈大，所需之溶解距離會變長，故在希望被注入之液滴可以於海深 500 公尺前完全溶解之前提下，將會使得各深度下將存在一最大粒徑極限值，此亦為本研究之最終目的，以提供我國在應用深海掩埋技術時所需數據之參考。

經由本研究之溶解模式模擬後，結果如圖 1 所示，當注入之深度愈深時，可容許之最大液滴粒徑將隨之增加，其中若是注入深度為 1500 公尺深，可容許之最大液滴之半徑值為 0.72 cm，而在 1000 公尺之注入深度下，可容許之最大液滴半徑值則為 0.48 cm。因此只要符合在各深度下最大粒徑之限制內，將可順利的完成 CO₂ 液滴掩埋於海水中之目的。

六、對空污防治之重要成效

利用海洋儲存自煙道回收的 CO₂ 氣體，相較於其他的管制策略而言，應可在較短的時間內達到抑制 CO₂ 氣體排放至大氣中之目的，以減緩地球的溫室效應。因此，近年來美國、日

本及歐洲各國為主的先進國家，均投入許多人力從事關於 CO₂ 深海掩埋技術之研究發展及實際應用。但目前國內對於 CO₂ 的回收及深海處置技術方面的研究仍相當少，尤其在估算 CO₂ 防治成本方面的資料更是有限。因此，本計畫對空污防治方面有下列之重要成效：

1. 提供一本土適用性較高的 CO₂ 深海處置技術及其經濟可行性之評估結果。
2. 建立一完整的 CO₂ 深海處置技術及成本分析方面的文獻資料庫。
3. 提供 CO₂ 回收及深海處置的防治成本及其他關於成本方面的評估結果及數據。
4. 建立了一深海儲存 CO₂ 之傳輸模式，以預測 CO₂ 液滴於深海中的溶解行為及最佳注入尺寸。

本計畫的研究結果將可提供相關研究或執行單位在進行深海掩埋 CO₂ 技術之實際應用時所需要之參考資料與數據，更可作為國內在制定相關的法令(如溫室氣體防治法)及政策(如制定碳稅)時的重要參考資訊。

七、參考文獻

1. Marchetti, C. "On Engineering the CO₂ Problem" *Climate Change*, Vol. 1, pp. 55-68, 1977.
2. Hoffert, M. I. *et al.* "Atmospheric Response to Deep-Sea Injections of Fossil Fuel Carbon Dioxide" *Climate Change*, Vol. 2, pp. 53-68, 1979.
3. Aya I., K. Yamane, N. Yamada, "Effect of CO₂ Concentration in Water on the Dissolution Rate of its Clathrate." *Proceedings of the International Symposium on CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy*. Tokyo Institute of Technology, pp 351-360, 1993, Tokyo.
4. Shindo, Y., Fujioka, Y., Yanagishita, Y., Hakuta, and Komiyama, H., *Proceedings of the 2nd "International Workshop on Interaction between CO₂ and Ocean"*, Tsukuba, Japan, June 1-2, 1993, pp. 111, also in *direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, eds N. Handa and T. Ohsumi, Terrapub, Tokyo, pp. 217, 1995.
5. Nishikawa, N., M. Ishibashi, H. Ohta, N. Akutsu and M. Tajika "Stability of Liquid CO₂ Spheres Covered with Clathrate Film when Exposed to Environment Simulating the deep Sea." *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 36, No. 6-9, pp. 489-492., 1995.
6. Golomb, D., Herzog, H., J. Tester, White, D., and

Zemba.S, " Feasibility Modeling and Economics of Sequestering Power Plant CO₂ Emissions in the Deep Ocean. " Energy Laboratory Report MIT-El-89-003. MIT, Cambridge, Ma, December 1989.

- Teng, H., A. Yamasaki and Y. Shindo. "Stability of the Hydrate Layer Formed on the Surface of a CO₂ Droplet in High- Pressure" *Chemical Engineering Science* Vol. 51, No.22, pp.4979-4986, 1996.
- Teng, H. and A. Yamasaki . "Dissolution of CO₂ Droplets in the Ocean" *Energy* Vol. 22, No.8, pp.751-761, 1997.

