

國科會/環保署環保科技合作研究計劃（空污費）精簡報告

能源使用所產生之溫室二氧化碳氣體排放及減量對策

CO₂ Emissions and Mitigation Strategies for Energy Sector

計畫編號：NSC-88-EPA-Z-009-002

計畫期間：87年7月1日至88年6月30日

計畫主持人：白曠綾 國立交通大學環境工程所

共同主持人：高正忠 國立交通大學環境工程所

研究生助理：傅瑜琮、康育豪

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

摘要

二氧化碳對溫室效應之貢獻度約占55%左右。本研究旨在針對各部門因能源使用而產生之溫室二氧化碳氣體進行排放量推估計算及排放減量策略評估，以提供決策單位規劃產業發展及能源政策的參考。

本計畫針對我國三個能源主要使用部門，包括交通運輸部門、工業部門及電力部門，進行其CO₂排放強度估算，並推估其現在及未來之排放量。此外在交通運輸部門方面，則以數學規劃模式及問卷調查所得結果，評估分析各管制方案之排放減量成效及最佳減量策略之擬訂。

針對交通運輸部門之研究結果顯示，以CO₂排放減量成效而言，應以燃油效率標準提升、航空客運轉移及限制私人載具使用為較優先考量之策略。另外若以回歸至2000年之排放水平為CO₂減量目標，則由問卷調查結果為依據所得之綜合評估結果顯示，在2020年時燃油效率標準需較現今提昇68%，航空運輸需轉移40%由高鐵乘載，限制20%之私人載具使用量，電動小客車及機車取代一般汽油車之比例各達36.7%，為最佳減量組合方案。

關鍵字：二氧化碳氣體、能源、管制方案

一、緣由與目的

我國1990年時因使用能源而排放之CO₂總量為113百萬公噸，每人平均排放量為5.5公噸，但至1995年時總排放量更成長至166百萬公噸，每人平均的CO₂排放量已達7.7公噸^[1]，因此若未加以適當之抑制，至2008年時，我國恐將躍昇成為CO₂高排放量國家之一。

我國雖非聯合國之一員，無法參與「氣候變化綱要公約」所召開之各次會議並締結公約。然而公約對我國之產業及能源政策，仍會造成一定之衝擊，其中又以對發電業、鋼鐵業、化工業、水泥業及運輸業等CO₂排放量較

多之耗能產業衝擊最大^[2]，因此本研究即擬針對因能源使用所產生之CO₂推估計算，並預估其未來之排放量，以及在所預估之排放情形下，研擬為因應「氣候變化綱要公約」所需之CO₂排放管制策略。

本研究主要內容可分為：

1. 計算由1982年至1996年間各部門因能源使用所產生之CO₂排放量，並依據既有之CO₂排放數據預估未來至2020年時之CO₂在未經管制下之排放量情形。
2. 針對交通運輸部門建立數學規劃模式，以研擬CO₂排放抑制策略，並具體評估各項管制策略所可能降低之CO₂排放量。

二、研究方法

2.1 交通運輸部門

本研究將交通運輸部門分為客運運輸及貨運運輸兩大類，其中客運運輸又分為私人載具運輸(包括小客車及機車)及公共客運運輸(包括公路客運、鐵路客運及國內航空客運)，而貨運運輸則以公路貨運及鐵路貨運為主。研究進行之方法與步驟主要如下：

1 基本參數推估

首先根據收集之資料，對歷年來運輸部門之發展及能源使用情形做一分析，以求得相關參數之各經驗預測公式，以其來推估未來交通運輸各部門之運量需求或能源使用情景。

2 管制策略方案研擬

根據所收集之交通運輸相關能源節約及CO₂排放減量策略文獻資料，分析評比擬定各不同之減量對策，將其資料參數化後代入上述之模式中，模擬計算其可能之成效，以評估出針對交通運輸部門CO₂排放減量之可行管制策略。

3 交通運輸部門CO₂排放計算模式之建立

本研究結合上述推估所得之各變數預測公式及其它相關參數，以建立一計算模式，做

為推估未來各年交通運輸部門能源需求及 CO₂ 排放量之工具，並藉此模式來評估加入各策略後之成效影響。

4 策略可行性探討

在建立完整的計算模式後，依先前所擬訂之各策略情景代入模式計算後，再依其模擬計算所得之結果，分析探討其減量之成效及可行性。

5 問卷調查與最佳 CO₂ 減量方案評選

在完成以上各項工作後，本研究再藉由目前國內交通運輸規劃管理等相關領域之專家，對於本研究擬訂之各策略在未來執行時之可行性、成效、優先順序等意見，再依調查所得之結果，分析出最佳可行減量策略，即可據此向決策當局建議在考慮交通運輸的永續發展前提下之最佳可行之 CO₂ 減量方案。

