

國立交通大學
運輸科技與管理學系碩士班

碩士論文

燃料電池公車成本結構
與市場潛力分析之研究

**The Study on the Cost Structures and
Market Potential of Fuel Cell Bus**

研究生：蕭易呈

指導教授：許巧鶯

中華民國九十四年六月

燃料電池公車成本結構與市場潛力分析之研究

The Study on the Cost Structures and Market Potential of Fuel Cell Bus

研 究 生：蕭易呈

Student : Yi-Cheng Hsiao

指導教授：許巧鶯

Advisor: Chaung-Ing Hsu

國 立 交 通 大 學
運 輸 科 技 與 管 理 學 系
碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Department of Transportation Technology & Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Transportation Technology and Management

June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 四 年 六 月

燃料電池公車成本結構與市場潛力分析之研究

研究生：蕭易呈

指導教授：許巧鶯

國立交通大學運輸科技與管理學系碩士班

摘要

目前人類面臨化石能源耗竭與環境污染兩大問題，有鑑於此，發展高效率的環保性運具來取代傳統燃油運具已勢在必行。燃料電池運具之駕駛操作性能已發展至與現有燃油運具性能接近，且其零污染排放之特性最為各界所關注，唯獨其成本結構仍居高不下。由於公車之體積與污染排放量均較一般自小客車來得高，故燃料電池公車應是目前現階段最環保同時亦最具發展潛力之大眾運輸工具。

本研究在供需互動架構下，以解析性方法構建公車業者採用燃料電池公車之相關供給成本模式與需求模式，成本模式分兩大部份，包括燃料電池車輛成本與氫能供應站成本，燃料電池車輛成本方面，主要考量車輛折舊成本、車輛維修成本與氫能成本，氫能供應站成本則有平均設置成本、平均營運成本與設備維護成本；而需求模式之主要影響變數則有車輛購置成本、單位里程燃料成本、車輛最高速度與單位里程之污染量。此外，本研究利用灰色理論預測未來燃油價格與氫能價格之趨勢走向，藉以分析燃料價格之變化對公車業者營運成本之影響。本研究進一步考量政府部門之補貼預算限制，並在最小化社會總成本之目標下，構建補貼數學規劃模式，以決定業者均衡使用量與最適資本補貼與績效補貼額度。

研究結果顯示，透過政府之補貼可提高公車業者使用燃料電池公車之意願，至 2021 年左右，燃料電池公車相對於燃油公車已具有相當程度之競爭力；此外，公車業者未來使用量愈多，空氣污染之減量成效愈彰，能源節約效益亦隨之愈大；在多次績效補貼方面，補貼額逐年減少，且越晚採用補貼次數越少，至 2021 年左右，因燃料電池公車系統之總成本低於燃油公車系統總成本，故自該年起可停止實施績效補貼；在外部成本改善之效益方面，改善空氣污染之績效補貼初期較不具效益，但透過政府部門相關之補貼機制，其成本效益將逐漸彰顯。研究結果可供政府部門於未來推動燃料電池公車相關規劃之參考依據。

關鍵字：燃料電池、成本結構、燃料電池公車、氫能、外部成本、補貼

The Study on the Cost Structures and Market Potential of Fuel Cell Bus

Student: Yi-Cheng Hsiao

Advisor: Chaug-Ing Hsu

Department of (Institute) Transportation Technology and Management
National Chiao Tung University

Abstract

At present, human face two crucial problems of fossil fuel energy depletion and environmental pollution. Thus, developing high-efficiency environment-friendly vehicles to replace traditional oil-fueled vehicles has become an important issue. The driving performances of fuel cell vehicles have been developed to approach oil-fueled vehicles. Those vehicles have the characteristics of zero pollution emission, yet their costs still remain relatively high. The size and pollution emission of buses are larger than other vehicles, so the fuel cell bus should be the more environment-friendly and potential-developed vehicle.

This study explores the interaction between supply and demand of fuel-cell buses, and formulates supply cost functions and demand model using analytical approach. The cost function is divided into two parts, including fuel cell bus costs and hydrogen refueling station cost. Fuel cell bus cost includes depreciation cost, maintenance cost and hydrogen cost; while hydrogen refueling station cost includes average establishment cost, average operation cost and equipment repair cost. Variables affecting fuel cell bus demand function are bus purchase cost, fuel cost per unit mileage, the maximum speed and pollution emission per unit mileage. In addition, this study applies gray theory to predict the trend of oil price and hydrogen price, and analyzes the influence due to the change in fuel-price differences on bus operators' cost. Moreover, a mathematical programming model is formulated to determine the equilibrium demand volumes and the optimal capital subsidy and air-pollution performance subsidy by minimizing the total social cost subject to government subsidy budget.

The results of the case study show that the government subsidy can increase the fuel-cell bus usage of bus operators, and at year 2021, fuel cell buses will have the competitive advantage over oil-fueled vehicles. In addition, the more fuel-cell buses bus operators adopt, the more air pollution will be decreased, and the more energy will be saved. Regarding performance subsidy, the amount and frequency of subsidy is decreasing year by year, thereby performance subsidy policy can be discontinued at year 2021, at which the total costs of fuel cell buses are less than the total costs of oil-fueled ones. Finally, through implementing the government's subsidy policy, the benefits of pollution and energy saving are shown to be manifested with the increased years.

Key Words : Fuel Cell 、Cost Structure 、Fuel Cell Bus 、Hydrogen 、External Cost 、Subsidy

誌謝

本論文得以完成，首先感謝恩師 許巧鶯教授於論文研究期間的悉心指導與鼓勵，從觀念的啟發乃至於生活上之待人處事，均讓學生受益無窮，尤其「嚴謹」的治學態度更令學生印象深刻，種種的收穫使學生得以面臨人生往後的挑戰，學生永遠感銘於心。論文進度審查期間，感謝本系張新立教授與吳水威副教授細心審閱；論文研討期間，感謝本系卓訓榮教授與吳水威副教授所提供之寶貴意見，使本論文更臻完善；論文口試期間，承蒙系上吳水威副教授與任維廉副教授撥冗細審與指正，並提供寶貴意見，使本論文疏漏謬誤之處得以斧正。授業期間，感謝系上老師們的教導以及系上助理幸榮姐、秀蔭姐行政事務上的幫忙與協助，在此一併致謝。

兩年研究所的生活將畫上句號，從一開始研究方向的找尋、研究內容一再的修改，時而挑燈熬夜的孤軍奮戰，至最終論文的開花結果，過程可說是以絞盡腦汁的焦慮與找到靈感的喜悅交織而成，這些點點滴滴都已無形烙印在本論文裡，成為論文中無法抹滅的一體，使我印象深刻。

在學期間，感謝研究室清成學長的鼓勵，很榮幸能跟你一起畢業；志青學長於課業上的協助；幼屏學姊的溫馨台中便車以及當媽初體驗的美珠學姊課業上的幫忙。此外，研究室大姐大慧潔學姊的關心、照顧與鼓勵實為重要；同鄉人大乃以及偉哲來自 MSN 上的關心亦倍感窩心；LAB 一哥憲宏的大嗓子讓整個研究室充滿歡笑氣氛，還有那香醇的咖啡；吃不飽的大象要多外出走動，不要一直停留在研究室吹著冷氣腳踩著踏步機嘴裡還啃著食物的階段，不過，仍要謝謝妳於運規助教期間的協助；好兄弟剛伯的互切互磋使我功力增進不少，跟美好要趕快加緊腳步，結婚時別忘了寄喜帖給我；運動很勤勞的阿昌要持續下去，做大象的榜樣；同是棒球迷的舜輔，讓我隨時能掌握王建民的最新動態；每次開門都嚇到我的靨青，希望我是最後一個受害者；看似憨厚的立弘，我一定要看到你喝完酒還能做研究的功力；還有 94 級畢業的同學，感謝你們一路上的陪伴與歡笑，讓本屆許 LAB 只有一個碩士班畢業生的我不致感到孤寂。

感謝上帝這兩年的保守與看顧，讓我有健全的身心靈面對這兩年研究所種種的挑戰與考驗，也要感謝辛苦養育我以及栽培我的父母親，從小到大回饋給你們的總是失望多過於欣慰，但這次我總算達成了你們的期許，沒讓你們再次失望；此外，外婆不曾間斷的代禱與鼓勵更使我銘記於心；遠在英國攻讀博士的哥哥，雖然這兩年我們兄弟倆間的聯絡不算頻繁，但過程中總是會想到你在他鄉的生活等各方面都比我辛苦，無形中刺激了我要堅持到底的動力，才讓我的論文得以順利完成，此時此刻，我即將邁向人生另一個階段，蕭家接下來的任務就交由你繼續完成，加油！另外，也要感謝家鄉屏東潮州的眾親朋好友，正牌老字號最有口碑的銀光美術燈全家福、家喻戶曉的知名作家曾寬、號稱雞王的郭爸與郭媽、幽默風趣的江叔叔與英文一流的郭老師以及潮州聖教會所有會友等族繁不及備載，感謝你們這兩年來的關心、代禱與鼓勵。當然，還有最重要的采瀨，沒有妳，本論文將不會如此順利完成，過程中的辛苦與歡笑妳都有參與，從研究初期的惶恐，到趕年會論文期間仍心繫奧運比賽的樂趣、國科會計畫案，乃至於最後準備口試的心情起伏，妳至始至終都從未缺席，謝謝妳一路走來的鼓勵、支持、體恤與付出，也

謝謝妳家人的關心，望妳之後的教育之路能夠順利。

最後謹將本論文獻給我最愛的爸爸、媽媽、哥哥、外婆與所有關心我的親朋好友，你們的鼓勵是我完成論文的動力，謹將這份成果以及榮耀與你們分享。

蕭易呈

風城交大綜合一館十樓研究室

民國九十四年七月 盛夏

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	v
表目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
符號說明.....	xi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	5
1.3 研究範圍與對象.....	7
1.4 研究方法與架構.....	7
第二章 文獻回顧.....	11
2.1 燃料電池.....	11
2.1.1 燃料電池發展歷史.....	11
2.1.2 燃料電池之工作原理.....	11
2.1.3 燃料電池之種類.....	13
2.1.4 燃料電池之應用.....	16
2.1.5 燃料電池發展現況與市場演進狀況.....	16
2.2 低污染公車.....	18
2.3 燃料電池車發展現況.....	20
2.4 灰色理論應用於交通運輸上.....	24
2.5 大眾運輸之補貼.....	29
第三章 燃料電池公車系統模式構建.....	35

3.1 基本觀念與分析.....	35
3.2 公車業者需求模式構建.....	40
3.3 燃料電池公車系統成本模式構建.....	42
3.3.1 燃料電池車輛成本.....	42
3.3.2 氫能供應站成本.....	44
3.4 兩種公車系統成本變化之分析.....	46
3.4.1 未來燃油價格與氫能價格之變化分析.....	46
3.4.2 燃料電池公車與燃油公車成本之變化分析.....	54
 第四章 空氣污染改善效益與補貼規劃模式.....	 64
4.1 基本分析.....	64
4.2 空氣污染改善效益分析.....	65
4.3 補貼分析.....	68
4.4 政府補貼規劃模式.....	70
 第五章 範例分析.....	 73
5.1 基本參變數之設定.....	73
5.2 輸出結果與補貼分析.....	77
5.3 空氣污染改善效益分析.....	84
5.4 敏感度分析.....	94
 第六章 結論與建議.....	 114
6.1 結論.....	114
6.2 建議.....	115
 參考文獻.....	 117

表目錄

表 2-1 各類型燃料電池之特性與優缺點.....	15
表 2-2 各類型低污染公車之技術特性與優缺點.....	18
表 2-3 燃料電池車相關文獻.....	23
表 2-4 灰色理論應用在交通運輸之相關文獻.....	28
表 2-5 各種補貼方式之優缺點比較.....	31
表 2-6 大眾運輸補貼相關文獻整理列表.....	34
表 3-1 歷年高級柴油價格實際值與未來預測值.....	47
表 3-2 歷年製氫方式與其對應之氫能價格表.....	49
表 3-3 歷年氫能價格表.....	51
表 3-4 歷年氫能價格平均值與未來預測值.....	51
表 3-5 燃料電池公車與燃油公車各項成本統計列表.....	55
表 4-1 環保署補助汽車客運業更新車輛補助標準.....	68
表 5-1 兩家客運公司營運資料參數設定表.....	73
表 5-2 燃料電池公車系統相關成本參數設定表.....	74
表 5-3 空氣污染相關參數設定值.....	76
表 5-4 需求模式效用函數參數值.....	77
表 5-5 兩家客運公司使用情形輸出結果.....	77
表 5-6 S 公司每年所須負擔之成本明細表.....	80
表 5-7 T 公司每年所須負擔之成本明細表.....	81
表 5-8 兩家客運公司 2005 年使用燃料電池公車前後對一般空氣污染物排放之影響..	84
表 5-9 兩家客運公司 2005 年使用燃料電池公車前後對二氧化碳排放之影響.....	85
表 5-10 S 公司各路線使用燃料電池公車前後整體空氣污染物排放情形.....	87
表 5-11 T 公司各路線使用燃料電池公車前後整體空氣污染物排放情形.....	88
表 5-12 S 公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益.....	90

表 5-13 T 公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益.....	92
表 5-14 敏感度分析輸出結果.....	94
表 5-15 S 公司於 2005 年至 2008 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	103
表 5-16 S 公司於 2009 年至 2012 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	104
表 5-17 S 公司於 2013 年至 2015 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	105
表 5-18 S 公司於 2016 年至 2019 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	105
表 5-19 T 公司於 2005 年至 2008 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	106
表 5-20 T 公司於 2009 年至 2012 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	107
表 5-21 T 公司於 2013 年至 2015 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	107
表 5-22 T 公司於 2016 年至 2019 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼.....	108

圖目錄

圖 1-1 研究架構圖.....	9
圖 1-2 研究流程圖.....	10
圖 2-1 燃料電池直接發電與傳統間接發電的比較.....	12
圖 2-2 燃料電池基本反應圖.....	13
圖 2-3 燃料電池演進階段.....	17
圖 2-4 補貼方式分類圖.....	30
圖 3-1 各部門於民國 86 年能源使用比例圖.....	37
圖 3-2 公路運輸汽油使用分配狀況.....	38
圖 3-3 公路運輸柴油使用分配狀況.....	38
圖 3-4 高級柴油價格未來趨勢圖.....	48
圖 3-5 氫能價格未來趨勢圖.....	53
圖 3-6 高級柴油與氫能價格未來趨勢比較圖.....	54
圖 3-7 兩公車系統每年所需攤提之固定成本比較圖.....	56
圖 3-8 燃料電池公車購置成本與產量變化趨勢.....	57
圖 3-9 現有柴油公車系統總成本變化趨勢.....	58
圖 3-10 兩種燃料成本未來變化趨勢.....	59
圖 3-11 柴油公車系統總成本與固定成本趨勢比較圖.....	60
圖 3-12 燃料電池公車系統總成本未來變化趨勢.....	61
圖 3-13 燃料電池公車系統總成本與各成本項趨勢比較圖.....	62
圖 4-1 空氣污染改善成效觀念架構圖.....	65
圖 5-1 S 公司各項補貼比例圖.....	79
圖 5-2 T 公司各項補貼比例圖.....	79
圖 5-3 兩家客運公司各車輛成本項比較圖.....	82
圖 5-4 兩家客運公司氫能供應站各成本項比較圖.....	82

圖 5-5 S 公司各成本項所佔比例圖.....	83
圖 5-6 T 公司各成本項所佔比例圖.....	83
圖 5-7 兩家公司使用燃料電池公車前後對一般空氣污染物之排放情形.....	85
圖 5-8 兩家公司使用燃料電池公車前後對二氧化碳之排放情形.....	86
圖 5-9 兩家公司使用燃料電池公車後對整體空氣污染減量之貢獻程度.....	89
圖 5-10 S 公司各營運路線能源節約效益.....	91
圖 5-11 T 公司各營運路線能源節約效益.....	93
圖 5-12 兩家公司使用量逐年變化曲線.....	96
圖 5-13 兩家公司氫能成本未來變化曲線.....	97
圖 5-14 兩家公司對於整體空氣污染減量情形未來變化趨勢.....	98
圖 5-15 兩家公司對於能源節約量之貢獻未來變化趨勢.....	99
圖 5-16 兩家公司能源節約效益未來變化趨勢.....	99
圖 5-17 兩家公司未來對外部成本改善之變化情形.....	100
圖 5-18 兩家公司未來購置單位車輛之補貼變化情形.....	101
圖 5-19 兩家公司未來使用燃料電池公車與否之總成本變化圖.....	102
圖 5-20 兩家公司未來空氣污染改善之績效補貼變化情形.....	102
圖 5-21 S 公司未來各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼情形.....	109
圖 5-22 T 公司未來各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼情形.....	109
圖 5-23 兩家公司於 2005 年使用燃料電池公車與否之所造成累積外部成本....	110
圖 5-24 兩家公司於 2005 年使用燃料電池公車後之累積成本效益曲線變化圖.	111
圖 5-25 外部成本改善之成本效益曲線圖.....	112
圖 5-26 兩家公司對於能源節約之成本效益曲線圖.....	112

符號說明

U_i^{FB}	: 業者 <i>i</i> 對燃料電池公車之效用值
U_i^{TB}	: 業者 <i>i</i> 對燃油公車之效用值
P_{FB}'	: 政府補貼後之燃料電池公車單位車輛購置成本
P_{TB}	: 燃油公車之單位車輛購置成本
R_i	: 公車業者 <i>i</i> 之平均總收益
P_H	: 單位氫能價格
P_O	: 單位燃油價格
L_H	: 單位氫能所能行駛距離
L_O	: 單位燃油所能行駛距離
V_{FB}	: 燃料電池公車最高速度
V_{TB}	: 燃油公車最高速度
η_{FB}	: 燃料電池公車單位里程污染排放率
η_{TB}	: 燃油公車單位里程污染排放率
θ_i	: 業者 <i>i</i> 選擇燃料電池公車之機率
N_{ij}	: 公車業者 <i>i</i> 在其服務範圍內路線 <i>j</i> 現有之平均營運車輛數
D_{ij}^{FB}	: 公車業者 <i>i</i> 於路線 <i>j</i> 對燃料電池公車之需求量
$C_{FB,i}^B$: 業者 <i>i</i> 所需之車輛購置成本
$C_{FB,i}^D$: 公車業者 <i>i</i> 每年所需負擔之車輛折舊成本
$C_{FB,i}^M$: 業者 <i>i</i> 每年所須負擔之車輛維修成本
$C_{FB,i}^H$: 公車業者 <i>i</i> 每年所需負擔之氫能成本
σ	: 折舊率
t	: 車輛使用年限
h	: 平均車齡
U_m	: 燃料電池公車單位里程之車輛維修成本
Q_i	: 公車業者 <i>i</i> 之單一燃料電池公車每年平均所需之氫能總量
X_{gu}	: 年利率為 <i>g</i> ，使用年限為 <i>u</i> 年之資本回復因子
C_i^E	: 電解槽運作成本
U_w	: 單位電能成本
E_i	: 供應站設備每年所需耗費之電能

- CP : 壓縮機之電力參數
 P : 操作環境下之壓力值
 P_{Min} : 最小壓力值
 P_C : 壓縮機本身之壓力值
 C_{SR} : 量儲氫容器每年運作所需之成本
 $C_{FS,i}^D$: 公車業者 i 每年所需分攤之平均設置成本
 $C_{FS,i}^O$: 公車業者 i 每年所需之氫能供應站平均營運成本
 $C_{FS,i}^M$: 公車業者 i 每年所須負擔之氫能供應站設備維護成本
 A : 氫能供應站設備例行預防保養成本
 G_i : 公車業者 i 之氫能供應站設備年使用率
 q : 每日可服務車輛數
 w : 公車業者每年營運日數
 Ca : 每輛燃料電池公車之儲氫容量
 f_m : 氫能供應站每年之管理費用
 TC_i : 公車業者 i 每年所需負擔之總成本
 λ_{TB} : 燃油公車一般空氣污染物單位里程之排放率
 λ_{FB} : 料電池公車一般空氣污染物單位里程之排放率
 AB_i : 公車業者 i 未使用燃料電池公車前之一般空氣污染量
 AA_i : 公車業者 i 引入燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 營運時之一般空氣污染量
 AR_i : 公車業者 i 使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 之一般空氣污染物減量成效
 δ_A : 一般空氣污染物之單位外部成本
 ARC_i : 公車業者 i 使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 營運所節省之一般空氣污染物外部成本
 ϕ_{TB} : 燃油公車二氧化碳單位里程排放率
 ϕ_{FB} : 燃料電池公車二氧化碳單位里程排放率
 CR_i : 公車業者 i 使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 每年對二氧化碳減量成效
 δ_C : 二氧化碳單位外部成本
 CRC_i : 公車業者 i 使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 營運所節省之二氧化碳外部成本
 η_{TB} : 燃油公車單位里程之所有空氣污染物排放率