表.1、各項 CO₂ 深海掩埋技術比較表

| 技術分類 | 管線法 | 運輸船法 | 二氧化碳湖法 | 直接棄置 CO ₂ 法 | OTEC 法 |
|------|---------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|
| 運輸方式 | 架設管線 | 陸地上稀釋、現地稀釋、釋放前稀釋、噴灑管、拖曳管 | 注入船導管、半沉浮台導管、浮管、張力柱浮台導管 | 直接沈放棄置 | 利用浮台及其上的溶解及電解單元 |
| 注入形式 | 氣或液體 | 液體(液滴) | 液體(CO ₂ 湖) | 乾冰或水合物 | 液體(液滴) |
| 注入深度 | 淺海注入 (<500 m) | 中間深度釋放 (1000~1500m) | 深海隔離 (>3000m) | 深海隔離 (>3000m) | 中間深度釋放 (1000~1500m) |
| 建議尺寸 | 氣泡半徑約 1~2cm | 半徑 1~2cm | 不須考慮 | 邊長 3m 的立方塊 (乾冰) | NA |
| 儲存方式 | 稀釋式 | 稀釋式 | 湖泊式 | 湖泊式 | 稀釋式 |
| 滯留時間 | 最短 (<50 年) | 次之(約滯留 200 至 300 年) | 較長 | 較長 | NA |
| 成本比較 | 成本較低 | 最有效率 | 成本高 | 能量及運輸成本高 | NA |
| 生態影響 | 較小 | 較小 | 較大 | 較大 | NA |

*NA:資料不足

表.2、CO₂ 回收及處置成本總表 Summary^a

| 項目 | 結果 | 單位 |
|----------------------------------|---------|------------|
| 1.總發電成本 (含 CO ₂ 回收成本) | 80.4 | mills/kWh |
| 電廠發電成本 | 53.5 | mills/kWh |
| CO ₂ 回收成本 | 26.9 | mills/kWh |
| 2.CO ₂ 回收及深海處置系統總成本 | 115.307 | Million/yr |
| CO ₂ 回收成本 | 107.612 | Million/yr |
| CO ₂ 深海處置成本 | 7.695 | Million/yr |
| 3.CO ₂ 回收及深海處置單位成本 | 29.25 | USD/ton |
| CO ₂ 回收單位成本 | 27.30 | USD/ton |
| CO ₂ 深海處置單位成本 | 1.95 | USD/ton |

^a 以 2000 年 U.S. dollars 為基準。

準。

表.3 各文獻之質傳係數 k_m 與溶解速率值比較表

| 學者 | k_m 值 pure | k_m 值 hydrate | $(-dr/dt)$ pure | $(-dr/dt)$ hydrate | 擴散係數 D | |
|------|------------------------|-----------------------|--|-----------------------|--|-------------------------------------|
| 實驗數據 | Aya ³ | - | - | 5*10 ⁻⁶ | 4.67*10 ⁻⁷ | - |
| | Shindo ⁴ | - | - | - | 2.5*10 ⁻⁷ | 10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰ |
| | Nishikawa ⁵ | - | - | - | 2.5*10 ⁻⁷ ~7*10 ⁻⁷ | - |
| | Teng ⁷ | - | 6.48*10 ⁻⁶ | - | - | - |
| 理論分析 | Golomb ⁶ | 1.48*10 ⁻³ | - | 1.33*10 ⁻⁴ | - | 1.89*10 ⁻⁹ |
| | Teng ⁸ | 4.6*10 ⁻⁶ | 1.4*10 ⁻⁶ | 3.93*10 ⁻⁷ | 1.25*10 ⁻⁷ | - |
| | 本研究 | - | 6.6*10 ⁻⁶ ~1.8*10 ⁻⁵ | - | 4.56*10 ⁻⁷ ~1.27*10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰ |

註: " - " 表示文獻中沒有該值

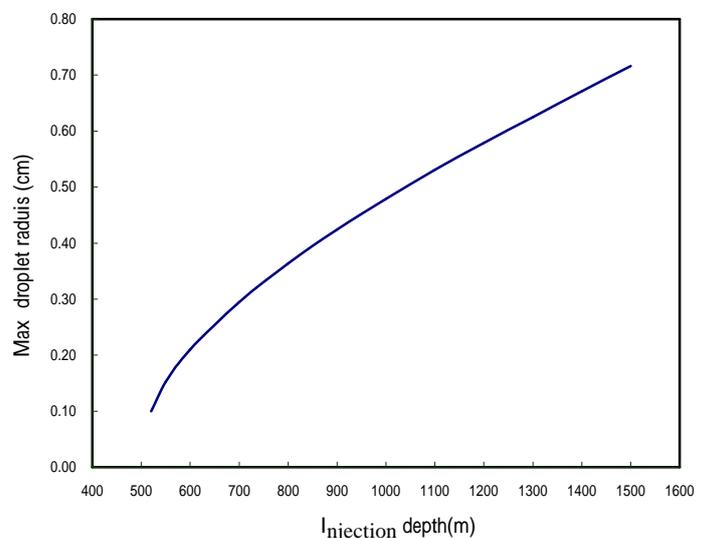


圖 1、各注入深度下可容許液滴之最大粒徑值