2.2 工業與電力部門

就工業部門，將進行一完整之文獻的資料收集，隨時掌握國內外對於工業部門所排放之 CO₂ 管制狀況。並蒐集國內各產業相關能源使用資料，再根據 IPCC 之排放量計算原則，計算求得工業部門之能源使用量與實際 CO₂ 之排放量，並重新評估我國 CO₂ 之排放強度，以精確掌握我國工業部門之能源使用與 CO₂ 排放量。再依據過去(1982-1996 年)的 CO₂ 排放資料，經由數學線性迴歸分析，推測未來在無任何管制下的排放預測，同時比較工業部門之 CO₂ 排放量與我國國民生產毛額之相關性，並進一步利用經濟成長率來預測我國工業部門至西元 2010 年與 2020 年之排放量。另外，各產業之用電部份排放量計算，是以其產業用電量佔總發電量的比例乘上台電燃燒能源發電所產生之總二氧化碳排放量，即可求得各產業用電之二氧化碳排放量。

電力部門則將推估過去台灣地區能源發電所產生之二氧化碳排放情形，並經由數學迴歸分析與經濟成長率推估未來可能之排放量，以探討國內針對二氧化碳排放抑制方案之可行性。

三、結果討論

3.1 現在及未來各目標年 CO₂ 排放預測

本研究首先對歷年來各部門因能源使用所產生之二氧化碳做一排放量推估，其計算之方式以 IPCC 方法將各部門分成電力與非電力之排放量，再將各部門之非電力部份之排放加

上火力發電所產生 CO₂ 排放即為能源部門之總排放量。另外，藉由 GDP 之成長趨勢，作一 CO₂ 排放量之相關性迴歸預測，表 1 即為各能源部門所推估之現在及未來排放量，之後在評估各種 CO₂ 減量策略時，即與表 1 之結果進行比較。

3.1.1 交通部門 CO₂ 排放量預測

根據模式計算預測未來各目標年交通運輸部門能源需求及 CO₂ 排放量，可得至西元 2000 年時交通運輸部門之 CO₂ 排放量將達 38,615 千公噸，而在本研究中也將以此數值做為 CO₂ 排放迴歸標準值。而後至 2010 年時交通運輸部門之 CO₂ 排放量將達 57,593 千公噸，為 2000 年基準之 1.5 倍，西元 2020 年時 CO₂ 排放量則更達 75,463 千公噸，約為 2000 年之 2 倍左右。可見對於交通運輸部門未來的能源使用及 CO₂ 排放情形，實應加以適當的管制，以減緩其 CO₂ 排放之成長速度。

3.1.2 工業部門之 CO₂ 排放量預測

工業部門最終能源消費與 CO₂ 排放量均位居各部門之首，由於歷年能源之使用均呈穩定成長，以至 1996 年時工業部門總能源消耗為 35600 千公秉油當量，佔全國最終能源消費的 48.48%，而 CO₂ 排放量更攀升為 86.5 百萬公噸，增加幅度高達 2.28 倍。根據過去的 CO₂ 排放統計資料，分別以數學線性迴歸方法，以及排放量與國民生產毛額之相關性分析方法，來推估未來國內工業部門之二氧化碳排放量預測。其 GDP 相關性迴歸和線性迴歸後所得誤差值分別為 3.18%與 4.11%。本研究以 GDP 之成長趨勢之預測分析，來求得未來工業部門之排放量推估，若在目前持續成長趨勢下而沒有作任何減量措施時，預估公年 2020 年時，排放量將達 250.34 百萬噸。

3.1.3 電力部門之 CO₂ 排放量預測

目前我國 CO₂ 的排放情形，電力部門約佔總能源 CO₂ 排放量 32%，其中又以火力發電為主要的來源。由歷年台電火力發電之燃料耗用量計算得知，到 1997 年時，CO₂ 的排放量超過了 67 百萬噸，且有增加的趨勢，而其中大部份是由煤炭所產生，約佔了 6 成以上。

根據過去的 CO₂ 排放統計資料，對過去國民實值生產毛額(GDP)與其未來之成長預測做一相關性分析，再以數學線性迴歸方法推估未來之排放量做為比較，結果顯示若以 GDP 成長預測來推估未來國內電力部門之二氧化碳排放量，其值會較以數學迴歸方式所推估的值更

為接近未來實際的成長值，兩者誤差值分別為 6.6%與 9.5%。經由 GDP 的預測，預估至 2020 年其排放量將比公元 2000 年時成長將近 2.6 倍，達 203 百萬噸。

3.2 運輸部門之個別策略對 CO₂ 排放減量成效之探討

由模式模擬所得之結果，就 CO₂ 排放減量的成效而言，應以燃油效率標準(CAFE)的提升、航空客運的轉移及健全大眾運輸系統以減少私人載具的使用為較優先考量策略，而電動車的使用以電動小客車的取代效果較電動機車的取代效果來的佳，且其若能輔以發電效率的提升，再生能源的使用(發電)則可達到最佳的減量效果。