- EC_i : 公車業者*i*引入燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 所造成之外部成本
 OR_i : 公車業者*i*每年節省之柴油量
 ORC_i : 公車業者*i*每年之柴油節約效益
 STC : 社會總成本
 m_{1i} : 政府對公車業者*i*購置單位燃料電池車輛之補貼
 m_{2i} : 政府對公車業者*i*設置氫能供應站之補貼
 m_{3i} : 政府對公車業者*i*改善單位空氣污染之補貼
 H_i : 業者*i*單位里程營運成本
 B_1 : 中央政府補貼預算
 B_2 : 地方政府補貼預算

第一章、緒論

1.1 研究背景與動機

隨著國內民眾國民所得增加及生活水準逐年提高之情形下，私人運具之使用密度逐年攀升，對於小海島型國家的台灣而言已趨近飽和狀況。以大台北都會區為例，根據交通部統計處(民 89)資料指出，該地區登記小客車數已高達 120 萬以上，此數據顯示，在科技進步之帶動下，人類的經濟活動得以藉由運輸行為而快速發展；然而，私人運具之便利性在滿足從事經濟活動下，卻也隨之帶來危機，根據 1997 年英國石油統計報導，化石能源 (Fossil Energy) 經過人類大量消耗之後，其存量僅能夠再用半個世紀(左峻德，民 90)，而人類濫用資源的結果即造成地球環境原本存在生產、消費與再生資源 (Recover and Regenerate Resources) 之平衡機制嚴重失衡，使得生態環境遭受破壞之程度超過環境自然復原之能力，進而使人類所處的自然環境承受永久性之破壞，如二氧化碳濃度持續增加，繼而使全球氣溫亦逐年隨之攀升，此對於長期以化石能源 (Fossil Energy) 為燃料之交通運具而言，無疑不是一項衝擊；此外，由交通運具所造成之移動性污染物亦佔空氣污染的極大比例 (中華民國環境工程學會，民 87)。目前人類於交通運輸上已面臨能源耗竭與環境污染兩大問題，因此，該如何節約能源並減少污染已成為全球產官學各界所共同關心之課題。

在能源使用方面，根據經濟部能源委員會年報(民 92)指出，九十一年國內能源總消費為 10,006 萬公秉油當量，較九十年增加 5.52%，若將能源消費部門細分為工業、運輸、農業、住宅、商業與其他等六大部門時，工業為最主要之能源耗用部門，九十一年消費比重為 57.86%，運輸部門則因國民所得提高、道路交通網路之完善與汽、機車等運輸工具之普及而居次之，占 15.25%；若以能源消費成長率觀之，工業部門之 7.01% 能源消費成長率仍為最高，運輸部門消費成長率 4.38% 次之，是故，運輸業驚人之能源消耗量可見一斑。另外，經濟部能源委員會(民 87)針對世界能源情勢指出，過去十年間 (1987 年至 1997 年)，世界總初級能源消費之年平均成長率為 1.5%，依能源別分析，石油為世界上消費最多之能源，但受能源危機與環保團體之影響，世界各國均已警覺此問題之嚴重性，紛紛降低對石油之依賴，過去十年來石油消費比例由 1987 年的 40.1% 下降至 1997 年的 39.9%，而對於未來能源消費情形，其預估 1997 年至 2015 年間世界總初級能源消費之年平均成長率將達 2.8%，其中，在化石燃料部分，消費量將穩定增加，預估年平均成長率分別為石油 2.5%，煤炭 2.2%，天然氣 3.4%；但若就世界原油總需求而言，未來仍將呈現穩定增加之趨勢，估計 1997 年至 2015 年間年平均成長率約為 2.6%。這些統計數據顯示出未來運輸部門能源使用之需求有可能持續成長，故如何運用有限之資源與找尋新替代能源便成為我們此刻必須努力之目標。

在環境污染方面，由於過去我國為了促進經濟發展，工業部門不斷投入能源以促進生產，私人運具數量亦隨國民所得提升而快速成長，進而導致運輸部門能源消費量劇增，加上來自其他各部門之能源消費下，致使空氣品質嚴重惡化，增加能源消費的社會成本；而交通運具之排放物為一巨大之移動性污染源，其占總氣體污染物的一半以上，且隨著國內私人運具使用比例急速攀升，此一移動性污染源排放量勢必會再增加。根據1995年統計資料顯示，台灣地區空氣污染物每年排放總量估計有598萬公噸，其中一氧化碳、碳氫化合物、氮氧化物分別為255萬公噸、99萬公噸及71萬公噸，此大部分來自交通工具污染（中華民國環境工程學會，民87）。現今的運輸部門所使用之化石能源會造成溫室效應、酸雨、空氣污染等環境災害問題，進而嚴重影響人類的健康，此一議題已隨國民生活水準提高與環保意識之逐漸抬頭而日益受到重視。Whitelegg (1993)指出，運輸成長帶來了環保與資源的相關問題，而運具對化石燃料的需求則造成了環境衝擊的快速成長，且這些衝擊大部分發生於已開發國家；Greene and Wegener (1997)研究指出，由於現今的運輸缺乏永續性，故關於運輸系統的技術、設計與營運及財務須有基本的改變，且在全球的石油資源有限的情形下，永續發展並非即刻必須停止消耗石油，而是必須改善使用與生產石油的方式，並且尋找替代方案。對此，電動車輛即被認為是解決移動性污染源的一個途徑，但以目前市面上發展之電動車而言，雖經過許多技術上之嘗試，但結果總不令人滿意，主要癥結在於做為電動車輛之充電電池功率密度低，不能滿足汽車性能之要求，且其電力推進系統之功率比使用化石燃料之內燃機(Internal Combustion Engine)要低；此外，傳統燃油車輛所使用之汽油或柴油可儲存在油箱中，但以電動車為主之電能則儲存在蓄電池中，然而蓄電池之缺點是可提供之動力也僅是傳統內燃機可提供動力之一小部分，且燃油車輛之油箱加油簡單、方便、快速，而電動車之蓄電池需特殊之充電設備，且充電時間長(李瑛等，民89)。另一方面，現有電動車雖可降空氣污染量，但其所使用之鉛酸或鎳氫等多類之電池，卻會造成電廠污染量之增加，在計算電廠污染時，需依電動車充電時所使用之電量佔總電量發電之比例，將電廠所造成之污染分配至電動車所造成之污染，同時，車輛所使用之電池亦會二次污染，因廢棄電池中殘留重金屬，且重金屬又不易被人體排出，若累積至一定量之後，即會產生癌症類之病變，對身體機能造成嚴重之傷害(交通部運輸研究所，民87)；另外，在功能方面，現有電動車很難滿足消費者的需求，其主要原因為成本過高、充電站不普及、續航力不足等問題。

由於化石能源有限，使人類於交通運輸方面必須面對開發新能源與降低環境污染之課題，此代表我們需間接朝永續發展之方向努力，而永續發展之觀念延伸至交通運輸領域即為永續運輸(Sustainable Transportation)，其意味以新興能源取代現有運具所使用之燃料且不損及環境生態。過去之研究對此方面之議題亦有做探討，許卜仁(民92)建立永續運輸發展之評估架構，並以其作為最佳化評估之準則，接續發展出永續運輸指標與策略之整合模式，並利用多準則最佳化之妥協排序法，提出永續運輸策略之優先次序，研究結果建議逐步規劃燃料稅費隨油徵收，以反映空氣污染所造成社會成本之損失，同時推動低污染能源運具發展，且發展目前高污染化石燃料之替代能源，以降低溫室氣體之排放。經濟部能源委員會(民87)指出，運輸使用能源占總能源使用之比重日益增加，

以致運輸活動對環境產生了負面之影響，台灣地區運輸部門能源的需求量中，石油產品之耗用量位居首位，占運輸能源總消耗量的 99.02%，幾乎涵蓋了所有運輸能源的消耗量，故其針對運輸部門能源消費面臨課題之因應對策中，提出了具體做法，其中包括：健全大眾運輸系統以抑制私人運具之使用、推動省能源運具，如電動機車之推廣、加速老舊車輛之汰換等。

有鑑於永續運輸之目標，運輸部門勢必找尋替代化石能源同時可循環再利用且不會造成環境污染之新能源技術，此即為永續能源。而燃料電池是近年來最重要之新興能源科技之一，燃料電池是一種清潔的發電裝置，具有能源使用效率高、可靠度強等優點。燃料電池之工作原理是利用氫氣與氧氣之結合，將化學能直接轉變為電能，即電能不儲存在充電電池中，此反應為水電解過程之逆向反應，故可知其反應產物為水，其不但不會對環境造成污染，反而可循環再利用，此亦為燃料電池技術近年來最被矚目的原因之一。此外，燃料電池應用之範圍相當廣大，幾乎所有與電池相關之產品均有可能在不久的將來被燃料電池所取代，如行動電話、筆記型電腦等可攜式之電子產品，還有大型的發電機組等，故燃料電池的市場可謂相當具有潛力。而燃料電池運具性能已發展至與現有燃油運具接近，以其零排放、高效能及適用各車種等優點，被市場公認為是最佳的汽車替代技術，如燃料電池為主的電動公車、電動汽車等運具近年來在汽車市場中受到高度之關注，目前各先進國家正積極投入研發。燃料電池車輛燃料之一的氧氣可自空氣中獲得，故燃料電池車輛所需補充之燃料即為氫氣，擷取氫氣之來源有甲醇、天然氣等原料，而氫氣的儲存方式有高壓儲氫鋼瓶、液化儲槽及金屬儲氫罐等方式（工業技術研究院，民 91）。綜言之，此一新能源技術之運具若能早日普及於現有運輸市場，這對於長期生活在環境空氣品質不佳之民眾而言，無疑不是一大福音，且在今日環保意識逐漸高漲下，加上外在環境能源耗竭威脅之際，發展環保性運具來取代傳統燃油運具已刻不容緩。

燃料電池雖擁有上述許多優點，但相對亦有許多極待解決之問題。第一，研發技術未臻成熟，以燃料電池車儲氫技術為例，高壓或液化儲氫於相關安全性問題仍需克服；第二，在生產量或使用量上未能達致規模經濟，因生產過程之高成本特性與發展推廣初期低需求之原因，造成供給量與需求量均未能提昇，此問題恰好反應出供給量與需求量間供需互動相互影響之關係。是故，燃料電池技術目前之發展雖屬創新之階段，尚未進入成熟期，但若燃料電池技術發展趨臻成熟階段且相關問題可加以克服的話，就其市場潛力而言，絕對是不久的將來最可能普及化的能源科技。

而燃料電池車相關研究近年來已有許多成果，其探討重點則以能源效率及研發技術之發展、成本效益之分析等為主，如 Folkesson et al.(2003)，其探討混合式質子膜燃料電池概念公車，並指出燃料電池系統運作效率、能源的節省與燃料消耗率均比一般車輛為佳；而 Ekdunge and Råberg(1998)則指出，未來的汽車工業將面臨需發展較潔淨、較有能量效率的車種以滿足減少有毒性排放物之挑戰課題，其中燃料電池可視為解決道路運輸環境問題的方法，因其為 Zero Emission Vehicle (ZEV) 或接近 ZEV。而質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell；PEMFC)被認為

是最適合燃料電池在運輸上之應用，因其有高能量密度、快速啟動與低溫度及構造簡單安全的優點。簡言之，上述相關文獻有助於瞭解燃料電池車發展情形，但卻未能瞭解需求面與供給成本面之供需互動狀況，因運輸之供給與需求彼此間存在著相互影響之關係，且供需互動狀況會隨著內在或外在環境因素之變化而隨之變動，進而重新影響供需雙方之互動；此外，藉由供需互動架構下可觀測出供給成本與需求量間的變化情形，進而反應出規模經濟之特性，因此有其必要性同時針對供給成本與需求作深入之分析與探討。

綜上，隨著地球上化石燃料逐漸耗竭與溫室氣體逐年增加之故，人類勢必尋找其他替代能源之環保性運具以滿足「行」之需求。Folkesson et al.(2003)研究中提及，適合燃料電池第一個商業應用之運具為都市公車；目前的所有運具中，由於公車之體積與污染排放量均較一般自小客車來的高，故其空氣污染排放量占移動性污染源之比例亦高，另一方面，低污染公車對空氣污染減量中，燃料電池公車之各種污染物排放參數值幾乎為零（陳苑蕙等，民 92）。綜言之，以目前發展至與現有燃油運具駕駛操作性能接近之燃料電池公車應是目前現階段最環保同時亦最具發展潛力之大眾運輸工具，故若能於國內優先引進燃料電池公車，在政府帶頭示範作用下，除有助於推廣大眾運輸外，另亦能誘發進而帶動燃料電池機車與小客車的使用。因此，在追求永續運輸目標之前提下，有其必要對燃料電池公車系統作深入之研究。過去燃料電池車相關的文獻多著重於燃料電池技術面與環境改善面做探討，鮮少針對燃料電池車之供需互動做分析。故本研究除了對燃料電池特性進行分析，針對其工作原理與應用範圍進行探討，並說明其研發技術發展現況之外，本研究亦分供給成本與需求兩方面進行探討，以引入燃料電池公車系統所需之成本為供給面，同時構建車輛成本與氫能供應站成本，且分析影響因素，並以灰色理論預測未來油價與氫能價格之趨勢走向，藉以分析未來燃油公車系統與燃料電池公車系統燃料成本變化情形；於需求面，以公車業者為主要對象，並考慮影響公車業者採用燃料電池公車加入其營運路線之因素，以二元羅吉特模式反應業者之需求。此外，政府部門補貼之外在助力亦納入考量。因燃料電池公車系統目前仍處於高成本狀態，業者多在觀望階段而不敢貿然採用，故若欲引入運輸市場則須仰賴政府部門之補助方能加速普及化，因此，本研究以公車業者需求面、成本面與政府外在助力補貼之觀點，進行補貼規

劃模式，同時將空氣污染面納入考量，以最小化社會總成本求取業者均衡使用量與政府部門最適補貼額，期藉以加速燃料電池公車之發展，同時刺激公車業者需求量，使燃料電池公車能提早規模化。由於不同業者供需互動結果下之供需均衡量亦不同，故政府部門之補貼水準亦不相同，研究結果可供政府部門於未來推動燃料電池公車相關規劃之參考依據。

1.2 研究目的

本研究之主要目的在於以解析性（Analytical）之方法分別探討政府部門補貼之大小於公車業者需求面與供給成本面間之相互影響關係，藉以決定公車業者對於燃料電池公車之均衡使用量與最佳資本補貼額度，繼而分析業者使用燃料電池公車後對空氣污染改善之效益與政府部門績效補貼之機制。本研究建立在供需互動架構下，擬以供給成本面之觀點建立相關之經濟成本模式；於需求面，則依據影響業者使用燃料電池公車之因素為變數構建需求函數。因燃料電池運具目前尚屬研發階段，故其成本資料少且取得不易，而灰色理論則具有少數據之特性，可在不需大量資料之情形下適時反映出資料變化情形，此優點符合本研究之需求，故本研究以其作為構建未來氫能價格之基礎。本研究藉由公車業者需求面與供給成本面之供需互動以及政府部門之補貼決定公車業者對於燃料電池公車之均衡使用量，同時輔以決定其對空氣污染改善程度，並擬做為政府部門對營運者進行績效補貼之參考，以肯定公車業者對外部成本改善之貢獻程度，同時可彌補燃料電池公車系統與燃油公車系統間之成本差距，並間接吸引其他客運業加入採用燃料電池公車之意願，而最終目的則擬建立一套有效率之補貼政策，以加速公車燃料電池化進而使其他運具能跟進。而本研究擬以兩方面進行討論：

其一，從燃料電池之特性探討供需雙方之互動情形，因燃料電池公車系統成本之高低會左右客運業者採用此一運具之意願，即燃油公車系統與燃料電池公車系統兩者成本差距大，但政府部門願意給予補貼時，則公車業者使用燃料電池公車之意願將會提高。

故本研究以公車業者對燃料電池公車系統之需求面與供給成本面為基礎，並配合政府部門之補貼策略，探討其對公車業者使用意願之影響。

其二，於政府政策面，須考量符合國際社會對環境保護之期望與目標。公車業者對空氣污染改善之成效為其採用燃料電池公車而對環境之貢獻，故政府部門需依公車業者對空氣污染改善程度對其進行績效補貼。補貼公車業者之目的在於彌補其使用燃料電池公車時高於其未使用時總成本上之差距，另可刺激其他客運業之潛在需求，期使現有燃油公車能逐漸燃料電池化進而改善道路系統之空氣品質，更重要的是藉以吸引更多客運業者採用之意願。此外，因每家公車業者之經營規模不同，使其對燃料電池公車系統之需求不同，進而對空氣污染改善之貢獻程度亦不同，故政府部門之補貼政策可針對不同業者之使用狀況與其對外部性改善之成效調整其供需補貼水準。茲將本研究之具體目的列述如下：

1. 以燃料電池公車系統所需成本為供給者之角度出發，釐清關於燃料電池公車系統成本面之核心問題。在公車業者願意採用燃料電池公車之考量下，構建燃料電池公車系統相關供給成本模式，包括車輛成本與氫能供應站成本等經濟成本模式，並探討其規模經濟之特性。
2. 以公車業者為使用者之角度出發，根據公車業者關切之影響因素，包括燃料電池公車購置成本、單位里程之燃料成本、車輛最高速度與單位里程之污染排放量，進而構建需求函數，以探討燃料電池公車系統之供需關係，並在政府補貼之預算限制下，構建以最小化社會總成本之補貼規劃模式，以求解公車業者供需均衡使用量與最適資本補貼額，並分析其對空氣污染改善成效與對應之績效補貼額。
3. 以一簡例分析說明現有燃油公車系統與燃料電池公車系統成本上之差異，以做為補貼規劃模式之立論基礎。由於氫能價格資料少且取得不易，故本研究即利用灰色預測理論少數據之特性構建氫能價格預測式，同時構建燃油價格預測式，藉以探討未來兩者價格之變化情形與彼此間之相對關係，並分析對兩公車系統總成本之影響。
4. 由於每家公車業者之供需互動狀況會受相關成本、需求行為與政府資本補貼多寡等因素影響，故每家公車業者之均衡量乃至於對環境污染改善成效均不盡相同，故此不但會影響政府環保政策面所欲討論之績效補貼議題，亦會因而再次牽動供需面之變化。故本研究根據政府資本補貼下所決定之供需均衡使用量，推估業者對空氣污染改善成效，同時考慮燃料電池公車系統與燃油公車系統總成本之差距，據以建立一套政府部門對公車業者之績效補貼策

略，以肯定公車業者對外部成本改善之貢獻，進而刺激燃料電池公車之需求，且作為吸引更多客運業者加入營運意願之參考，以期燃料電池公車能早日普及於國內公車市場，並達致規模經濟之效益。

5. 蒐集模式中主要參變數之實際資料或未來發展資料，並進行合理的假設，以執行本研究一系列之範例分析與敏感度分析，以驗證本研究所構建之相關模式於實際應用之可行性，並說明模式於實際應用之求解過程與效果。

1.3 研究範圍與對象

本研究主要以公車業者為研究對象，探討燃料電池公車系統成本與政府部門補貼機制對其採用行為之影響，並針對燃料電池公車核心相關之成本變化作分析，其他成本如行政管理費用、人事費用等非燃料電池問題核心之成本項則不在本研究考慮範圍之內。此外，由於近年來空氣污染有日益嚴重的趨勢，其中因二氧化碳所導致之溫室效應最為國內外各界與國際環保團體所重視，故本研究所討論之外部成本以空氣污染所造成之成本為主，不考慮噪音等其他外部性成本。都市道路系統上之燃油車種主要可分為燃油公車、燃油小汽車與燃油機車，而都市中主要之移動性污染源為來自於這些燃油車輛所排放出之污染物，此類污染物對於民眾之健康有顯著之影響，其中燃油公車因其車體結構與體積較大導致其污染排放量為最，故本研究所考慮之外部成本以都市公車系統為主，不考慮一般小汽車與機車所造成之外部成本。本研究將針對燃料電池目前發展情形與發電原理做介紹，但不涉及化學的技術層面做探討。

1.4 研究方法與架構

本研究依據燃料電池之特性，探討其技術發展狀況與基本之工作原理，且在配合政府節約能源與減少污染之政策下，針對公車業者對燃料電池公車之需求面及成本面進行探討，並構建需求函數與成本函數；另透過一簡例分析，藉以說明現有燃油公車系統與燃料電池公車系統成本結構上之差異，同時透過灰色預測之方法，期能了解未來燃油價格與氫能價格受時間推移之變化進而影響兩公車系統燃料成本之情形。此外，將政府部門因素納入考量，在追求燃料電池公車引入國內運輸市場之目標下，同時考慮公車業者需求面與成本面，藉以規劃政府部門補貼模式以決定業者均衡使用量及資本補貼額，並透過業者之均衡使用量對外部成本改善之效益，以作為政府部門規劃績效補貼之參考。研究首先針對研究問題作深入瞭解以界定研究範圍，透過相關學術文獻與實務報告之回顧與探討，確定本研究之研究背景與動機，而後擬定本研究之研究方法。於文獻回顧的部份，本研究回顧燃料電池、低污染公車、燃料電池車發展現況、灰色理論應用於交通運輸以及大眾運輸補貼之相關學術研究，並分析文獻已探討及未探討的部份，以界定本

研究之研究架構。最後，擬以一範例分析，說明模式應用結果，以闡述本模式之操作可行性與實際應用之政策影響，最後提出結論與後續研究課題。圖 1-1、圖 1-2 分別為本研究之研究架構與研究流程。

首先，本研究深入了解燃料電池之特性及其應用範圍與市場發展狀況；由於燃料電池具有高效率且清潔之特性，故為都市大眾運輸工具最佳之選擇，因都會區中私人運具過飽和致使道路容量不足造成用路人產生額外之旅行時間，不但造成道路服務水準長期以來處於低落狀態，更造成用路人產生擁擠延滯成本以及對環境造成大量污染而產生外部成本，故若能於都會區引入燃料電池公車，不僅可強化政府宣導民眾踴躍使用大眾運具的政策，同時可以減少大量外部成本之產生，並亦可抑制私人運具的使用而轉移部份私人旅次於燃料電池公車系統，以減少私人運具使用量，同時提高道路服務品質，減少額外的旅行時間與擁擠成本，進而使整個運輸環境品質得以提升。本研究以政府節約能源與減少空氣污染之政策目標下，探討燃料電池公車系統供需互動狀況。本研究分需求面與供給成本面兩部分進行探討，以公車業者為需求面之考量，針對影響公車業者採用燃料電池公車之因素建立效用函數，進而構建公車業者對燃料電池公車之需求模式，以公車業者使用燃料電池公車所需之成本為考量構建成本模式，而政府的態度亦會影響此均衡量，若政府願意對業者補貼較多，則均衡量會相對提高。因此，本研究利用解析性方法構建供需模式，並在政府補貼之情形下以最小化燃社會總成本為目標式，構建數學規劃模式，以決定公車業者使用燃料電池公車之供需均衡量與最適資本補貼；另外，公車業者之經營規模亦會影響改善空氣污染之成效，因人口密度較多、公車路線較密集的地方，空氣污染改善成效將愈顯著，而每家公車業者之行駛里程不相同，對空氣污染改善成效亦不盡相同，故本研究進一步以業者均衡使用量為基礎，透過燃料電池公車之使用與行駛里程決定業者對環境污染改善程度，並將業者使用與未使用燃料電池公車之成本差距納入考量，藉以決定業者改善空氣污染之績效補貼。

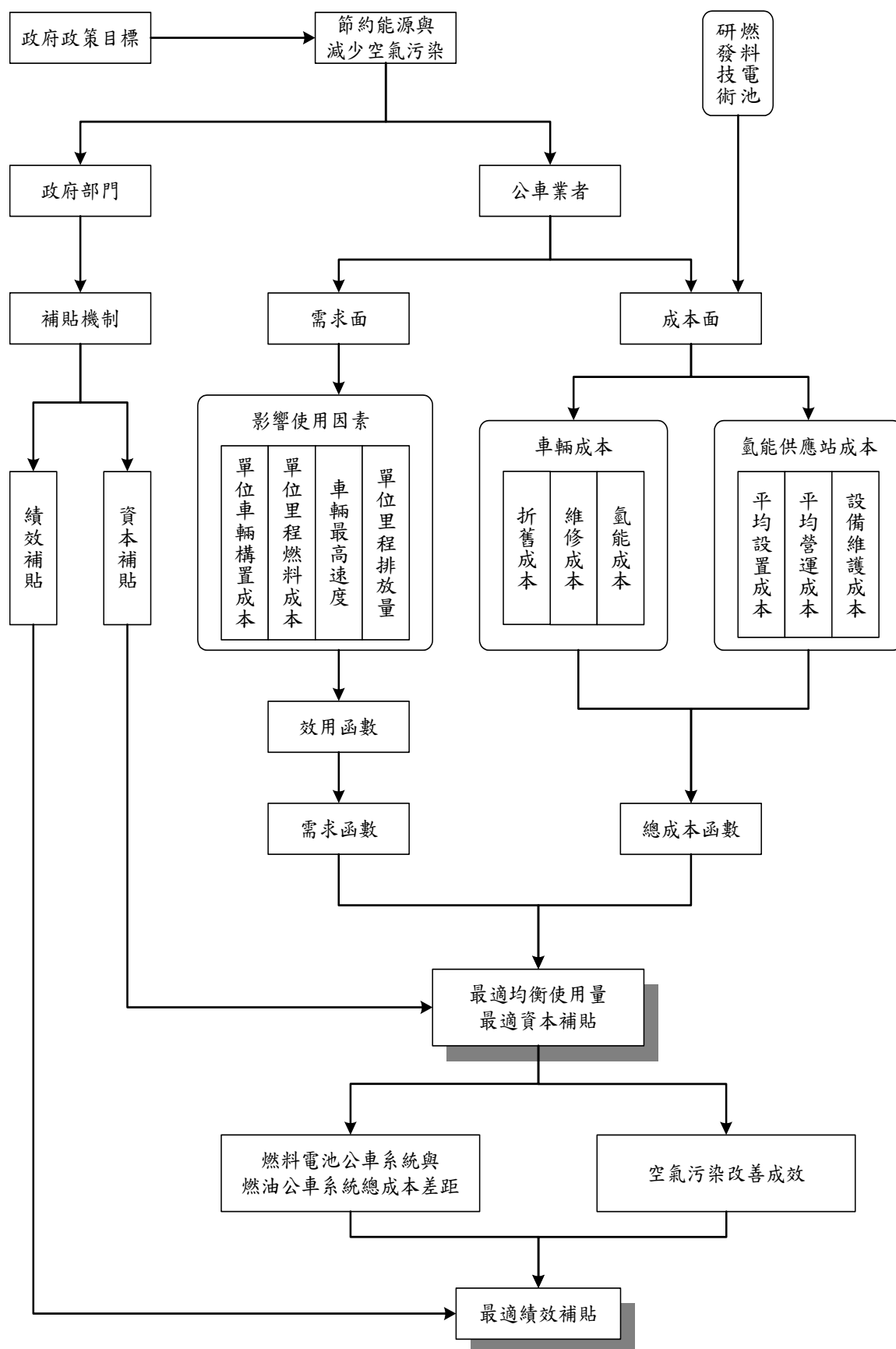


圖 1-1 研究架構圖

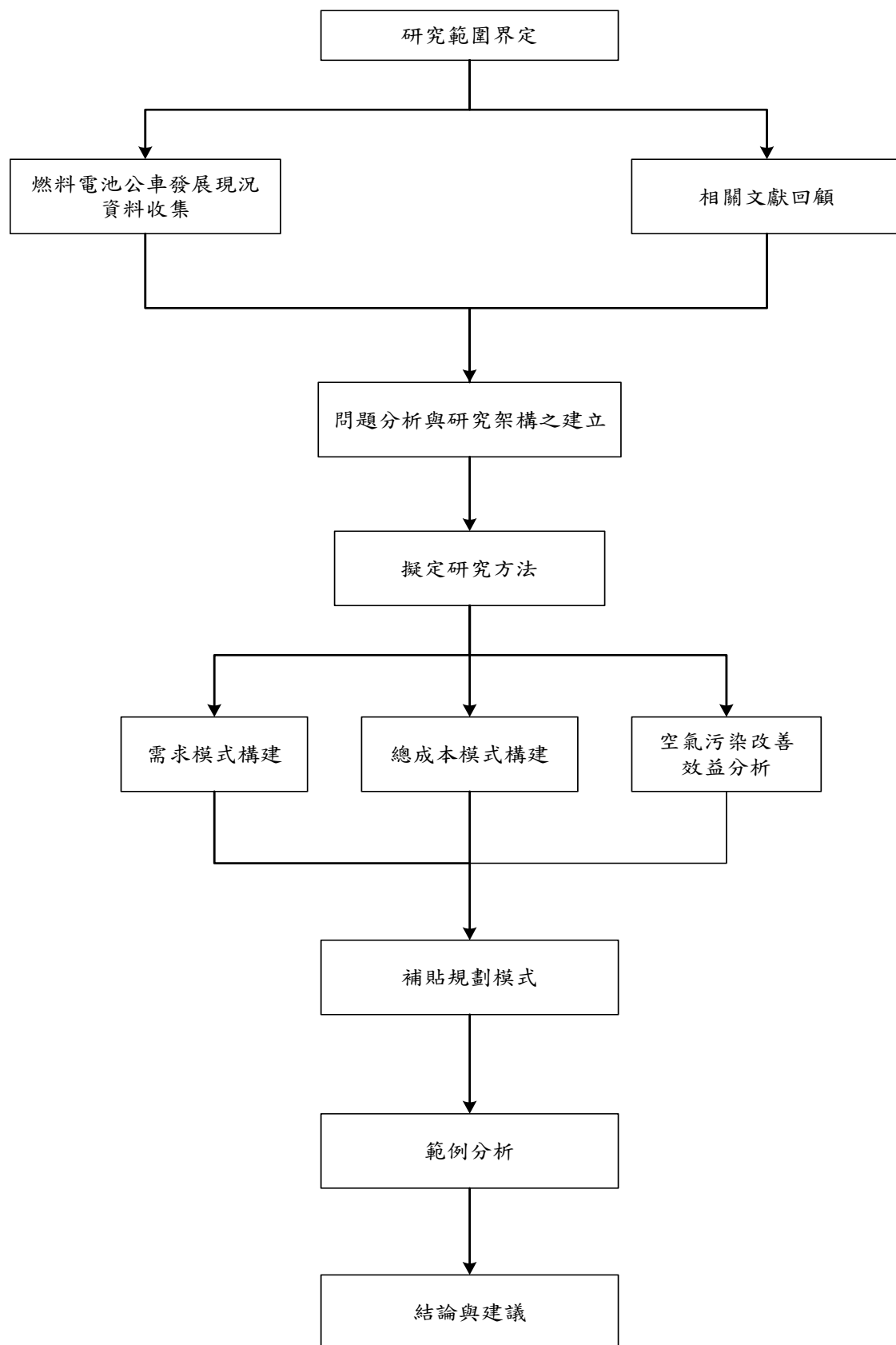


圖 1-2 研究流程圖

第二章、文獻回顧

本研究以公車業者為研究對象，並著重探討燃料電池公車系統之成本結構，且探討在政府部門願意補貼之條件下，分析公車業者之需求行為；此外，同時分析公車業者採用燃料電池公車之情形，並評估其對於環境污染改善之效益，進而以其作為政府相關部門對公車業者進行績效補貼水準之參考依據。因此，本研究回顧相關課題之文獻，俾對過去文獻中關於燃料電池特性與環保性運具發展況有一完整性之認識，以做為分析本研究核心問題之重要依據。與本研究相關之文獻可區分為燃料電池、低污染公車、燃料電池車發展現況、灰色理論於交通運輸上之應用與大眾運輸之補貼，故本研究針對此五部分文獻做回顧並加以說明。

2.1 燃料電池

以下首先介紹 2.1.1 燃料電池發展歷史，2.1.2 燃料電池之工作原理，2.1.3 燃料電池之種類，2.1.4 燃料電池之應用，及 2.1.5 燃料電池發展現況與市場演進狀況。

2.1.1 燃料電池發展歷史

燃料電池是在 1839 年由英國人 William Grove 發明之技術，其透過水的電解過程逆轉，進而發現了燃料電池的原理，當時稱之為「氣體電池」，但因當時氫原料取得與技術障礙不易克服，使此一技術漸被世人所淡視。“燃料電池”一詞是由 Ludwig Mond 和 Charles Langer 二位化學家所創，他們當時試圖利用空氣和工業用煤氣製造第一個實用化的燃料電池裝置，但未能成功。1932 年，劍橋大學 Francis Thomas Bacon 博士多次修改 Mond 和 Langer 之發明裝置，且經過二十多年之努力，直至 1959 年始開發出 5kW 的氫-氧燃料電池，並應用於拖曳機、堆高機等車載用能源，此時，燃料電池技術始在應用領域嶄露頭角。1960 年代，由於太空及國防的需要，美國 NASA 開始資助一系列的研究計劃，從事開發實用化的燃料電池設計。1970 與 1980 年代相繼發生石油危機及環保意識高漲，先進各國致力開發與利用新潔淨能源，而至 1990 年代全球氣候變遷的暖化效應，更直接推動燃料電池的發展與應用。

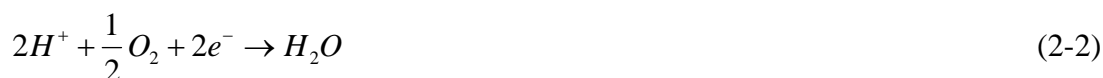
2.1.2 燃料電池之工作原理

燃料電池是一種能源直接轉換裝置，把化學反應之化學能直接轉化為電能，為一種潔淨的發電裝置，它不像傳統電池只能充當電能的儲存單位，亦非如內燃機利用燃料燃燒產生的熱來做功。將其與火力發電相比，關鍵在於燃料電池之能量轉換過程是直接的方式，如圖 2-1 所示。而其原理係利用氫氣與氧氣產生電化

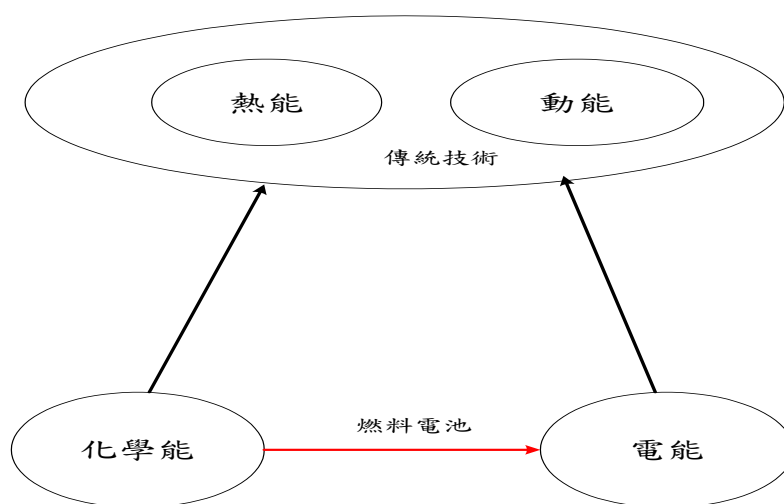
學反應的原理，透過氫與氧之結合，將化學能直接轉變為電能且排放出水氣，也就是水電解過程之逆向反應，其不但不會對環境造成污染，反而可循環再利用。燃料電池之基本設計包括陽極板、陰極板、電解質與外部電路，其工作原理是氫氣通過導氣板到達陽極，在陽極催化劑之作用下，一個氫分子分解為兩個氫質子(Proton)和兩個電子(Electron)，即下式(2-1)之反應式



在電池之另一端，氧氣(或空氣)通過導氣板到達陰極，在此同時，氫質子穿過電解質到達陰極，電子則經外電路到達陰極，形成電流。在陰極催化劑之作用下，氧與氫質子和電子發生反應並生成水，如下式(2-2)之反應式所示

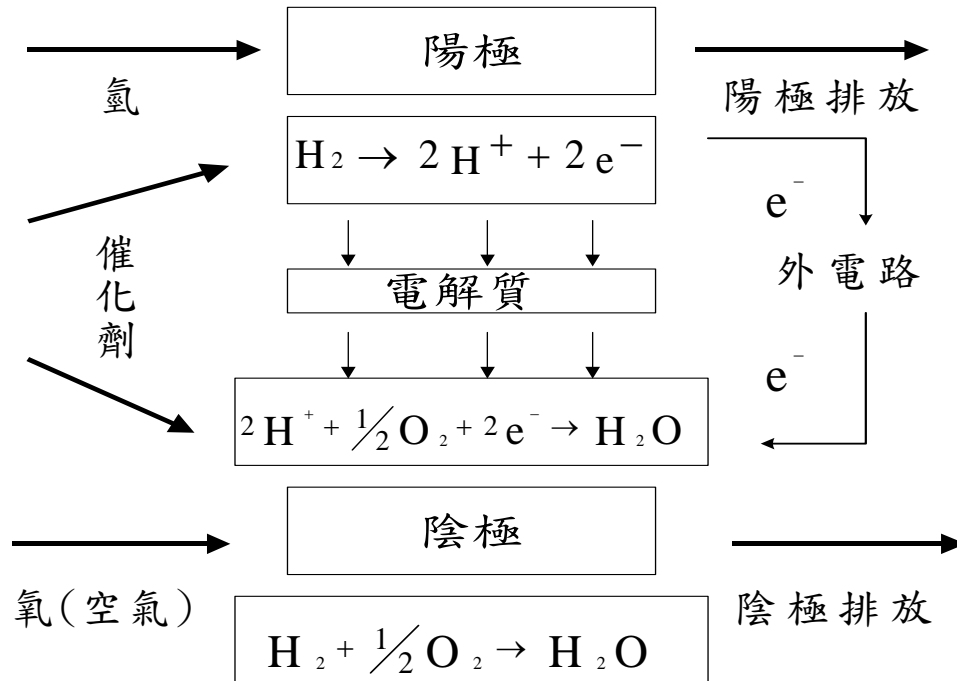


整個反應過程如圖 2-2 所示。



[資料來源：李瑛等（2000）]

圖 2-1 燃料電池直接發電與傳統間接發電的比較



[資料來源：黃倬等（2000）]

圖 2-2 燃料電池基本反應圖

2.1.3 燃料電池之種類

如前所述，燃料電池是一種能源直接轉換裝置，不須經過燃燒過程，而以化學反應之方式將化學能直接轉變為電能。燃料電池主要之燃料為氫氣，來源種類繁多，如煤、石油、甲醇、天然氣等，經重組(Reforming)反應後，可擷取出大量之氫氣，以做為燃料電池之燃料填充劑。而燃料電池依電解質之不同可區分為鹼性型(AFC)、磷酸型(PAFC)、熔融碳酸鹽型(MCFC)、固態氧化物型(SOFC)、質子交換膜型(PEMFC)與直接甲醇型(DMFC)等，茲分別將各種類之燃料電池特性說明如下：

(1) 鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell；AFC)

AFC 使用鹼性溶液做為電解質，其工作溫度與質子交換膜燃料電池溫度相似，但其電力卻比質子交換膜燃料電池低甚多，故不適合用於汽車動力系統。鹼性燃料電池為技術發展最快，生產成本最低的一種燃料電池，主要應用於航空電力與水的供應系統。

(2) 磷酸型燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell；PAFC)

PAFC 使用液體磷酸做為電解質，其工作溫度較質子交換膜燃料電池溫度略高，其具有構造簡單、穩定等優點，但其效率較其他燃料電池

低，可做為定置型發電等用途，此類燃料電池為當前商業化發展最快的燃料電池。

(3) 熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbon Fuel Cell；MCFC)

主要是使用鋰鉀碳酸鹽或鋰鈉碳酸鹽做為電解質，故與其他燃料電池差異較大，且由於其操作溫度較高，故不適用於交通運輸及家庭用電，但有利於大規模工業加工及發電。

(4) 固體氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell；SOFC)

具有高效率、壽命長的優點，主要使用氧化釔等固態氧化金屬為電解質，故比 MCFC 電池更穩定，但其電解質材料脆性較大且承受高溫之建造材料成本較高，主要應用於定置型發電。

(5) 質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell；PEMFC)

使用之電解質為離子交換膜，具有構造簡單、啟動快、電力密度高等工作優點，故成為汽車與家庭用電應用之理想能源，為近年來研究最為廣泛、技術發展最為快速之燃料電池。

(6) 直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell；DMFC)

以甲醇為燃料，不須重組器，操作溫度與 PEMFC 相似，但甲醇穿越(cross over)問題仍待解決，其為近幾年許多 3C 廠商積極投入研究之類型，且被視為未來及具潛力之可攜式電源之一。