3.3 運輸部門之 CO₂ 排放回歸減量綜合策略成效分析

在本研究中，對於交通運輸部門將採西元 2000 年之 CO₂ 排放量做為回歸基準年之基本，並在兼顧我國及國際情勢下，各以西元 2010 年及 2020 年做為 CO₂ 排放回歸目標年，進行各策略之分析及擬訂研究。

在技術可行極限下或合理的假設範圍內探討混合策略之實施對於 CO₂ 減量之成效初步分析結果如圖 1 所示，由圖中可得到以下結論：

在綜合策略的實施時，對於整體交通運輸部門 CO₂ 減量成效之影響大小依序為：平均燃油效率的實施、航空運輸的轉移、電動車的使用、私人載具的限制及 LPG 替代燃料的使用。如缺乏平均燃油效率的實施或航空運輸的轉移策略任何一者時，皆無法在各目標年達成迴歸排放水準之減量目標。顯示在本研究中，這二個減量策略將是未來影響到交通運輸部門之 CO₂ 減量，是否能迴歸至 2000 年標準之關鍵策略。

若欲再迴歸至 1990 年之水平(交通運輸部門之排放量為 21,360 千公噸，約為 2000 年時之 0.55 倍)，則以本研究中所提及之策略皆無法達成，其顯示在未來若依國際之要求一定得迴歸至 1990 之水平時，則於交通運輸部門方面，勢必要有更多，更嚴格的減量策略方有可能達成。

基於以上各策略之分析，可知如以 CO₂ 的減量回歸為目標，在實施策略的選擇方面，則應以平均燃油效率(CAFE)的提昇、減少私人載具的使用、航空運輸的轉移、電動小客車、電動機車的使用等五類為主要的策略來執行。

因此依據上述之五項策略，於技術可行或合理假設範圍內，依不同改善率目標來組合，以求取可達成自 2010 年之後，交通運輸部門之 CO₂ 排放水平皆能低於 2000 年排放量的回歸減量目標所需之方案。由模式計算可得到以下四個代表性的“臨界方案”如表 2 所示。所謂“臨界方案”意指這些方案中各策略所需完成的改善率，為達到回歸減量目標時至少所需達到的最低改善率。

由以上四種方案任何一種實施時，皆可達到 CO₂ 排放減量回歸至 2000 年之標準。且可知在回歸減量的目標下，未來必定要將平均燃油效率的提昇目標訂在年增率 2.5%以上，及航空運輸的轉移至少要達到 30%以上及電動小客車取代年增率達 1.5%以上，再配合其它的策略方可能達到 CO₂ 回歸減量的目標。如此看來未來交通運輸部門之 CO₂ 排放量若欲迴歸至 2000 年之水平時，則依上述之五種減量策略實施時，將顯得相當不易(因各方案大多需達到其策略實施上限值，方可達成迴歸目標)，因此未來若能有其它策略的規劃加入，將有助於更容易達成減量目標。

為了從各可達成回歸目標之減量方案中，尋求出一最佳之可行減量方案，本研究藉由問卷調查之結果如表 3，對各方案做一加權分析，結果如圖 2 所示。由結果可知無論是策略施行的難易度(代入第一加權係數)或必要性(代入第二加權係數)來評估最佳減量方案時，方案四皆顯示應是最好的選擇方案，因此當以總加權係數來評估時，亦得到方案四為最佳的減量選擇方案。

由上所得之最佳方案乃基於問卷調查及針對於交通運輸部門之 CO₂ 的排放減量為主之前提下所得到之答案，由其結果亦可得知，較佳策略的選擇傾向於使用最少的電動車輛取代(問卷調查結果顯示其技術困難度較高)。但若考慮了現行已實施的政策配合方面(目前電動機車的發展為政府所大力推動中)，則可考慮選擇以方案三為未來最可行之較佳減量方案。

四、結論

1. 根據本研究預測所得，交通運輸部門 CO₂ 排放量至 2000 年時 CO₂ 排放量將達 38,615 千公噸，而至 2020 年時則更達 75,463 千公噸，約為 2000 年之 2 倍左右；而工業部門在以 GDP 之成長趨勢之預測分析下求得未來之排放量，預估在公元 2000 年至 2020 年時，排放量將成長近 2.5 倍多，達 250.3 百萬噸；國內電力部門之二氧化碳排放量

經推估後，至 2020 年時其排放量將比公元 2000 年時成長將近 2.6 倍，達 203 百萬噸。可見對於交通運輸部門未來的 CO₂ 排放情形實應加以適當的管制，以削減其 CO₂ 排放之成長速度。