各類型燃料電池之特性與優缺點整理如表 2-1。

表 2-1 各類型燃料電池之特性與優缺點

材料	鹼性型 燃料電池 (AFC)	磷酸型 燃料電池 (PAFC)	熔融碳酸鹽 燃料電池 (MCFC)	固體氧化物 燃料電池 (SOFC)	質子交換膜 燃料電池 (PEMFC)	直接甲醇 燃料電池 (DMFC)
電解質	高分子膜	H ₃ PO ₄	(Li,K) ₂ CO ₃	(Zr,Y)O ₂	質子交換膜	質子交換膜
工作溫度	90-100℃	160-190℃	600-700℃	900-1,000℃	30-80℃	40-80℃
發電效率	~60%	40-50%	50-60%	45-55%	40-50%	~20%
可用燃料	純氫	天然氣、甲 醇、輕油	天然氣、甲 醇、石油、 煤炭	天然氣、甲 醇、石油、 煤炭	天然氣、甲 醇	甲醇
特性	需使用高度 純氫做為燃 料、低腐蝕性 及低溫較易 選材料	進氣中 CO 會導致觸媒 中毒、廢熱可 利用	不受進氣CO 影響，反應時 須循環使用 CO ₂ 、廢熱可 利用	不受進氣 CO 影響、高 溫反應，不 須依賴觸媒 的特殊作 用、廢熱可 利用	功率密度 高、體積小 重量輕、低 腐蝕性、低 溫、較易選 擇材料	適合低功率 小型攜帶式 電子產品
優點	啟動快、室溫 常壓下工作	對 CO ₂ 不敏 感	可用空氣作 氧化劑，可用 天然氣或甲 烷作燃料	可用空氣作 氧化劑，可 用天然氣或 甲烷作燃料	壽命長、功 率大、可用 空氣作氧化 劑、室溫工 作、啟動迅 速、輸出功 率可隨意調 整	不須重組器
缺點	需以純氫做 為氧化劑、成 本高、大氣中 使用時需將 CO ₂ 自空氣中 去除	對 CO 敏 感、工作溫度 高、成本高、 低於峰值輸 出功率時性 能下降	工作溫度較 高	工作溫度較 高	對 CO 非常 敏感	甲醇穿越問 題待解決

[資料來源：工研院能資所/經資中心、台灣經濟研究院及本研究整理]

2.1.4 燃料電池之應用

燃料電池應用範圍甚廣，歸納起來大致可分為三類：(一)定置型發電、(二)車輛動力系統、(三)可攜式電力，茲分別說明如下：

在定置型發電方面，燃料電池除了可以與現有之發電系統進行連結，以提供電力或作為主要區域的緊急備用電源外，亦可獨立安置在特定地點。以目前發展階段而言，燃料電池發電系統為各應用領域中投入最多研發資源，現今全球至少安置約有 200 座以上的燃料電池發電機組，為目前唯一接近商業化階段之應用，但儘管其發電技術與成本均已改善甚多，但其發電成本相較於其他替代性競爭產品而言仍過高，致使目前仍然無法大量取代傳統發電。以未來較長遠之眼光觀之，短期而言，燃料電池發電潛在之應用市場為提供穩定之電力來源、商業大樓等電力供應系統，中長期而言，潛在之應用市場為工業設備、住宅建築與混合動力系統等。

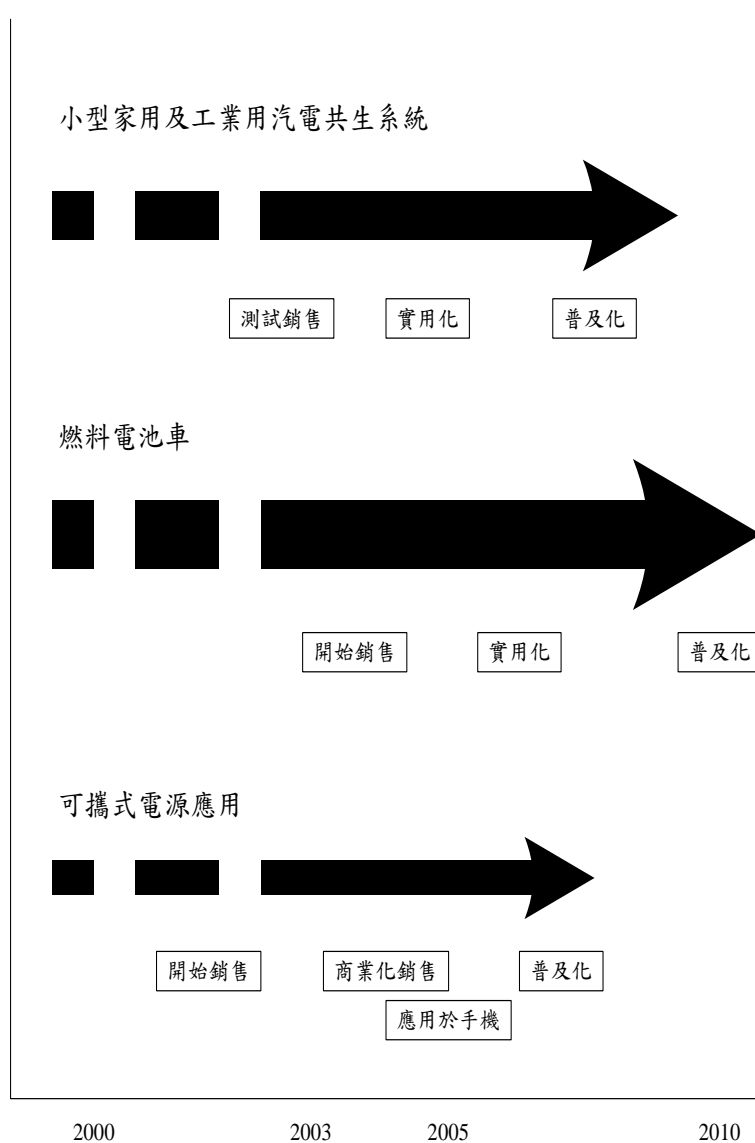
在車輛動力系統方面，燃料電池應用於車輛動力之商業化時程較預期落後，其主要原因為(一)生產成本較傳統內燃機引擎車高出甚多，導致不具價格競爭優勢；(二)相關配套技術之問題仍有改善空間，如儲氫技術、相關基礎設施、燃料重組器等。而在各種燃料電池系統中，PEMFC 因使用離子交換膜或固態高分子電解質，具有免於液體電解質溢散之問題，加上世界各國汽車大廠紛紛致力於 PEMFC 電動車之研發，在相關技術上已逐漸進步，故未來在燃料電池車之應用方面，應以 PEMFC 為主，其他如 SOFC 主要是應用於大貨車之預備電源和非道路用車。

在可攜式電力方面，由於近年來個人行動資訊之普及與可攜式電子產品不斷推陳出新的情況下，消費者對於穩定、可靠、持久性電源之需求日益迫切，然目前市面上發展之一次或二次電池在使用的壽命與持久性上，已漸趨無法完全滿足消費者之需求。而燃料電池由於其特殊發電原理之特性，在面臨電能趨於耗盡之際，只需不斷補充燃料即可使其繼續發電，完全不需經過充電的過程，加以其具有高能量、高密度與高效率之優點，更使其具有取代傳統一次或二次電池之優勢，因此，全球有關 3C 可攜式產品之廠商正致力於此應用領域之研發工作，預計未來若可成功取代一次或二次電池，將可佔據龐大的潛在市場。由於可攜式電源必須滿足啟動快速、低溫操作、系統簡單、無安全顧慮等因素，故未來應用虞可攜式電源之燃料電池技術將以 DMFC、PEMFC、AFC 等為主。

2.1.5 燃料電池發展現況與市場演進狀況

燃料電池發展迄今已有一百多年的歷史，但由於技術未臻成熟且發電成本過高，加以使用材料以及組件規格不明之狀況下，目前市場仍屬萌芽測試階段，距離真正商業普及化仍需一段時間。燃料電池初期之研究多著重在定置型發電與車輛用電源市場，但由於車用燃料電池仍存有技術性問題，加上外在替代燃料運具

競爭之威脅，故預期燃料電池車輛市場商業普及化之時程會比定置型發電之應用落後。近年來，由於個人行動資訊產品的普及，造成消費者對穩定、持久性之可攜式電源之需求與日俱增，故近年來已有多家電子設備製造商投入大量資源在 3C 相關產品應用的研究，預計未來可攜式燃料電池將是最早達到普及化的商業應用。雖然燃料電池技術現今仍未完全成熟，但以燃料電池於生活面應用之廣度而言，不久的將來將是燃料電池能源科技的新世代。世界燃料電池技術發展趨勢將以固態氧化物燃料電池、質子交換膜燃料電池與直接甲醇燃料電池為主；固態氧化物燃料電池發展目標以分散式大型發電機為主，質子交換膜燃料電池由於體積小、重量輕、厚度薄等因素，較易串聯成燃料電池堆(Stacks)以增加電池功率，是現今所有燃料電池中最是核應用在可攜式發電機上；至於直接甲醇燃料電池則以小型攜帶式電子產品的電力系統為目標。圖 2-3 為燃料電池演進階段。



[資料來源：工研院經資中心（2002）]

圖 2-3 燃料電池演進階段

小結

回顧以上燃料電池各相關文獻，可深入瞭解燃料電池之發電原理與特性，並可知各種擷取氫氣之途徑與各種製氫技術之優缺點，惟目前各先進國家亦正積極發展由可再生能源中擷取氫氣，如風力、太陽能等，若能克服技術上之相關問題，實為能源界另一項重大突破；另外，燃料電池之應用範圍甚廣，小至可攜式電源，大至各種機組發電機與車輛動力系統皆可以燃料電池來取代，但目前相關之研發技術仍未進入成熟期，距離實務上之普及化仍需一段時間。

2.2 低污染公車

近年來，由於經濟活動快速發展加上民眾生活水準逐漸提高，致使民眾對於運輸需求日益增加，因此造成私人運具快速成長並充斥於都會區道路系統，除了使道路容量趨近飽和之外，亦使大量之移動性污染源成為都會區空氣污染之主要來源。為尋求解決之道，低污染公車之發展可將低移動性污染並減少私人運具的使用，故本研究針對低污染公車進行回顧，並將各類型低污染公車之技術特性與優缺點整理於表 2-2。

表 2-2 各類型低污染公車之技術特性與優缺點

	純電動 公車	複合式 電動公車	天然氣 公車	甲醇 公車	燃料電池 公車
技術 特性	使用鉛酸電池、鎳 鎘電池、鎳氫電池 等	電池與內燃機 搭配使用	壓縮天然氣、液 化天然氣、吸附 式天然氣	使用醇類為燃料， 或以任意比例之替 代燃料搭配傳統燃 料	利用氫與氧之 結合，將化學能 直接轉變為電 能
優點	◆ 無排氣污染 ◆ 低噪音	◆ 污染程度 低 ◆ 低噪音	◆ 揮發性有 機物與一 氧化碳較 其他燃料 低 ◆ 低噪音	◆ 燃燒完全 ◆ 低污染排放量	◆ 污染排放 量少 ◆ 引擎效率 高 ◆ 燃料補充 時間短
缺點	◆ 成本略高 ◆ 續航力差 ◆ 充電費時 ◆ 會產生電池二 次污染問題	◆ 成本略高 ◆ 充電費時	◆ 成本略高 ◆ 燃料儲存 技術較差	◆ 甲醇具腐蝕性 ◆ 續航力較傳統 柴油車低 ◆ 會排放甲醛	◆ 車輛成本 最高 ◆ 技術尚未 成熟

[資料來源：本研究整理]

在低污染公車相關文獻方面，交通部運輸研究所(民 87)調查國內外電動公車技術，並以多評準評估方法(Multiple Attribute Decision Method, MADA)評估其在國內做為都市運具之可行性。首先針對電動公車之特性與國外相關發展做分析，並探討國外電動公車之運行現況，進而對電動公車做整體性之效益分析，以做為評估國內適合之公車類型與行駛路線之依據。技術調查結果顯示，電動車之技術仍有相當之瓶頸待突破，如蓄電池電力、充電時間、續航力等；使用電動公車對環境之影響方面，在測量相關污染時，主要考慮公車尾管排放所造成之污染以及發電廠在發電時所產生之污染，其中，在考慮電廠污染時，其計算方式乃計算電動公車於充電時所使用的電量佔總發電量之比例，將電廠所造成之污染分配至電動公車所造成之污染。此外，電動公車亦有電池二次污染之問題，主要是因廢電池中殘留重金屬，且重金屬不易被人體排出，若累積至一定量時，便會產生癌症類病變，對身體機能造成嚴重傷害。評估結果顯示，以複合式電動公車最適合國內運行，其中又以電氣為主，其他燃料為輔的電動公車為佳；路線評選方面，台北市並未找出最適合之特定路線，而以方案集之方式指出幾條可能路線，新竹市方面則以南寮漁港路線為最適合電動公車之運行。新竹市環境保護局(民 89)針對新竹市地區特性，探討低污染公車於新竹地區之適用性，以研擬低污染公車系統之營運計畫，包括車隊規模、營運路線與相關配合措施等，並就各低污染公車系統與方案進行經濟效益與財務分析等績效評估。結果顯示，在方案選擇方面，須依實施當時之旅客需求量大小來決定，而以目前低污染公車技術成熟度而言，短期可採複合式公車或天然氣公車。交通部運輸研究所(民 89)調查與蒐集國內外低污染公車之發展現況，同時分析車輛技術特性之優缺點與適用環境，藉以研擬國內發展與引進低污染車輛之短中長期推動政策與相關配合措施，並利用多目標評準方法於「國內引進低污染公車應用規劃與評估」進行都會區與路線評選工作，結果以台中市作為規劃低污染公車之示範都會區，路線以 100 路之市區路線（台中客運）、2 路之觀光路線（仁友客運）與台中—東勢之城際路線（豐原客運）為主。另外，研究結果顯示，目前推廣低污染公車之主要瓶頸為車輛成本過高，尚不具規模經濟，故實施初期需仰賴政府單位之補貼。

小結

過去對於低污染公車之研究結果可知，現階段低污染公車共同面臨的不外乎是高成本的問題，且技術上仍有許多進步的空間，以純電動公車為例，續航力差、充電費時及電池二次污染問題等皆是急需改善之關鍵點，否則很難在運輸市場中與傳統燃油運具競爭；此外，由於其高成本之結構，導致不具規模經濟，但若考慮以政府扮演推手之角色，適時介入並研擬相關補貼策略，對於推廣環保性運具而言，將更具參考價值。

2.3 燃料電池車發展現況

過去探討燃料電池車之文獻大多聚焦於其能源效率及研發技術之發展、成本效益之分析與其他相關課題等，表 2-3 為燃料電池車相關文獻之整理。

在能源效率及研發技術方面，Folkesson et al.(2003)以混合式質子膜燃料電池概念公車為對象，於真實生活之測試進而探討燃料電池公車之優點及其後仍需努力之課題。研究中提及，由於都市公車對於大眾而言體型較大，且對於都會區之空氣污染“貢獻”程度亦較顯著，故作者認為適合燃料電池第一個商業應用之運具為都市公車。測試結果顯示，燃料電池系統運作效率約 40%，可節省約 28% 的能源，燃料消耗率約 42% ~48%，亦比一般車輛低。此外，對於仍需努力之課題主要是成本之降低方面，作者提及此課題可透過降低燃料電池系統之複雜度與運用較佳之生產方式來獲得解決，而燃料儲存系統之安全性與能源效率方面亦需繼續發展。

在成本效益分析方面，Hörmandinger et al.(1996)以燃料電池在公共運輸上之應用為題，探討其對於環境成本之影響。作者首先對各種燃料電池發展狀況做說明，並分析燃料電池公車對於社會成本之影響，結果顯示，燃料電池公車內部成本高於柴油引擎公車，但外部成本方面則遠低於柴油引擎公車。內部成本方面，以目前而言，燃料電池公車之成本較傳統柴油引擎公車高約 23% ~33%，主要原因是與車隊規模之大小有關。另一方面，氫燃料之成本亦受所使用之含氫原料成本高低所影響，而以天然氣或甲醇為原料則受價格波動影響較小。研究中亦指出，燃料電池公車若欲提升其在運輸市場之競爭力，需藉由擴大車隊規模與氫能供應設施以達致規模經濟之效果，且因其成本相對其他運具而言是比較高的，故需藉助提供補貼之方式使燃料電池之應用能進入運輸市場，進而使燃料電池公車在未來的運輸市場能與傳統柴油公車相抗衡。Ekdunge and Råberg(1998)分析與探討燃料電池車之能源使用、排放物與成本，並以模擬之方式了解燃料電池車燃料消耗狀況與運轉條件。研究結果發現，燃料電池車以氫氣作為燃料時產生之能源消耗約 65% 且不會產生排放物，在成本方面仍居高不下，主要原因為使用之薄膜或催化劑等原料成本過高所致，故相關原料與生產成本必須降低才能達到燃料電池車普及化之目標。

Contadini(2000)以社會成本之觀點對燃料電池車使用不同燃料之結果進行比較。作者以甲醇與純氫為燃料使用於燃料電池車，而以汽油為燃料使用於有加裝重組器之傳統燃油車以及燃料電池車，並進行雙方面之比較。研究結果顯示，使用甲醇與純氫為燃料時，兩者之效益皆優於汽油燃料使用於有加裝重組器之車輛，此外，在空氣污染對於人體健康傷害程度之成本減少方面，以甲醇之表現為最佳；另一方面，原先使用汽油爾後改變進而使用甲醇或純氫為燃料時，對人體

傷害之成本可節省約八千五百萬美元，再者，可節省幾乎三兆美元之私人成本；在敏感度分析方面，純氫燃料電池車與甲醇燃料電池車車輛成本之差異對於社會成本之變動有顯著之影響且不確定性高，關鍵之原因在於燃料電池發展技術之成熟度，即兩者之觸媒使用量與儲氫複雜度間之權衡取捨關係。Matheny et al.(2002)以車輛噪音為課題，並以實際測試之方式探討燃料電池公車內部與外部之噪音排放量及其影響程度，但對於輪胎所造成之外部噪音則並無深入調查與分析。測試車輛以佛羅里達大學燃料電池研究中心之三十呎磷酸型燃料電池公車為對象，測試結果顯示，磷酸型燃料電池公車安靜程度顯著優於傳統燃油公車，其原因在於磷酸型燃料電池發動機不會產生如燃油公車之噪音量，而車輛元件如空調系統、空氣壓縮機等音源方面，燃料電池公車相對於傳統燃油公車而言是減少許多，但仍然存在，其中空調系統之音量為車體內部最大者，而空氣壓縮機之音量則為車體外部最大者，故為了避免此類噪音源長期下來對公車駕駛與乘客產生不良影響，其元件結構應重新設計，以減少噪音源對車內乘坐者造成之影響程度加以惡化。Santarelli and Bertolaso (2003)探討關於義大利都會區之公共運輸服務之課題，內容以燃料電池系統之公車與其他傳統使用化石燃料之公車在能源、經濟、環境與社會等層面進行比較。結果顯示，氫能燃料電池公車在未來市場趨勢相較於以傳統內燃機燃燒碳氫化合物的公車而言更具有競爭力，且新技術所發展出之汽油可讓使用壓縮點火引擎的公車減少空氣污染排放物，但此類新技術之發展會增加投資與維修之成本；以總成本之觀點而言，天然氣公車亦具競爭性，特別是其低燃料成本與低空氣污染之特性；此外，公車若以甲醇為燃料則會遭遇重組器與燃料電池系統並用的複雜問題。研究亦指出，若系統成本能降低進而使營運成本能減少的话，將會使燃料電池公車更具競爭力。

尚有其他文獻探討燃料電池相關主題，如 Brodrick et al. (2002)以重型柴油貨車裝設燃料電池動力輔助裝置之評估為題，分析現有重型柴油貨車引擎空轉時所產生之污染量與浪費之燃油成本。重型貨車引擎空轉的時間約 20-40%，引擎空轉會增加空氣污染與能源之消耗，同時會對引擎造成磨損進而減低引擎之壽命。但駕駛人通常都會將引擎空轉以對恆溫控制裝置（加熱氣或空調設備）與其他附屬設備（冰箱、微波爐、電視）提供動力，同時避免車輛於寒冷天氣時常發生的車輛啟動問題。研究指出，為了減少空轉，有一些替代技術是可利用的，包括電池廂、輔助動力機、直熱式加熱器與熱儲存系統，但這些技術都有其限制存在，例如：使用電池動力持續一整晚會對車輛的電池產生極大威脅，進而縮短電池之壽命，目前的輔助動力機則因過重、價格太貴與噪音等因素，而直熱式加熱器與領卻氣可用來輔助恆溫控制系統，但不能提供電力給其他附屬設備，如電視或冰箱。而輔助動力裝置（Auxiliary Power Unit）可以取代柴油曳引引擎之空轉，且其可為貨車產業所接受。燃料電池為一前景看好之 APU 技術，其可減少空氣污染物之排放及能源消耗與節省金錢。空轉可分為任意（非必要性）與非任意（必要性）兩種，任意（非必要性）之空轉包括一整夜空轉、運送空轉、維持駕駛人舒適度之空轉等，使用燃料電池將可去除這些不必要之空轉，非任意（必要性）

之空轉包括交通量大時之間斷性空轉、初始發動期間之空轉等，Brodrick et al. (2002)只探討任意（非必要性）空轉的部分，結果顯示，若使用燃料電池 APU，則每年會節省 0.2-1 噸於空轉時的氮氧化物排放量，而 APU 的成本節省與 APU 之市場成本有關，亦與燃料消耗之種類與數量有關；此外，研究結果亦顯示，使用氫燃料 PEM 貨車業者之資本回收時程可能為 2.6-4.5 年左右，而回收時程對於空轉時的燃料消耗非常敏感，回收時程從每小時 2.25 加崙的柴油消耗需 1.3 年到每小時 0.6 加崙的柴油消耗需 6.5 年不等。研究亦提及，燃料電池燃料供應站之普及程度為另一影響 APUs 之採用狀況的影響因素。

Sperling(2003)則以布希政府推動氫燃料之燃料電池車的新計劃“Freedom CAR”取代之之前柯林頓政府所推動之低燃耗汽車的計劃“PNGV（新一代汽車開發合作計劃）”為主題，藉以分析探討如何邁向氫能經濟。CAR 是 Cooperative Automotive Research（合作汽車開發）的縮寫，新計劃的目的是在提高轎車和卡車的效率、降低運輸成本的同時，消除大氣污染。Freedom CAR 面臨兩個大的挑戰課題：（1）燃料電池成本必須降低（2）必須構建氫燃料供應站之網路配置；此外，若消費者受足夠之刺激或獎勵而願意購買燃料電池車的話，則研發技術與基礎設施將可早日同時商業化。為了以氫為運輸燃料，有必要於短期之內構建全國性網路配置以方便於氫之生產、配置與儲存，長期而言，則有必要引進天然氣或徹底開發新資源與發展生產過程以供應足夠的氫能，美國能源部門與其他能源相關單位正積極在發展未來可使用生物遺骸、陽光、煤炭與核能來供應大量的氫能。聯邦政府清楚的扮演其角色在於加速燃料電池車之技術方面，為了可以成功的在未來加速氫能運輸之推動，美國進步政策學會（Progressive Policy Institute；PPI）支持以下七點計畫：（1）提供資金以致力於減少燃料電池車之成本，（2）建立供應與配置氫能之基礎設施，（3）擴大 Freedom CAR 之範圍包括能源部門，（4）訓練未來的工程師、汽車工人與技師，（5）Freedom CAR 繼續將焦點放在未來的研發技術，（6）將 Freedom CAR 與政策連結在一起以促成一個清潔能源之未來，（7）增加 Freedom CAR 的資金。

小結

過去燃料電池車相關研究多著重在能源效率與研發技術、成本效益面作探討與分析。於能源效率與研發技術層面，分析並比較燃料電池車與傳統燃油車間之運作效率、能源的節省與燃料消耗率；於成本效益分析面，著重以環境成本、社會成本及車輛本身之成本為主題作深入分析，結果均顯示燃料電池車對於外部成本有顯著之改善成效，可節省社會成本之支出，而燃料電池高成本結構則為當前最需積極解決之問題。過去此方面文獻均未涉及燃料電池使用量之探討，故較難看出燃料電池高成本與使用量之間變化之關係，對政府部門而言，若欲及早達成燃料電池車普及化與規模化之目標，則有必要針對燃料電池公車成本結構、與補貼策略與使用量間之關係作深入分析與探討，以研擬相關政策達致規模經濟。

表 2-3 燃料電池車相關文獻

研究類型	作者	研究課題	內容摘要
能源效率 及研發技 術	Folkesson et al.(2003)	以混合式質子膜燃料電池概念公車為對象，於真實生活之測試進而探討燃料電池公車之優點及其後仍需努力之課題	燃料電池系統運作效率、能源的節省與燃料消耗率均比一般車輛為佳；仍需努力之課題主要是成本之降低
	Hörmandinger et al.(1996)	以燃料電池在公共運輸上之應用為題，探討其對於環境成本之影響	燃料電池公車需擴大其車隊規模與氫能供應設施，加上補貼之方式才能達致規模經濟
成本效益 分析	Ekdunge and RÅberg(1998)	燃料電池車之能源使用、排放物與成本	燃料電池車以氫氣作為燃料時不會產生排放物，而使用之薄膜或催化劑等原料成本過高，須適時降低才能達到燃料電池車普及化之目標
	Contadini(2000)	以社會成本之觀點對燃料電池車使用不同燃料之結果進行比較	對於人體健康傷害程度之成本減少方面，以甲醇之表現為最佳；純氫燃料電池車與甲醇燃料電池車車輛成本之差異對於社會成本之變動有顯著之影響
	Matheny et al.(2002)	以車輛噪音為課題，並以實際測試之方式探討燃料電池公車內部與外部之噪音排放量及其影響程度	磷酸型燃料電池公車安靜程度顯著優於傳統燃油公車；空氣壓縮機之音量則為車體外部最大者，故其元件結構應重新設計，以減少噪音源對車內乘坐者造成之影響程度加以惡化
	Santarelli and Bertonasco (2003)	探討不同燃料供應技術於義大利都會區之公車服務，並在能源、經濟、環境與社會等層面進行比較	以總成本之觀點而言，天然氣公車具競爭性；若系統成本能降低進而使營運成本能減少的話，氫能燃料電池公車在未來市場趨勢更具競爭力

[資料來源：本研究整理]

表 2-3 燃料電池車相關文獻（續）

研究類型	作者	研究課題	內容摘要
其他	Brodrick et al(2002)	重型柴油貨車裝設燃料電池動力輔助裝置之評估	裝設燃料電池 APU 於引擎空轉的位置可大量減少貨車之燃料消耗、污染物排放、溫室氣體排放，成本節省程度與資本回收時程與 APU 之市場成本、燃料種類與消耗量有關
	Sperling(2003)	邁向氫能經濟	提高轎車和卡車的效率、降低運輸成本的同時，消除大氣污染，還有一個重要的目的就是降低對海外原油的依賴程度，美國將大力扶持從國內的可再生能源中提取氫的研究

[資料來源：本研究整理]

2.4 灰色理論應用於交通運輸上

近年來灰色理論已廣泛應用在各個專業領域，交通運輸方面亦不例外，不論是公路、海運或航空運輸，均已有許多相關研究成果，以下即針對近年來應用灰色理論之交通運輸相關文獻進行回顧，並將其整理成表 2-4。

Hsu and Wen(2000)以一航空公司客運網路為對象，系統化應用灰色理論進行一系列研究，包括構建航線運量預測、航空網路形態設計、航線班機頻次規劃與機型指派模式。研究分為三部份，第一部份為航空運量預測模式之構建，應用並修正灰色預測理論構建運量預測模式，且以包絡灰區間估計未來運量發展的可能範圍。第二部份為航線形態之設計，應用灰色聚類法進行航線候選，以設計航線網路形態。第三部份規劃航線頻次與機型指派，以追求網路航線中航空公司營運成本與旅客成本最小為目標，考慮航線頻次規劃與機型指派對航空公司營運成本與旅客延誤時間之間的權衡取捨，並針對未來運量之動態變化，進行動態規劃。研究結果顯示，灰色修正運量預測模式對運量變化之擬合與上下包絡灰區間對運量未來發展狀況之掌握能力，均較傳統迴歸模式與時間數列模式具有較佳之能力。

王小娥等(民 87)以兩岸海運直航為主題，並評估通航政策之因素。就經濟層面而言，台灣與大陸間海運往來數量變化及港埠間運量分佈變化之資料，為攸關兩岸評估直航之經濟效益與航線及港埠規劃之必要資料。故其以 1991-1996 年現

行經第三地轉運之運量資料再加上境外航運中心之運量資料，透過灰色理論構建運量運測模式，再透過重力模式來構建兩岸間之運量分配模式，並考慮兩岸直航後阻力函數之變化，以反映直航後運量可能成長之潛力。研究結果顯示，台灣出口至世界各地之運量分配，直航前後均以出口至大陸及香港為最多，約佔總出口量之 60%；未來兩岸直航運量分配之估計方面，直航前台中港所佔運量為總運量之 17.98%，直航後為 22.18%，而基隆港直航前佔總運量之 18.62%，直航後為 19.62%，其顯示台中港之地位於直航後將逐漸取代基隆港。此外，研究亦建議各港有必要將其與大陸各港口之運量統計納入其統計資料的正式編列工作中，以利研究與分析之需要。

黃泰林等(民 87)以境外航運中心市場運量為主題，說明運量需求分析及預測為政府政策之研擬與業者制定對策之主要工作，且適切之分析與預測將能準確掌握未來進出港埠之貨物型式及數量，並可進一步規劃出適當之船席，以提供良好的港埠運輸設施。研究根據交通部統計之境外航運中心貨運量資料，在不考慮其他外在環境、社經變數之影響下，透過灰色理論嘗試以「月運量」及「季運量」的資料分別進行 GM(1,1)運量預測模式之構建，以瞭解境外航運中心之成長狀況。研究結果顯示，以季運量作為模式資料輸入的方式，在各評估指標方面皆比以月運量為輸入之方式為佳；此外，研究亦指出，針對境外航運中心貨運量所進行之預測中顯示，其貨運量呈現一穩定成長之狀況，但實際上受限於當時政府「戒急用忍」之政策等因素影響下，未來之成長幅度將十分有限。最後，作者亦建議需進一步做如兩岸開放更多港口或經貿園區與加工出口區之設置等經營管理面之分析，將更能精確掌握其對運量之影響。

周文生等(民 89)以品牌計程車服務品質評鑑指標擷取為題。其指出，過去在計程車之相關文獻方面所採用之評鑑指標及項目有很大的差異，業者並無統一遵循之標準，亦無法反映出各方所需，且評鑑所採用之指標其間關聯性之問題亦鮮少提及。故其研究以顧及指標之精確性、齊備性，同時考量調查成本與資料獲取之難易程度，廣泛蒐集評鑑指標，經由問卷調查學者、專家、管理者與消費者之方式，將其認為重要之車輛設備及服務績效兩大類共 24 項指標，以灰色理論中之灰關聯分析模型求算出各大類指標間之關聯度，各擷取了車輛設備 7 項及服務績效 6 項具代表性之評鑑指標，並納入其所定義品牌計程車服務品質四大層級指標—可靠、舒適、安全及便利，最後構建出品牌計程車服務品質評鑑架構，並以層級分析法求算出各評鑑指標之權重，以作為評鑑之依據。研究結果顯示，四大目標之相對權重依序為安全(0.3949)、可靠(0.2517)、舒適(0.2055)、便利(0.1479)。最後，研究建議計程車評鑑工作應由制度面著手，建立一套計程車評鑑作業規定，訂定服務品質評鑑指標，決定各指標之權重，並經常性、定期性進行評鑑，以確實改善計程車之經營環境，建立行業之尊嚴，進而提升計程車司機工作士氣與服務品質。

楊庸昇(民 88)探討台南都會區大眾運輸技術之選擇。過去國內的一般做法上

是在傳統無專用路權、低運量之公車系統與完全獨佔式路權、高運量之大眾捷運系統間做抉擇，而對於其他運輸系統所可能帶來之公共運輸發展潛力以及其所建立之新運輸環境，皆較缺乏深入之瞭解與探討，且鑑於影響都會區大眾運輸技術選擇之因素十分廣泛且複雜，其中並存在著模糊性，故作者即以灰色理論結合模糊理論且引入運輸經濟之觀念，構建出一套完整且客觀之評估體系，以強化過去無法適切地反映出都會區當地之實質環境特性與社經狀況之評估方法，並以台南都會區進行實例研究。研究首先透過文獻彙整並從中擷取初始之評估準則集，其次應用灰色統計法與模糊層級分析法，藉由各相關領域專家學者之篩選進而確立評估架構，最後再以運輸經濟概念之灰色聚類法作為各替選方案績效之評估程序。研究結果發現，台南都會區未來大眾運輸成敗之關鍵因素在於「運輸需求」；另外，捷運系統是最不適合台南都會區的大眾運輸系統，而輕軌運輸系統與改善服務的公車運輸系統皆較適合於台南都會區之實質環境與社經狀況，雖然如此，但此二者之適用程度仍未臻理想。

馮正民等(民 90)指出，航空市場已從生產者導向轉為消費者導向，且業者所面臨之市場競爭日趨激烈，加上近年來經濟環境之變遷，使原本營運上即面臨強大挑戰之業者，其財務狀況更顯困窘。有鑑於此，作者即建立一套完整之績效評估指標，協助業者發現經營上之問題並作為提昇績效之依據。在過去有關運輸產業績效評估指標之文獻方面，以形成評估指標集合的途徑來區分，有利用航空公司競爭力影響因子產生評估指標、有從服務水準觀點研擬評估指標、有以不同立場或目的產生指標集合、有以效率與效果形成初擬評估指標集合等。而此研究保留過去文獻中經常使用之營運層面外，另加入財務層面共同建立航空運輸業之績效評鑑架構，此主要基於財務報表可反映公司當期之營業結果與財務狀況，而服務水準之高低亦可於財務報表中反映出來。研究應用灰色關聯分析法於指標間關聯度之探討，將高關聯度之指標歸為一群，並從中擷取具代表性之指標。結果顯示，從 63 個初選評估指標中擷取 27 個代表性指標，其中 13 個分屬於三大類營運績效(生產效率、行銷效率與執行效率)，14 個則分屬於四大類財務績效(償債能力、獲利能力、投資報酬率、資產與負債週轉率)。

張有恆等(民 90)從航空業者之觀點出發，探討飛安水準與航空公司經營管理之相互關係，且以國內某航空公司之營運與飛安之相互關係為例，除了預測其飛安水準之外，並針對航空公司內部之營運資料進行灰色預測，利用有限的資料分析航空公司經營管理對其飛安水準之影響。研究將影響飛安水準之因素分為營運前的投入因素以及營運後的產出因素，投入因素包括公司規模、機隊、維修、訓練與公司策略等，產出因素則包括公司營業利潤、公司形象以及員工離職率等。研究結果顯示，在投入因素方面，飛行員訓練次數、維修總支出、機隊大小、飛航班次及平均機齡對飛安危險指數之影響較大；在產出因素方面，員工離職率與飛安之關係最為密切，而與飛安水準成正相關者為純益率、投資報酬率、承載率，而員工離職率與飛安水準則成負相關，即當飛安績效愈差，員工離職率亦愈高；

最後，公司規模大小對飛航安全水準之影響似乎不顯著，而其中飛行員訓練次數以及 CRM(Customer Relationship Management)上課次數與飛安水準之關係最為密切。

小結

近年來在私人運具使用量不斷成長下，都市道路容量不足以致服務品質低落，進而造成使用者擁擠成本增加，而私人運具之使用亦造成都市空氣品質逐漸惡化，嚴重影響民眾之身體機能與生活品質。回顧上述各類型之相關文獻，燃料電池公車屬一清潔且能源效率高之大眾運具，在現階段所有低污染運具中為一競爭力高且前景看好之運具，而其燃料之使用亦符合未來氫能經濟之潮流。然而，過去之燃料電池車相關文獻多僅探討技術面與成本效益面，鮮少著墨燃料電池公車成本面與相對之需求面進行供需互動分析，而過去灰色理論在運輸界相關之研究多著重於運量預測以及績效指標之擷取，較少對運輸相關成本進行預測。故本研究針對燃料電池之特性，分析燃料電池公車主要核心之成本結構，於需求面分析影響公車業者使用燃料電池公車系統之因素，並考量政府部門補貼之態度，於供給成本面探討車輛成本與氫能供應站成本，且構建經濟成本模式並規劃在政府部門補貼下，共同推估業者供需均衡使用量，以作為進行經濟分析之依據；最後，加入環保之觀點，分析在使用燃料電池公車下，依據環境污染改善之成效進行績效補貼規劃模式。研究結果在學術貢獻上可補過去研究之不足，以期能提供其他相關研究領域之參考；實務上，透過政府部門資本補貼下所決定之業者均衡使用量與後續依據環境污染改善效益所規劃之績效補貼，可協助政府相關部門制定相關策略，朝燃料電池運具普及化與永續運輸之目標前進。

表 2-4 灰色理論應用在交通運輸之相關文獻

研究類型	作者	研究課題	研究方法
航空運量運測與網路設計	Hsu and Wen(2000)	系統化應用灰色理論進行構建航線運量預測、航空網路形態設計、航線班機頻次規劃與機型指派模式等一系列研究	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色修正預測模式 ◆ 灰色聚類法 ◆ 數學規劃
海運運量運測	王小娥等(民 87)	以兩岸海運直航為主題，並利用 1991-1996 年現行經第三地轉運之運量資料再加上境外航運中心之運量資料進行運量預測，以反映直航後運量之變化與其可能成長之潛力	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色預測模式 ◆ 重力模式 ◆ 後阻力函數
	黃泰林等(民 87)	以境外航運中心市場運量為主題，在不考慮其他外在環境、社經變數之影響下，嘗試以「月運量」及「季運量」的資料分別進行運量預測，以瞭解境外航運中心之成長狀況	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色預測模式
績效評估指標	周文生等(民 89)	以品牌計程車服務品質評鑑指標擷取為題，同時考量調查成本與資料獲取之難易程度，並廣泛蒐集評鑑指標，且經由問卷調查學者、專家、管理者與消費者之方式構建出品牌計程車服務品質評鑑架構	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色關聯分析 ◆ 層級分析法
	馮正民等(民 90)	建立一套完整之績效評估指標，隨時掌握航空公司之經營績效，且協助業者發現經營上之問題並作為提昇績效之參據	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色關聯分析
其他	楊庸昇(民 88)	建立一套都會區大眾運輸技術選擇之評估架構，並探討輕軌運輸系統之相關特性	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色理論 ◆ 模糊理論 ◆ 模糊層級分析
	張有恆等(民 90)	以航空公司經營管理面之觀點出發，探討國內某航空公司之營運與飛安的相互關係，並預測其飛安水準，進而指出飛安對其公司之影響	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 灰色預測模式

[資料來源：本研究整理]

2.5 大眾運輸之補貼

政府對大眾運輸之補貼方式一般可分為「金錢補貼」與「非金錢補貼」兩大類，如圖 2-4 所示。茲分別說明如下：

一、非金錢補貼：

非金錢補貼乃政府不直接或間接支付金錢給大眾運輸業者，而是透過行政上之管制、獎勵或優先措施給予業者補助，以改善大眾運輸經營環境，例如設置公車專用道、優先號誌、先進大眾運輸系統技術協助等。

二、金錢補貼：

就不同補貼對象而言，金錢補貼方式又可區分為對使用者補貼與對營運者補貼，對使用者的補貼方式即為費率補貼，對營運者之補貼方式可再區分為資本補貼與營運補貼，其中營運補貼又可依補貼基準不同分為虧損補貼、投入成本補貼、績效（產出）補貼三種，而虧損補貼則為目前大眾運輸補貼方案中最常使用的方式。茲將各種補貼方式說明如下：

1. 對使用者補貼－費率補貼

此乃因政府針對管制下之單位費率在不敷成本時，對於使用者給予票價與成本之間的差額補貼。

2. 對營運者補貼

（1）資本補貼：大眾運輸由於系統的投資成本相當龐大，且在經營上很多業者連營運成本都無法收回。所以政府常以低利貸款或市以值街金錢補貼的方式補貼大眾運輸的資本投資。除了系統建造的資本投資外，亦有對設備的汰舊換新、場站用地購買等予以補助。

（2）營運補貼：營運補貼依補貼之基準不同又可區分為虧損補貼、投入成本補貼與績效（產出）補貼三種方式。

■ 虧損補貼：對業者營運成本與收入間的赤字予以全部或一部份補貼，為目前大眾運輸補貼方案中最常使用的方式。

■ 投入成本補貼：此乃對業者全部營運總成本或部份成本給予某固定數額或比例的補貼。其補貼項目可能為總成本、燃料成本或特定路線之營運成本等。

■ 績效（產出）補貼：此乃以大眾運輸的產出或績效做為補貼金額分配之依據。一般大眾運輸之「產出」（如：延人公里、延車公里、班次數等）或「績效」（如：成本效率、成本效果及服務效果等）當作績效指標，以做為補貼金額