2. 在技術可行極限下或合理的假設範圍內，策略之實施對交通運輸部門 CO₂ 減量影響大小依序為：平均燃油效率的提昇、航空運輸的轉移、電動車的使用、私人載具的限制及 LPG 替代燃料的使用。
3. 在多個可達成回歸至目標年之方案組合中，若考慮問卷調查結果所得之加權係數，則最佳減量方案組合為在 2020 年時“燃油效率標準需較現今提昇 68%，航空運輸需轉移 40%由高鐵乘載，限制 20%之私人載具使用量，電動小客車取代一般汽油車之比例達 51.6%”。
4. 但若考慮現行電動機車之推動情形，則可選擇以“燃油效率標準需較現今提昇 68%，航空運輸 40%運輸量需轉由高鐵乘載，此外尚需限制 20%之私人載具使用量，及電動小客車及機車之取代傳統燃油車輛比例各達 36.7%”，為較佳減量組合方案。

五、對空污防治之重要成效

本計畫完成後，已能有效模擬交通運輸部門在各可行性減量策略後所可能達到之具體成效，因此研究之成果將可提供我國相關決策單位（如環保署、交通部、經濟部等）在因應對於溫室氣體效應之管制參考，做為往後二氧化碳排放減量策略規劃之重要依據。

此外由本研究成果與交通運輸研究所之資料比較可發現，先前交通運輸研究所對 CO₂ 排放減量所作之規劃所得之排放量，與回歸目標之排放尚有一段差距，因此應規劃加入其它的行量策略或者加嚴其管制項目，方能抑低更多的 CO₂ 排放，以達到在 2020 年時回歸至 2000 年排放量之目的，因為交通運輸部門若無法達成回歸目標，則其增加之排放量勢必得移轉至其他部門（如工業、電力部門）來完成減量目標，如此對經濟衝擊將更大，因此本計畫所建議之減量方案，值得相關單位參考。

另外對於工業與電力部門方面，亦已完成排放量推估工作和未來可能之排放量成長預測成析，將有助於了解國內目前之 CO₂ 排放情形，與未來所需要採取之減量措施與減量目標，以提供一完整減量管制之參考依據。

六、參考文獻

1. 汪雅康，“全球變遷之因應：產業發展政策之因應”，邁向二十一世紀全球變遷之衝擊與因應研討會論文集第 96-105 頁，台灣大學全球變遷中心及環境品質文教基金會，民國 86 年。
2. 柳中明、劉銘龍、張品青，“能源與二氧化碳排放減量”，全球變遷通訊，第 16 期，第 1 至 9 頁，台灣大學全球變遷研究中心，民國 86 年 12 月。
3. 楊任徵，“二氧化碳長期減量策略之規劃與評估研究計畫”，經濟部能源委員會。

表 1:能源各部門未來排放成長推估分析表

單位:千公噸

年份	交通運輸部門	工業部門	電力部門
1995	32,610	83,178	56,810
1996	33,896	86,568	60,330
2000	38,615	110,070	79,394
2005	48,299	141,882	107,426
2010	57,593	175,227	136,808
2015	66,645	211,796	169,033
2020	75,463	250,340	202,996

表 2:達成回歸減量目標時之臨界方案

	平均燃油效率提昇	航空運量轉移	減少私人載具使用	電動小客車取代率	電動機車取代率
方案一	2.5%	30.0%	1.0%	2.0%	2.0%
方案二	2.5%	40.0%	0.5%	2.0%	1.5%
方案三	2.5%	40.0%	1.0%	1.5%	1.5%
方案四	2.5%	40.0%	1.0%	2.0%	0.0%

表 3:問卷調查結果表

	總加權數	策略實施效果大小		策略實施難度		策略實施必要性		策略實施先後順序	
		平均	變異數	平均	變異數	平均	變異數	平均	變異數
平均燃油效率提昇	4.7	3.3	1.0	3.0	0.6	4.3	0.5	3.1	2.6
航空運輸轉移高鐵路	4.8	3.2	0.3	3.4	0.6	3.8	1.1	3.6	2.9
減少私人載具使用	3.9	4.3	0.8	3.4	0.9	4.7	0.4	1.8	1.6
電動汽車的使用	6.5	3.4	1.0	2.3	0.2	3.2	1.0	4.8	1.0
電動機車的使用	5.6	3.5	1.0	2.8	0.5	3.6	1.2	3.5	2.4

註:策略實施效果大小:(非常好:5 好:4 中等:3 差:2 無效果:1)
 策略實施難易度:(非常容易:5 容易:4 中等:3 困難:2 不可能:1)
 策略實施必要性:(非常必要:5 必要:4 中等:3 不大必要:2 不必要:1)

圖 1:綜合方案之成效比較圖

圖 2:最佳減量方案評選結果圖