之依據。

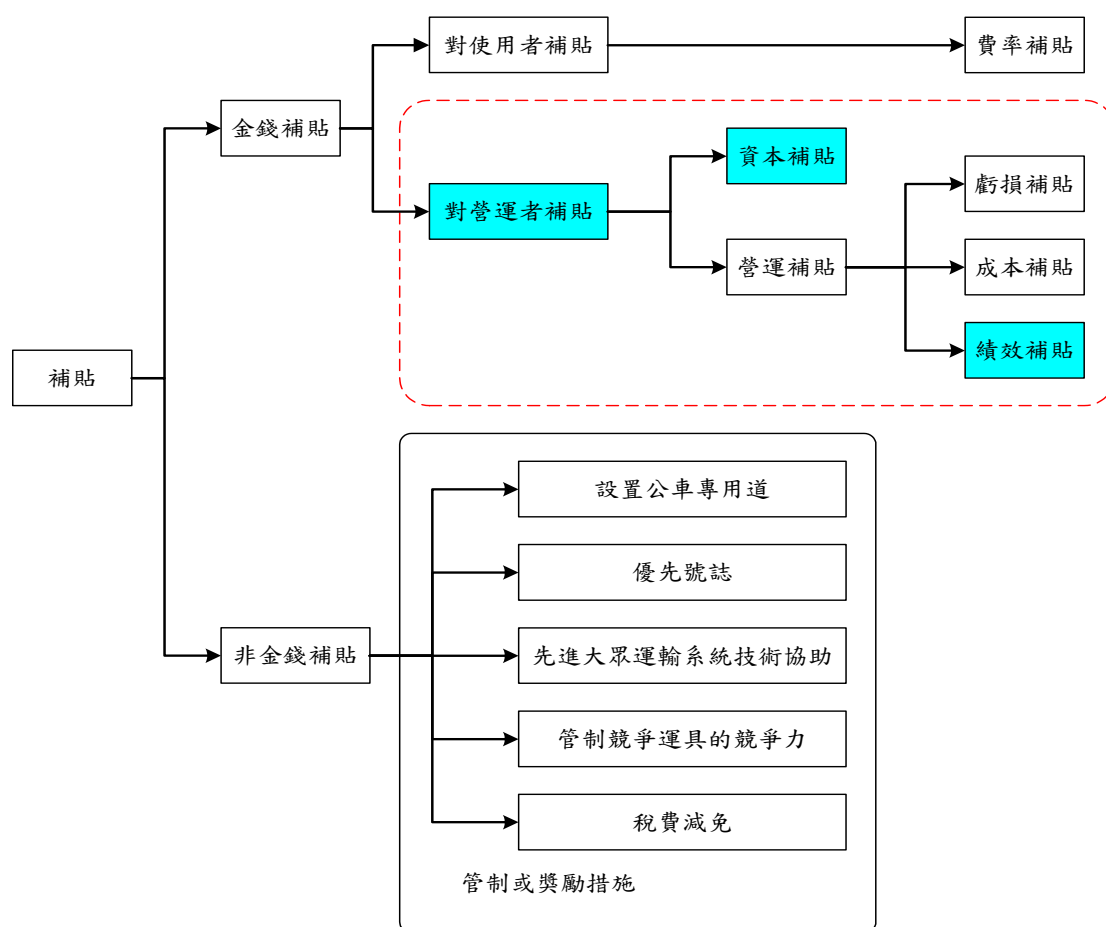


圖 2-4 補貼方式分類圖

[資料來源：交通部運輸研究所（民 92）]

圖 2-4 為目前大眾運輸補貼方式分類圖，本研究主要探討之範圍為金錢補貼中對營運者補貼的部分，即圖中虛線的部分，其中又以資本補貼與績效補貼為主，即圖 2-4 虛線範圍內陰影的部分。此外，各種補貼方式均有其被採用之優點亦有相對之缺點，茲將各種補貼方式之優缺點整理如表 2-5 所示。

表 2-5 各種補貼方式之優缺點比較

補貼方式	優點	缺點
資本補貼	<ul style="list-style-type: none"> ■ 鼓勵業者投資於新設備，提高營運效率，降低營運成本 ■ 促使業者擴充服務於新路線 ■ 較其他營運補貼易於控制 	<ul style="list-style-type: none"> 易造成投資過度、資源浪費、設備閒置
虧損補貼	<ul style="list-style-type: none"> ■ 與業者之財務需直接相關 ■ 分配方式簡單但需良好會計制度 ■ 可維持營收較差之服務 ■ 可維持較低之票價 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 沒有效率的業者將獲得較多的金額，不公平 ■ 對業者沒有促進效率的動機，業者將不積極控制成本，造成更大的虧損 ■ 所需之金額難以估計，過大之虧損將造成政府沉重的負擔
投入成本補貼	<ul style="list-style-type: none"> ■ 與業者之財務需直接相關 ■ 分配方式簡單但需良好會計制度 ■ 可促使票價降低 ■ 可針對特殊的服務補貼 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 成本的確定不易 ■ 造成鼓勵較高成本的現象 ■ 所需之金額無法預估 ■ 金額分配與業者績效無直接關聯 ■ 造成某種生產因素過度利用
產出(績效)補貼	<ul style="list-style-type: none"> ■ 直接與系統績效有關，對業者有促進效率之動機 ■ 促使業者努力吸引更多的乘客 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 需要相當多且正確的資料 ■ 所需金額無法預估 ■ 合理衡量績效指標，難以建立與說明，分配方式困難 ■ 無法配合業者財務需要 ■ 可能促使業者重視營收較高之路線，而不願發展新路線的服務
費率補貼	<ul style="list-style-type: none"> ■ 可達到照顧乘客之目的 ■ 可吸引更多人使用大眾運輸 ■ 可配合業者財務需要 ■ 補貼資金分配方式簡單 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 票價彈性低則無法達到補貼的目標 ■ 業者把虧損責任推給政府

[資料來源：張有恆（民 79）]

近年來有關大眾運輸補貼方面已有許多研究成果，以下即針對近年來國內外大眾運輸補貼相關文獻進行回顧，並將其整理成表 2-6。

林佳宜(民 85)結合公式型補貼及申請型補貼兩種補貼分配方式，並考慮中央政府與地方政府階層性的決策行為，建立二階層的補貼分配模式，進行補貼計畫的選取與補貼款的分配。其設計之補貼分配制度是採路線別的補貼方式，將路線區分為服務路線與一般路線，對其分別採行虧損補貼及績效補貼。其中地方政府的目標為追求各地方補貼總效益最大，而中央政府的目標為追求各地方得到的補貼差益最小，限制式則為補貼預算之限制。分析結果指出，補貼分配模式中之參數，如公式補貼款補貼業者比例、及地方配合款佔總補貼款之比例等的改變，將會影響計畫的選取與補貼款的分配。

程玉萍(民 87)考量國內現行大眾運輸補貼制度，以「費率」及「各路線行駛車公里數」為決策變數，分別由政府及業者角度建立以「路線別」為基礎之評估模式。並有效分析受補貼及未補貼路線受補貼制度影響之差異。分析結果顯示政府實施偏遠路線營運虧損補貼，確可提高業者經營偏遠路線之意願，而現行補貼制度未必能提高業者經營效率。此外，研究亦針對績效補貼與虧損補貼進行比較分析，結果指出，在相同補貼款支出條件下，績效補貼可獲得較高之系統社會福利及各路線之行駛車公里數。

陳俊宏(民 88)採用資料包絡分析法(DEA)評估業者的營運績效，包含成本效率面(cost efficiency)及服務效果(service effectiveness)面，分別以補貼前及補貼後兩年度各公司補貼路線資料，構建CCR成本效率評估模式及CCR服務效果評估模式，進行效率及效果分析、差額分析及敏感度分析，並比較補貼前後的差異。

李明彥(民 89)針對營運虧損補貼措施進行探究，由受補貼業者之實際因應行為出發，透過計量經濟模型之建立以評估補貼措施之執行成效。在實證研究上以台北市聯營公車近三年來受補貼路線之成本及營運資料構建受補貼路線成本函數，以為各項經濟分析及政策義涵探討之基礎，並採總要素生產力(TFP)研究方法，剖析補貼對業者生產力變化之影響效果。由生產力變化分析結果顯示，公車處之受補貼路線，在分析期間內技術變動效果造成總要素生產力略為下降，且補貼對生產力之影響有每下愈況之趨勢。此外，其研究亦發現，在當前之補貼分配方式下，確實存在補貼資源分配不當之情況。

Frankena(1981)對不同的補貼方式進行經濟效益分析，並以車公里數最大及載客數最大為營運目標，另對成本補貼、定額補貼及乘客補貼等不同補貼方式進行分析。其研究結果顯示，補貼會具有降低費率、提昇服務水準及吸引較多乘客之效果。若以載客數最大化為目標，則定額補貼及乘客補貼之效果一致，但成本補貼相較於其他兩種補貼而言，則會導致較高票價、較高服務及較少的客源的結果。

Frankena(1983)另以損益平衡為限制式，以延人公里最大化為目標進行公車系統最佳費率與服務水準之求解及補貼公式，結果發現其無法使公車

系統達到最大效率，而應以載客數最大為目標才能達到經濟效率。

Bly and Oldfield(1986)分析公車服務、效益最大化及補貼報酬率之關係，研究中並構建總體模式，且分類不同的乘客，以淨效益最大化作為目標式，損益平衡為限制式，進行最佳化求解。研究結果指出，在追求最大淨效益目標下，補貼之效率在費率降低的效果大於服務水準的提昇。

小結

在大眾運輸補貼文獻方面，大多探討補貼制度與營運虧損之議題，鮮少著墨於業者之資本補貼，故本研究所探討之補貼除了業者硬體方面之資本補貼外，亦將以往以每車里為基礎之補貼轉換為每車公里空氣污染減量之績效補貼，以將政府部門對空氣污染改善的政策目標實際反映至影響業者對燃料電池公車選擇行為上。

表 2-6 大眾運輸補貼相關文獻整理列表

作者	研究課題	內容摘要
林佳宜(民 85)	大眾運輸補貼分配制度	結合公式型補貼及申請型補貼兩種補貼分配方式，建立二階層的補貼分配模式，進行補貼計畫的選取與補貼款的分配。
程玉萍(民 87)	大眾運輸補貼評估模式	考量國內現行大眾運輸補貼制度，建立以「路線別」為基礎之評估模式，並分析受補貼及未補貼路線受補貼制度影響之差異。
陳俊宏(民 88)	公路汽車客運業補貼前後成本效率與服務效果之比較	採用資料包絡分析法（DEA）評估業者的營運績效。
李明彥(民 89)	營運虧損補貼對台北市聯營公車成本與生產力之影響	透過計量經濟模型之建立以評估補貼措施之執行成效。
Frankena(1981)	不同的補貼方式之經濟效益分析	以車公里數最大及載客數最大為營運目標，另對成本補貼、定額補貼及乘客補貼等不同補貼方式進行分析。研究結果顯示，補貼會具有降低費率、提昇服務水準及吸引較多乘客之效果。
Frankena(1983)	大眾運輸目標與補貼效率	以損益平衡為限制式，以延人公里最大化為目標進行公車系統最佳費率與服務水準之求解及補貼公式。結果發現，應以載客數最大為目標才能達到經濟效率。
Bly and Oldfield(1986)	補貼對客運業服務之分析評估	構建總體模式，分類不同的乘客，追求淨效益最大化為目標式，損益平衡為限制式，進行最佳化求解。

[資料來源：本研究整理]

第三章、燃料電池公車系統模式構建

為深入探討公車業者採用燃料電池公車之意願，本研究以公車業者所關心之成本結構為基礎，分別深入分析燃料電池公車系統成本結構隨時間推移之變化情形，且探討政府部門補貼策略對公車業者採用行為之影響並進行分析，同時構建數學規劃模式，以分析公車業者未來在有補貼之條件下，可能願意使用之燃料電池公車數量，藉以進一步評估空氣污染改善成效，並做為範例分析與敏感度分析之基礎。3.1 節首先說明本模式之基本觀念與架構；3.2 節以影響公車業者選擇燃料電池公車之因素建立效用函數，進而藉以構建需求函數；3.3 節以解析性方法構建公車業者採用燃料電池公車系統之成本函數；3.4 節則蒐集相關資料與數據，分析未來與燃料電池公車系統相關成本之變化情形，藉以做為政府部門評估相關補貼策略之依據。

3.1 基本觀念與分析

隨著經濟之發展與科技之進步，私人運具使用比例逐年攀升，間接造成大量的空氣污染，為解決此問題，就政府大環境之政策面而言，除了就現有燃油公車運輸系統與設施面進行改善之外，使用潔淨之新興能源運輸系統以滿足人類「行」的需求已成為一個可考慮的方式，且能源耗竭與環境污染為近年來國內外各界所關注之議題之一，為滿足政府永續運輸之政策目標下，燃料電池公車具有高效率與清潔之特性，屬一清潔能源，故以其作為都市大眾運具可同時解決能源耗竭與環境污染兩大問題。當一新興運輸系統欲引入運輸市場時，其供給面與相對之需求面存在著相互影響之關係，因此研究如何配合政府環境政策目標，且在符合公車業者營運成本之考量下，燃料電池公車於運輸市場之潛力亦成為迫切需分析之課題，因燃料電池公車系統相關成本之高低實為影響公車業者是否願意使用燃料電池公車之關鍵因素。本研究即針對此課題探討未來燃料電池公車系統成本變化情形，並在政府部門補貼助力下，決定公車業者願意使用之均衡數量，同時評估其對外部成本改善之成效，以作為政府部門研擬補貼策略之參考指標。

公車業者在面臨抉擇或評估是否採用燃料電池公車加入其路線營運時，主要考量之因素首推燃料電池公車系統成本之高低，因其為最直接影響公車業者營運成本之負擔，對業者而言，這是一個最現實且亦為最棘手之問題，當業者須負擔之成本愈高時，其使用意願自然不高，故公車業者對燃料電池公車加入營運進行可行性評估時，首當需對其成本結構進行分析，包括與燃料電池公車系統相關之車輛成本與設施成本。在探討燃料電池車輛成本結構前，需先了解傳統燃油公車與燃料電池公車結構上之主要差異性。傳統燃油車輛是以汽油或柴油為燃料，並

配合內燃機引擎 (Internal Combustion Engine) 之燃燒，燃燒過程是由點火激起，此過程將會於燃燒室壁留下一層尚未被燃燒的碳氫化合物，其中有部分常與燃燒過的廢氣混合，共同排出，故當燃燒不完全或燃燒過剩時，會使車輛排氣管所排出之廢氣形成複雜之混合物，除了水、氮氣與二氧化碳之外，尚包括一氧化碳、未燃燒的碳氫化合物、部分燃燒之碳氫化合物、氫、氮氧化物及各種懸浮微粒，因燃燒過程是動力現象，故藉由燃燒反應結果所釋放之動能使車輛能夠移動，且廢氣排放量較一般自小客車來的多；反之，燃料電池車輛主要之關鍵元件為燃料電池組 (Fuel Cell Stack)、電驅動系統 (Electric Drive System) 與儲氫裝置 (On-board Storage)，燃料電池車輛之發電原理是使氫氣與氧氣產生反應，使化學能直接轉變為電能，在燃料電池發電的同時，適時配合代替傳統引擎功能之電驅動系統，並填滿氫能於儲氫裝置，進而使車輛能夠驅動。其中，燃料電池組與電驅動系統之成本高低主要取決於單位千瓦之成本 (元/kW)，因燃料電池相關技術之發展與演變會使此單位瓦之成本而有所變化，為公車業者較難掌握之成本項，而儲氫裝置則較為單純，其成本之高低主要取決於其容量大小，一般而言，若車輛儲氫容量愈大時，則成本相對亦愈高，故其為公車業者較易掌握之成本項。

在相關設施成本方面，主要須考量氫能供應站之設置，氫能供應站與現有加油站功能類似，主要目的在於補充燃料電池車輛所需之氫能，現有客運公車之車隊大部分補充燃油之方式多在自行設置之燃油補充站做處理，而鮮少至現有一般加油站去補充燃油，因其對燃油需求量大且車隊數多，故有規模經濟之效益；但若考量燃料電池公車系統時，由於燃料電池公車初期引入運輸市場時，需求量屬尚少量階段，故氫能供應站之設置可規劃為多家公車業者共用，以分攤龐大之成本，待日後需求量若增加時，可再視業者使用情況逐步增設。而其他相關成本如氫能供應站營運成本與設備維護成本等，亦為公車業者所關切之核心問題。

另一方面，燃油價格與氫能價格之高低亦為影響公車業者使用燃料電池公車之重要因素，而燃油價格與氫能價格之相對關係實為一體兩面之問題。根據經濟部能源局資料之統計數據，國內歷年之原油供給量由 1993 年的 28,704.8 千公秉到 2003 年的 51,783.5 千公秉，短短十年間，急速成長了一倍多，可想而知對原油之需求程度亦相對快速增加，若進一步按部門區分，國內對石油產品之消費程度以工業部門與運輸部門佔絕大多數比例，以民國 86 年為例，工業部門之能源需求量約佔全國總量 57% (約 44.8 百萬公秉油量)，其中又以石化、鋼鐵、水泥與造紙等高耗能產業為最多，而運輸部門之能源需求量約佔全國總量 17% (約 13.2 百萬公秉油當量)，僅次於工業部門，其中又以石油產品耗用量為最主要，站運輸部門能源需求量的 99%。換言之，運輸部門之能源需求大部分來自石油產品，而在所有石油產品中，以汽油與柴油為最大宗。圖 3-1 為各部門於民國 86 年能源使用比例圖。

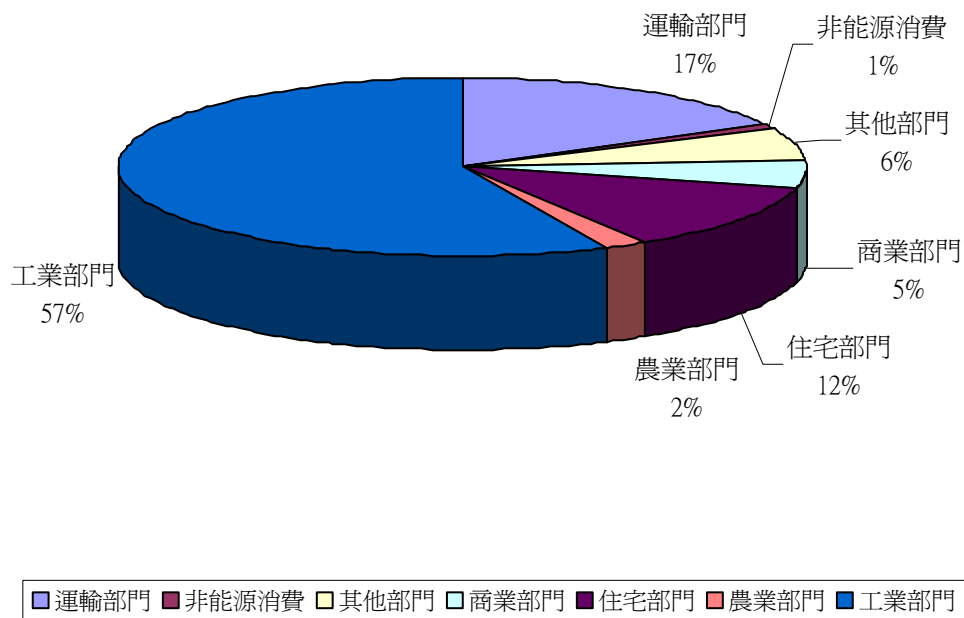


圖 3-1 各部門於民國 86 年能源使用比例圖

[資料來源：經濟部能源委員會]

另外，汽、柴油需求量在公路運輸分配之狀況如圖 3-2 與圖 3-3 所示，根據交通部運輸研究所(民 89)的推估，公路運輸中汽油之需求量以自小客車居冠，約占公路運輸部份汽油需求量 68%，其次分別為機車約占 18%、貨車約占 8%與計程車約占 6%。而公路運輸中柴油需求量則以貨車占最大宗，約占柴油需求量 88%，公車與客運/遊覽車則共站約 12%；簡言之，公路運輸整體能源消耗比重甚高。

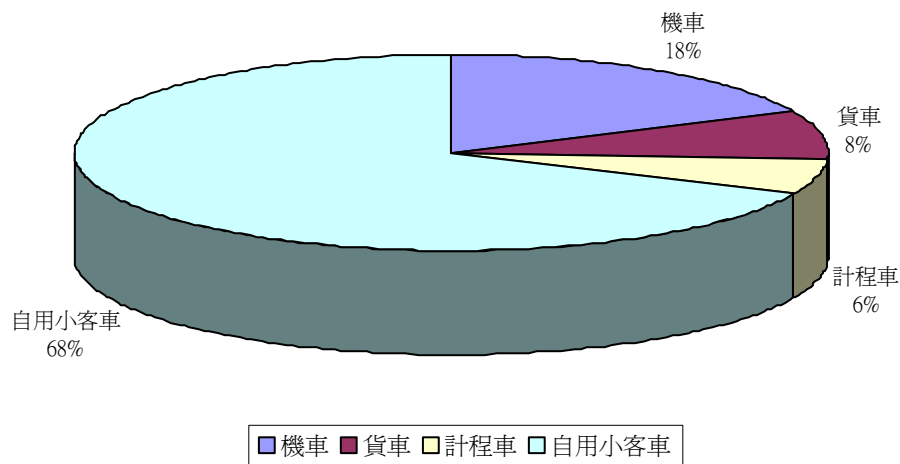


圖 3-2 公路運輸汽油使用分配狀況

[資料來源：交通部運輸研究所(民 89)]

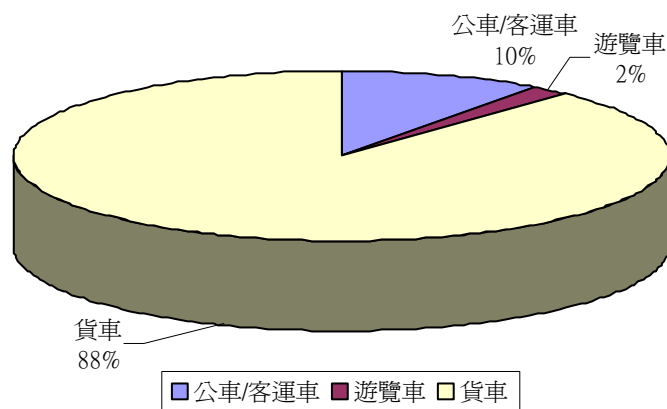


圖 3-3 公路運輸柴油使用分配狀況

[資料來源：交通部運輸研究所(民 89)]

綜言之，從早期的 1980 年開始，工業部門用油量佔 31.33%，運輸部門佔 16.27%，至 2003 年為止，工業部門用油量小幅成長至 36.82%，而運輸部門卻已激增至 33.23%，幾乎快與工業部門用油消費量並駕齊驅，未來可謂有過之而無不及，運輸部門對於石油的需求程度可見一斑，若照此趨勢走向與石油存量有限的觀點來看，未來運輸部門對於石油之需求有可能不減反增；若以油價歷年的趨勢來看亦是如此，現有公車所用之燃油皆以柴油為主，而柴油又區分為普通柴

油與高級柴油，由於行政院環境保護署規定，自起民國 88 年七月一日起，除軍用車輛及船舶之內燃機外，均不得使用普通柴油，故公車所用之燃油則以高級柴油為主，而其價格從 1993 年的 11.40（元/公升）至 2003 年的 14.90（元/公升），雖然其漲幅看似不高，但就石油存量有限與未來需求量漸增的觀點來看，勢必會對公車業者造成嚴重的影響，加以燃料成本為營運成本之主要部分，約占營運成本 15%到 20%（台灣省公共汽車客運業商業同業公會），此對公車客運業者而言實在是沉重的負擔。因此，對公車業者而言，面對近年來燃油需求量與價格不斷提高的情況下，大部分業者僅能從調整票價來因應此外在環境之威脅，從反映至乘客票價上之金額即可看出端倪，尤以國道客運票價之調整幅度最為顯著，雖然燃油價格之漲幅對都市公車而言看似沒有反應至乘客票價上，但以長期觀點而言，燃油價格不斷提高將影響公車業者龐大且沉重之營運成本，最終將影響其繼續營運之意願；同樣地，燃料電池相關產品之應用若能早日普及化，使氫能有規模經濟效益而降低其成本，進而適時反映至價格上，使公車業者有採用燃料電池公車的意願。然而，對公車業者而言，雖然油價的飆漲短期內不足以影響其繼續使用燃油公車之意願，但長期而言，隨著燃料電池技術的進步，公車業者採用燃料電池公車是有其可能性且指日可待；反之，由於現今燃料電池商品的不普遍使氫能價格仍相當高，導致油價與氫能價格仍有相當程度之差距，故短期內氫能價格即使降低，也不足以提高公車業者採用燃料電池公車的意願，但以長期觀點來看，若隨著燃料電池商品的逐漸普及，使氫能價格有下降之趨勢，進而縮短燃油價格與氫能價格之差距時，則公車業者有可能會轉而使用燃料電池公車，再加上政府部門若能適時介入，以扮演推手的角色施以補貼助力時，屆時即使氫能價格高於燃油價格，則公車業者仍有採用的可能性，而當公車業者採用量愈多時，對環境之危害改善愈多，則政府部門可研擬鼓勵採用之相關政策，進而使公車業者更加提高其採用意願，如此週而復始，不斷循環交互影響；換言之，當燃油價格與氫能價格未來波動幅度與變動趨勢將無形中直接影響公車業者採用燃料電池公車之意願。因此，本研究擬以公車業者之成本模式為基礎，藉以分析未來隨著時間推移時，燃料電池公車系統相關成本隨燃料電池技術變化之情形，而未來氫能與燃油價格變化情形亦同時納入考量，以探討未來燃料電池公車隨其成本與燃油及氫能價格相對關係之變化進而求算公車業者之均衡使用量。

本小節已介紹本研究之基本概念與基本分析，並且說明主要影響公車業者採用之成本項；3.2 小節是探討公車業者需求部分，利用影響公車業者採用燃料電池公車之因素構建效用函數，進而以其為基礎建立公車業者需求函數；3.3 小節則是以解析性方法構建公車業者採用燃料電池公車系統之成本函數，成本主要分為車輛成本與氫能供應站成本，在車輛成本方面，主要包含有燃料電池車輛折舊成本、車輛維修成本與氫能成本；在氫能供應站成本方面，主要考慮有氫能供應站之平均設置成本、平均營運成本與設備維護成本。此外，同時構建成本函數，進而分析總成本隨時間推移之變化情形對公車業者造成之影響。3.4 小節則是分別探討燃料電池公車系統與現有燃油公車系統之成本差異處，同時進行車輛等硬

體設施成本與燃料成本之比較。未來的燃油價格與氫能價格部份，本研究利用灰色預測模式來推估。

3.2 公車業者需求模式構建

本研究需求面之考量以影響公車業者使用燃料電池公車之屬性變數為基礎，並以量化屬性變數的方式構建效用函數，進而推估公車業者於其服務區域之營運路線採用燃料電池公車之需求量。本研究之替選方案為燃油公車與燃料電池公車兩種，在替選方案屬性變數選擇方面，本研究參考 Brownstone et al.(2000) 選擇替代燃料車輛之研究，以消費者選擇行為為基礎，並納入政府環保之觀點共選取其中四個屬性變數，在燃油公車的部分主要為政府補貼後之單位車輛購置成本、單位里程燃油成本、最高速度與單位里程之污染量，而在燃料電池公車方面，同樣是單位車輛購置成本、單位里程氫能成本、最高速度與單位里程之污染量。因此，燃料電池公車與燃油公車之效用函數構建如下式所示

$$U_i^{FB} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{P_{FB}'}{R_i} \right) + \beta_2 \left(\frac{P_H}{L_H} \right) + \beta_3 V_{FB} + \beta_4 \eta_{FB} \quad (3-1)$$

$$U_i^{TB} = \beta_1 \left(\frac{P_{TB}}{R_i} \right) + \beta_2 \left(\frac{P_O}{L_O} \right) + \beta_3 V_{TB} + \beta_4 \eta_{TB} \quad (3-2)$$

其中， U_i^{FB} 為業者 i 對於燃料電池公車之效用值， U_i^{TB} 為業者 i 對燃油公車之效用值， P_{FB}' 為政府補貼後之燃料電池公車單位燃料電池車輛購置成本，即 $P_{FB}' = P_{FB} - m_{li}$ ， m_{li} 為政府對業者 i 購置單位燃料電池車輛之補貼額，由於公車業者先前購入每輛燃油公車之時間點不盡相同，為簡化問題之複雜性，故本研究假設購置燃料電池公車之補貼已包含汰換之燃油公車所剩殘值。而 P_{TB} 為燃油公車之單位車輛購置成本， R_i 為公車業者 i 之平均總收益， P_H 與 P_O 分別為單位氫能價格與單位燃油價格， L_H 為單位氫能所能行駛距離， L_O 為單位燃油所能行駛距離， V_{FB} 與 V_{TB} 分別為燃料電池公車與燃油公車之最高速度， η_{FB} 與 η_{TB} 則分別表示燃料電池公車與燃油公車單位里程之污染排放率，污染物包括一般空氣污染物與二氧化碳。兩運具之單位車輛購置成本、單位里程之燃料成本、與最高速度係考慮由業者之觀點所選取之變數；而單位里程之污染量係由政府環保政策之觀點出發，透過政府給予業者空氣污染改善之績效補貼，希望藉以提高業者採用環保性運具之意願，同時可為公車業者自身形象加分，因此亦將其納入考量。

$\beta_0 \sim \beta_4$ 為校估之參數。其中，在單位車輛購置成本部份，本研究將公車業者之平均總收益 R_i 納入至模式中，以反映公車業者 i 之營收對購買一輛公車購買力之影響，因業者營收與單位車輛購置成本互為相關，故在效用函數中將兩者合併為

一變數來看，即 $\frac{P_{FB}}{R_i}$ 與 $\frac{P_{TB}}{R_i}$ 。此外，由於近年來燃油價格不斷上漲，更加重公車

業者之營運成本，因燃油成本占營運成本之絕大部分，而公車業者若考慮使用燃料電池公車時，單位氫能價格之高低亦是業者所關注的焦點之一，故運具之燃料價格與營運成本息息相關。因此，本研究將單位燃油價格與單位氫能價格納入模式中，以反映其對公車業者採用行為的影響。再者，由於燃料之能源效率將影響燃料成本的支出，故本研究亦將單位燃料所能行駛之距離一併納入考量，並與單

位燃油價格以及單位氫能價格合併來看，即 $\frac{P_H}{L_H}$ 與 $\frac{P_O}{L_O}$ ，以適時反映單位里程之

燃料成本對公車業者選擇行為之影響。綜上，本研究於公車業者效用函數上以單位車輛購置成本、單位燃料價格、車輛之最高行駛速度與單位里程之污染量等屬性變數為基礎，繼而構建公車業者需求函數。

本研究進一步以二元羅吉特模式由兩替選方案之效用函數值加以估計公車業者 i 選擇使用燃料電池公車之機率 (θ_i)，如下式

$$\begin{aligned}\theta_i &= \frac{e^{U_{FB}}}{e^{U_{FB}} + e^{U_{TB}}} \\ &= \frac{e^{U_{FB} - U_{TB}}}{1 + e^{U_{FB} - U_{TB}}}\end{aligned}\quad (3-3)$$

此外，以 N_{ij} 表示公車業者 i 在其服務範圍內路線 j 現有之平均營運車輛數，則公

車業者 i 於路線 j 對燃料電池公車之需求量 D_{ij}^{FB} 為

$$D_{ij}^{FB} = N_{ij} \cdot \theta_i \quad (3-4)$$

而公車業者 i 所需之燃料電池營運車輛數為各路線燃料電池公車數之和，即

$$\sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} = \sum_{\forall j} N_{ij} \cdot \theta_i \quad (3-5)$$

3.3 燃料電池公車系統成本模式構建

本研究於公車業者成本部份主要探討與燃料電池公車系統相關之關鍵核心成本，其可區分為燃料電池車輛成本與氫能供應站成本。在車輛成本方面主要考慮因素有燃料電池車輛折舊成本、車輛維修成本與氫能成本，而在氫能供應站成本方面，主要考慮有供應站平均設置成本、供應站平均營運成本與供應站設備維護成本，並以公車業者每年所須負擔之總成本為考量，繼而構建成本函數。其中，在燃料成本的部分，由於石油蘊藏量有限，且未來油價將呈現不斷上漲之趨勢，而氫能成本則會隨時間推移與相關製氫技術發展有關，其價格仍有下降的空間，因此本研究應用灰色預測模式來推估未來之燃油與氫能價格，且針對兩者未來價格上的差異對公車業者之影響加以分析與比較，此部份於後續 3.4 小節中再加以詳細說明之。以下即針對燃料電池公車系統相關成本項加以推導與說明。

3.3.1 燃料電池車輛成本

本研究所考慮之燃料電池車輛成本主要有車輛折舊成本、車輛維修成本以及氫能成本，其推導過程分別說明如下。

車輛折舊成本

燃料電池車輛為運輸業資本投資的一部分，其購置成本之高低將直接影響業者使用意願。以 $P_{FB,i}'$ 代表政府補貼 m_{li} 予業者 i 後之單位車輛購置成本，則在公車業者 i 於路線 j 對燃料電池公車需求量为 D_{ij}^{FB} 之考量下，業者 i 所需之車輛購置成本（ $C_{FB,i}^B$ ）為

$$C_{FB,i}^B = \sum_{\forall j} P_{FB,i}' \cdot D_{ij}^{FB} \quad (3-6)$$

然而，無論車輛或其他相關設備，通常會隨時間老化而有使用年限，且其價值通常隨使用時間增加而遞減，依成本分攤處理原則，應逐年攤提至每年所需負擔的成本中，本研究根據 Berechman and Genevieve(1984)之理論公式估算公車業者 i 每年所需負擔之車輛折舊成本（ $C_{FB,i}^D$ ），以下式表示

$$C_{FB,i}^D = 0.2 \cdot \left(P_{FB}' \right) \cdot EXP(-\sigma^2 h) \cdot \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \quad (3-7)$$

其中， σ 代表折舊率，其係假設車輛使用年限為 t 年，每年以直線折舊計算，則 $\sigma = \frac{1}{t}$ ， h 為平均車齡。由式 (3-7) 可知，隨著車輛使用年限與平均車齡之增加，車輛折舊成本將逐年降低。

車輛維修成本

車輛在正常之運行下需要例行性的保養與維修，此屬於車輛之正常損耗，故為簡化問題之複雜性，本研究在車輛維修成本方面，以 U_m 表示單位里程之車輛維修成本， L_i 代表公車業者 i 每輛燃料電池公車每年平均之行駛里程數，則業者 i 每年所須負擔之車輛維修成本 ($C_{FB,i}^M$) 如下式所示

$$C_{FB,i}^M = \sum_{\forall j} U_m \cdot L_i \cdot D_{ij}^{FB} \quad (3-8)$$

由上式可知，業者對燃料電池公車之需求量與其維修成本成正向關係，且若單位里程之車輛維修成本 U_m 或每輛燃料電池公車每年平均行駛里程數 L_i 愈大時，則公車業者 i 每年所須負擔之車輛維修成本愈高。

氫能成本

氫能成本屬於燃料電池公車系統成本中重要的一環，且其為公車業者必須付出之成本項，故需將其納入加以分析與探討。氫能成本主要與氫能價格、公車平均行駛里程與單位氫能所能行駛距離有關。若以 L_H 表示單位氫能所能行駛距離，則公車業者 i 之單一燃料電池公車每年平均所需之氫能總量 (Q_i) 如下式所示

$$Q_i = \frac{L_i}{L_H} \quad (3-9)$$

L_H 與車輛操作性能相關，且其與 Q_i 成反向關係，若未來車輛相關之研發技術不斷進步時，燃料電池車輛使用單位氫能所能行駛距離可能愈高，則可較節省所需之氫能需求量；而 L_i 與 Q_i 則成正向關係，當車輛行駛里程數愈多時，其所需之氫能相對愈多，故公車業者 i 每年所需負擔之氫能成本 ($C_{FB,i}^H$) 為

$$C_{FB,i}^H = \sum_{\forall j} P_H \cdot Q_i \cdot D_{ij}^{FB} \quad (3-10)$$

此外，若氫能價格 P_H 愈高時，將直接對公車業者營運成本造成衝擊，進而增加公車業者每年所需負擔之氫能成本。

3.3.2 氫能供應站成本

本研究考量之氫能供應站成本主要有供應站平均設置成本、供應站平均營運成本與設備維護成本，茲分別針對各成本項說明如後。

氫能供應站平均設置成本

氫能供應站為補充燃料電池車輛氫能的地方，其主要功能類似現有加油站設施，故氫能供應站之設置方式亦顯格外重要。根據 Battelle and Eudy(2003)指出，氫能供應站主要設施有電解槽 (Electrolyzer)、壓縮機 (Compressor) 與大量儲氫容器 (Bulk Storage)。若以 M 表示氫能供應站總設置成本，包括上述主要設施與其他相關附屬設備之資金成本，如通風系統、維持氫能安全設施與警示系統之成本(Battelle and Eudy, 2003)。由於目前氫能供應站設置成本較目前現有燃油供應站設置成本為高，故為提高業者採用燃料電池公車意願之目標下，政府部門可採對業者 i 提供 m_{2i} 之氫能供應站設置補貼額，同樣依成本分攤處理原則，將其分攤至每年所需成本上，則公車業者 i 每年所需分攤之平均設置成本為 ($C_{FS,i}^D$)

之計算式為

$$C_{FS,i}^D = \frac{(M - m_{2i}) \cdot X_{gu}}{\sum_{\forall j} D_{ij}^{FB}} \quad (3-11)$$

其中， X_{gu} 代表年利率為 g 且預定可使用年限為 u 年時之資本回復因子，且若業者燃料電池公車採用量愈多時，不但可降低氫能供應站之平均設置成本，同時亦可使供應站服務更多燃料電池公車數，藉以提高其利用率，進而達到可充分利用資源之效率。

氫能供應站平均營運成本

供應站之營運成本係指供應站在正常營運過程中所需之花費支出，如維持供應站正常運作時所需之電力等，如前所述，氫能供應站主要設施有電解槽

(Electrolyzer)、壓縮機 (Compressor) 與大量儲氫容器 (Bulk Storage)，故本研究即以此三個設施所需之運作成本為主要考量。在電解槽的部分， C_i^E 表示電解槽每年於營運過程中所需之運作成本，其大小主要與業者所需之氫能總量有關，計算式可表示如下

$$C_i^E = E_i \cdot U_w \quad (3-12)$$

U_w 表示單位電能之成本， E_i 代表供應站設備每年所需耗費之電能，根據 Amos(1998)之研究，其計算方式可以下式表示

$$E_i = (Q_i \cdot D_{ij}^{FB}) \cdot CP \cdot J \quad (3-13)$$

其中， CP 為壓縮機之電力參數， $J = \left[\frac{\ln\left(\frac{P}{P_{Min}}\right)}{\ln\left(\frac{P_C}{P_{Min}}\right)} \right]$ ， P 為操作環境下之壓力值， P_{Min}

為最小壓力值， P_C 為壓縮機本身之壓力值，故由式 (3-13) 可看出供應站設備每年所需耗費之電能除了與業者所需之氫能總量有關之外，亦與操作環境下之壓力值有關，易言之，可藉由壓力比之自然對數比值來調整電能大小。另外，以 C_C 表示壓縮機每年運轉所需耗費之成本，以 C_{SR} 表示大量儲氫容器每年運作所需之成本，則公車業者 i 每年所需之氫能供應站平均營運成本 ($C_{FS,i}^O$) 為

$$C_{FS,i}^O = \frac{C_i^E + C_C + C_{SR}}{\sum_{\forall j} D_{ij}^{FB}} \quad (3-14)$$

故氫能供應站之平均營運成本高低主要與燃料電池公車數量有關，若未來公車業者 i 之採用量愈多時，則所需分攤之營運成本將可愈低，進而可減少部分成本的支出。

氫能供應站設備維護成本

設備維護成本主要與例行預防保養程度與使用率有關。若以 $C_{FS,i}^M$ 表示公車業者 i 每年所須負擔之氫能供應站設備維護成本，則其計算式為

$$C_{FS,i}^M = A \cdot G_i \quad (3-15)$$

其中， A 為在正常使用頻率下，氫能供應站設備所需例行預防保養成本， G_i 為公車業者 i 之氫能供應站設備年使用率，其主要與每年可服務車輛數與實際服務車輛數有關，其可表示如下：

$$G_i = \frac{\sum_{\forall j} Q_i \cdot D_{ij}^{FB}}{Ca} \cdot \frac{q \cdot w}{q \cdot w} \quad (3-16)$$

q 代表每日可服務車輛數，而 w 表示公車業者每年營運日數， Ca 表示每輛燃料電池公車之儲氫容量，故 $q \cdot w$ 為每年可服務車輛數，而 $\frac{\sum_{\forall j} Q_i \cdot D_{ij}^{FB}}{Ca}$ 表示氫能供應站該年實際服務之車輛數，故公車業者 i 之氫能供應站每年之設備維護成本可改寫為下式

$$C_{FS,i}^M = A \cdot \frac{\sum_{\forall j} Q_i \cdot D_{ij}^{FB}}{q \cdot w \cdot Ca} \quad (3-17)$$

由式可知，氫能供應站每年設備之維護成本與每年實際服務車輛數以及所需之氫能總量成正向關係，而與車輛儲氫容量成反向關係，且當燃料電池公車需求量愈高時，則設備維護成本愈高。另外，以 f_m 表示每年所須負擔之相關管理費用，屬一固定支出，則綜上，公車業者 i 每年所需負擔之總成本 TC_i 為

$$TC_i = C_{FB,i}^D + C_{FB,i}^M + C_{FB,i}^H + C_{FS,i}^D + C_{FS,i}^O + C_{FS,i}^M + f_m \quad (3-18)$$

3.4 兩種公車系統成本變化之分析

3.4.1 未來燃油價格與氫能價格之變化分析

在燃油變化分析方面，車輛用燃油種類大致可區分為汽油與柴油，在汽油部份包括 98 無鉛汽油、95 無鉛汽油、92 無鉛汽油、二行程無鉛汽油與高級汽油，其中 98 無鉛汽油自 88 年七月十四日開始上市，而高級汽油自 89 年一月一日起不再生產；柴油部份則包含有普通柴油與高級柴油，而公車主要用油以柴油為

主，由於行政院環境保護署規定，自起民國 88 年七月一日起，除軍用車輛及船舶之內燃機外，均不得使用普通柴油，故本研究擬以高級柴油為主要分析之燃油種類。透過本研究根據經濟部能源局所蒐集之統計資料並經過單位換算，高級柴油過去歷年價格如表 3-1 所示，其中，實際數據值為各年年底之價格，而預測值則為本研究透過灰色理論所獲得之預測值。

表 3-1 歷年高級柴油價格實際值與未來預測值

年份	實際值（元/公斤）	預測值（元/公斤）
1993	13.82	13.82
1994	14.18	13.88
1995	14.42	14.32
1996	14.42	14.77
1997	16.00	15.24
1998	14.30	15.72
1999	16.24	16.22
2000	17.70	16.73
2001	16.12	17.26
2002	18.91	17.81
2003	18.06	18.37
2004	—	18.96
2005	—	19.56
2006	—	20.18
2007	—	20.82
2008	—	21.48
2009	—	22.16
2010	—	22.86
2011	—	23.58
2012	—	24.33
2013	—	25.10
2014	—	25.92
2015	—	26.72
2016	—	27.56
2017	—	28.44
2018	—	29.34
2019	—	30.27
2020	—	31.23
2021	—	32.22
2022	—	33.24

2023	—	34.29
2024	—	35.38
2025	—	36.50
2026	—	37.65
2027	—	38.85
2028	—	40.08
2029	—	41.35
2030	—	42.66

[資料來源：經濟部能源局及本研究整理]

透過本研究灰色預測模式可看出，未來高級柴油之油價將一路隨時間推移而逐漸攀升，至西元 2030 年時，其油價約在 42.66 元/公斤左右，這樣的預測結果是合理的，原因在於在未來石油存量有限且將逐年隨之減少，存量約只能再用 40 年左右，加以全球用油需求量將有逐年遞增之趨勢，尤以開發中國家為最，故油價逐年隨之遞增之情況是可想而知的，因此，這也再次說明氫能源之重要性與其在未來將取代石化燃料之迫切性。

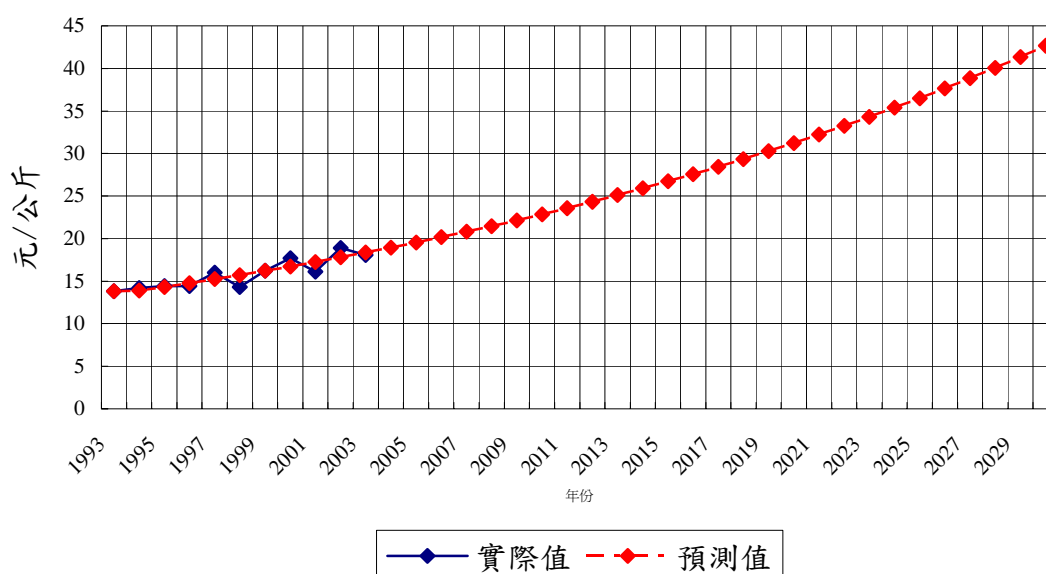


圖 3-4 高級柴油價格未來趨勢圖

[資料來源：本研究整理]

圖 3-4 為表 3-1 之對應圖，即高級柴油價格未來趨勢圖，2003 年之前的數據為高級柴油價格過去的歷史資料，2003 年之後的數值為本研究透過灰色理論所獲得之高級柴油價格預測值，由圖 3-4 之曲線可明顯看出未來油價趨勢將呈現一路攀升之走向，於 2006 年時其價格將可能超過 20 元/公斤，至 2013 年更將達到

25 元/公斤，此價格上漲趨勢對公車業者而言將面臨營運成本上之挑戰課題。

在氫能價格變化分析方面，氫能價格之歷史之料較少亦較難取得，原因在於氫能的來源有許多種，例如有些氫氣是石化產業的副產物，且經由不同的製程或取得方式即會造成價格上有所差異，與石油全靠礦藏且取得方式一致的情況不同，故石油價格較無差異。由於氫能價格歷年資料有限且難以收集，本研究收集之過去歷年氫能價格並無特定製氫方式之完整資訊，即數據有出現斷層之現象，故本研究嘗試以所蒐集到歷年不同製氫方式下氫能價格之平均值為基礎，藉以進行未來氫能價格之預測，進而推估公車業者未來評估使用燃料電池公車時，其所需之氫能燃料成本之變動情形，並作為與現有所使用的燃油成本比較之基礎。所蒐集到之氫能價格資料如表 3-2 所示。

表 3-2 歷年製氫方式與其對應之氫能價格表

年份	製氫方式	設施規模 (million Nm ³ /d)	參考來源	氫能價格 (美元/GJ)	氫能價格 單位換算 (元/公斤)
1991	SMR	2.80	Kirk-Othmer (1991)	6.26	22.54
	Coal Gasification	2.80	Kirk-Othmer (1991)	11.57	41.65
	Noncatalytic Partial Oxidation	2.80	Kirk-Othmer (1991)	9.83	35.39
	Electrolysis	2.80	Kirk-Othmer (1991)	20.6	74.16
1992	Biomass Gasification	2.16	Larson (1992)	8.69	31.28
	Biomass Gasification	2.26	Larson (1992)	10.03	36.11
1993	—	—	—	—	—
1994	SMR	1.34	Leiby (1994)	7.46	26.86
	SMR	2.14	Leiby (1994)	6.90	24.84
	SMR	0.27	Leiby (1994)	11.22	40.39
	Noncatalytic Partial Oxidation	2.14	Leiby (1994)	6.94	24.98
	Noncatalytic Partial Oxidation	1.34	Leiby (1994)	7.39	26.60
	Noncatalytic Partial Oxidation	0.27	Leiby (1994)	10.73	38.63
1995	Biomass Gasification	0.720	Mann (1995)	13.09	47.12
	Biomass Gasification	0.215	Mann (1995)	10.65	38.34
	Biomass Gasification	0.022	Mann (1995)	17.10	61.56
1996	SMR	6.75	Foster-Wheeler (1996)	5.44	19.58
	SMR	—	Berry et al. (1996)	18.31	65.9
	Coal Gasification	6.78	Foster-Wheeler (1996)	9.87	35.53
	Electrolysis	6.75	Foster-Wheeler (1996)	24.5	88.2
1997	SMR	25.4	Blok et al. (1997)	5.97	21.49
1998	SMR	—	Thomas et al. (1998)	8.62	31.03

[資料來源：Padró and Putsche (1999) 及本研究整理]

本研究所收集到之製氫方式有：甲烷蒸氣重組反應法（Steam Methane reforming；SMR）、水煤氣法（Coal Gasification）、非觸媒部份氧化法（Noncatalytic Partial Oxidation）、生質能氧化法（Biomass Gasification）與電解法（Electrolysis）。由表 3-2 可知，在所有製氫方式中，以電解法（Electrolysis）之氫能價格最高，間接顯示出其製氫成本相對其他方式是較高的，如 1991 年的 74.16（元/公斤）與 1996 年的 88.2（元/公斤），與現今燃油價格 17-18（元/公斤）相較起來可謂相距甚遠，約高出燃油價格 4-5 倍左右；而 SMR 法之製氫價格為最接近現有油價趨勢，其價格範圍約略分佈在 19.58-65.9（元/公斤）之間，與現有燃油價格相比，約高出 1.2-3.9 倍左右，其餘製氫方式之製氫價格範圍則分佈在電解法（Electrolysis）與 SMR 法之間，如水煤氣法（Coal Gasification）之氫能價格約在 35.53-41.65（元/公斤），高出現有燃油價格約 2.1-2.5 倍，非觸媒部份氧化法（Noncatalytic Partial Oxidation）之氫能價格範圍在 24.98-38.63（元/公斤），約為燃油價格的 1.5-2.3 倍左右，而生質能氧化法（Biomass Gasification）之氫能價格則較廣，約在 31.28-61.56（元/公斤）之間，為燃油價格之 1.8-3.6 倍。

由於表 3-2 中無 1993 年相關之氫能價格數據可供參考利用，故本研究嘗試以灰色理論中之插值生成法構建數據值。插值生成法是灰色系統理論中級比的應用，級比主要之目的是在做序列是否可以建模用的依據。以灰色理論中的四點建模為準，一般利用級比做插值生成的序列時可分為兩大類，一種為第二點數據未知，另一種為第三點數據未知，根據溫坤禮等(民 91)建議，在做插值生成分析時，以第三點未知的情形分析較為妥當，故本研究及以此方法為基礎，建立 1993 年氫能價格數據值。透過計算之結果發現，第三點數據值介於(23.33,59.84)之間，遂以其平均值 41.59 代表 1993 年之氫能價格，繼而進行後續氫能價格灰色預測式。表 3-3 為歷年氫能價格表。

表 3-3 歷年氫能價格表

年份	製氫方式	參考來源	氫能價格 (元/公斤)	氫能實際價 格平均值 (元/公斤)
1991	SMR	Kirk-Othmer	22.54	43.44
	Coal Gasification	Kirk-Othmer	41.65	
	Noncatalytic Partial Oxidation	Kirk-Othmer	35.39	
	Electrolysis	Kirk-Othmer	74.16	
1992	Biomass Gasification	Larson	31.28	33.70
	Biomass Gasification	Larson	36.11	
1993	—	—	—	41.59
1994	SMR	Leiby	26.86	30.38
	SMR	Leiby	24.84	
	SMR	Leiby	40.39	
	Noncatalytic Partial Oxidation	Leiby	24.98	
	Noncatalytic Partial Oxidation	Leiby	26.60	
	Noncatalytic Partial Oxidation	Leiby	38.63	
1995	Biomass Gasification	Mann	47.12	49.01
	Biomass Gasification	Mann	38.34	
	Biomass Gasification	Mann	61.56	
1996	SMR	Foster-Wheeler	19.58	52.30
	SMR	Berry et al.	65.9	
	Coal Gasification	Foster-Wheeler	35.53	
	Electrolysis	Foster-Wheeler	88.2	
1997	SMR	Blok et al.	21.49	21.49
1998	SMR	Thomas et al.	31.03	31.03

[資料來源：Padró and Putsche (1999) 及本研究整理]

表 3-4 歷年氫能價格平均值與未來預測值

年份	氫能價格實際平均值 (元/公斤)	氫能價格預測值 (元/公斤)
1991	43.44	43.44
1992	33.70	39.63
1993	41.59	38.75
1994	30.38	37.89

1995	49.01	37.04
1996	47.77	36.22
1997	21.49	35.41
1998	31.03	34.62
1999	—	33.85
2000	—	33.10
2001	—	32.36
2002	—	31.64
2003	—	30.93
2004	—	30.24
2005	—	29.57
2006	—	28.91
2007	—	28.27
2008	—	27.64
2009	—	27.02
2010	—	26.42
2011	—	25.83
2012	—	25.25
2013	—	24.69
2014	—	24.14
2015	—	23.60
2016	—	23.08
2017	—	22.56
2018	—	22.06
2019	—	21.57
2020	—	21.09
2021	—	20.62
2022	—	20.16
2023	—	19.71
2024	—	19.27
2025	—	18.84
2026	—	18.42
2027	—	18.01
2028	—	17.61
2029	—	17.22
2030	—	16.83

[資料來源：本研究整理]

表 3-4 為歷年氫能價格平均值與未來預測值，而預測值同樣是利用灰色預測模式所求得。由預測數據約略可知，在未來石油價格為呈現遞增的情況下，加以各種燃料電池逐漸的普及化與規模化之後，未來氫能價格會隨燃料電池商品之商業化而有下降的趨勢，尤其是在與用油相關之工業方面，若燃料電池某些產品具有替代傳統機具之功能者，如大型發電機組，其影響將更大，而其他應用產品如家電用品等，亦會影響氫能的價格，故若未來各燃料電池商品可逐漸普及時，將使氫能之生產有規模經濟之效益，進而反應至價格上。

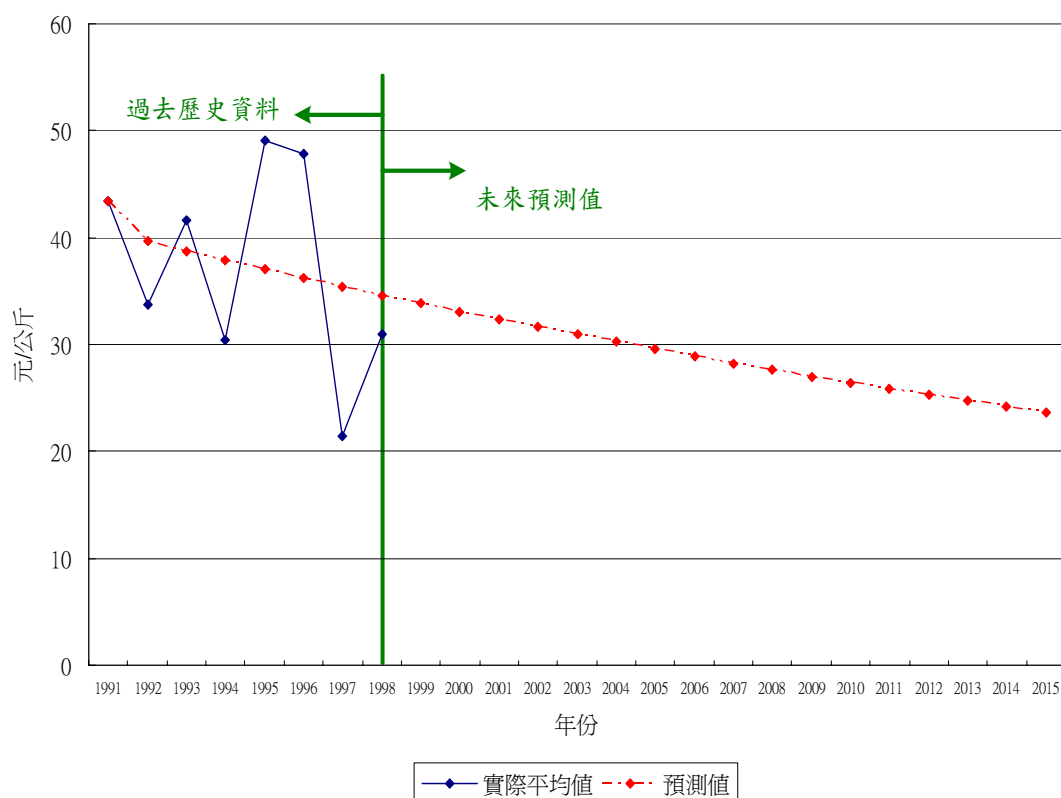


圖 3-5 氫能價格未來趨勢圖

[資料來源：本研究整理]

圖 3-5 為氫能價格未來趨勢圖，圖中 1998 年之前的數據為為本研究所收集各種製氫方式下的氫能價格平均值，集過去歷史資料，1998 年之後為本研究利用灰色理論所預測之未來氫能價格預測值。由圖 3-5 可看出，未來氫能價格之趨勢呈現逐漸遞減的走向，至 2015 年時，單位氫能之價格將降至 20-30（元/公斤）之間，幾乎將與燃油價格並駕齊驅。因此，保守估計，隨著燃料電池相關產品商業化之腳步逐漸加速，尤其是燃料電池運具之應用上，至 2015 年時，燃料電池運具將可與現有燃油運具競爭並佔據部分市場，甚或有取代其地位之可能性。而圖 3-6 為高級柴油與氫能價格未來趨勢比較圖。

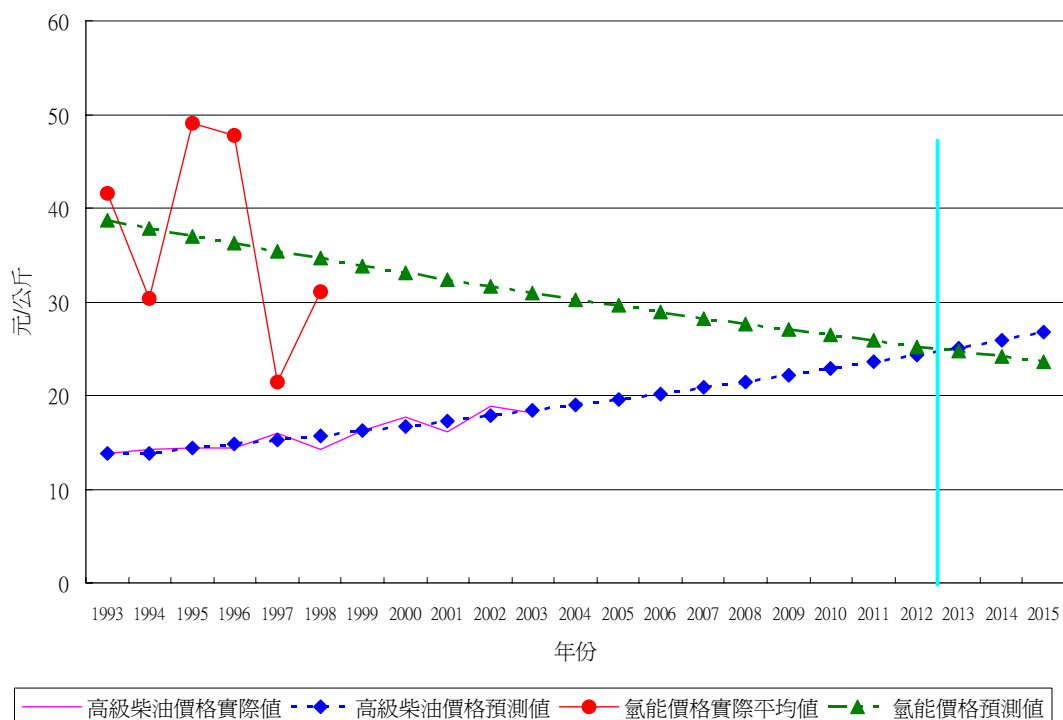


圖 3-6 高級柴油與氫能價格未來趨勢比較圖

[資料來源：本研究整理]

由圖 3-6 可明顯看出，未來油價的走向時為逐漸朝上之趨勢，而氫能價格之走向則恰好相反，為逐漸朝下之趨勢，根據本研究灰色預測模式所獲得知結果顯示，至 2012~2013 年左右，高級柴油價格將與氫能價格相當，因此，若未來幾年內，燃料電池運具相關研發技術之瓶頸或困難可獲得大幅度改善時，加上燃料電池其他方面的應用產品亦能同步發展的話，則將可加速燃料電池運具商業化的腳步，快則至 2012~2013 年時即可達到普及化之目標。

3.4.2 燃料電池公車與燃油公車成本之變化分析

在燃料電池公車與燃油公車成本之變化分析方面，本研究主要以公車業者每年所需成本的角度出發，加以比較兩者於各項成本上之差異性。因此，本研究收集過去的相關資料針對燃料電池公車與燃油公車之成本做一簡單分析與比較，藉以觀察兩者現階段成本差異之處。在分析之前先對兩者做一些基本的情境假設，使兩者之比較建立在相同基礎上，根據交通部運輸研究所（民 89），茲將假設情境列於下：

1. 依據台北市公車處營運經驗，車隊數量至少需在 30 輛以上方具有經濟規模。
2. 依據政府固定資產使用年限將車輛與供應站假設為 10 年的生命週期。
3. 每輛車每年行駛里程為 50000 公里。

表 3-5 為燃料電池公車與燃油公車各項成本統計列表，圖 3-7 為兩公車系統每年所需攤提之固定成本比較圖。

表 3-5 燃料電池公車與燃油公車各項成本統計列表 單位：萬元

成本項目		柴油公車	燃料電池公車
取得成本	購車成本	9,000	60,000
	燃料供應站投資成本	1,000	2,400
總和		10,000	62,400
維修成本	車輛維修費用	1,140	3,072
	燃料供應站維修費用		
總計		11,140	65,472

註：柴油公車購車成本單價 3,00（萬元）、燃料電池公車購車成本單價 20,00（萬元）

[資料來源：交通部運輸研究所]

由表 3-5 可知，在各項成本中，兩者以車輛購車成本差距最大，將近七倍之多，且柴油公車系統車輛購車成本占取得成本 90%，但燃料電池公車系統之車輛購車成本則占取得成本則高達 96%，可見在取得成本皆高的情形下，燃料電池公車系統相對更高；而在燃料供應站投資成本方面，燃料電池公車系統氢能供應站高於柴油公車燃油供應站約 2.4 倍，維修成本方面，以車輛與供應站維修成本總和來看，燃料電池公車系統高過柴油公車系統約 2.7 倍；簡言之，不論是哪個成本項的比較，燃料電池公車系統成本均高於柴油公車系統成本，且其中以購車成本差距最大。

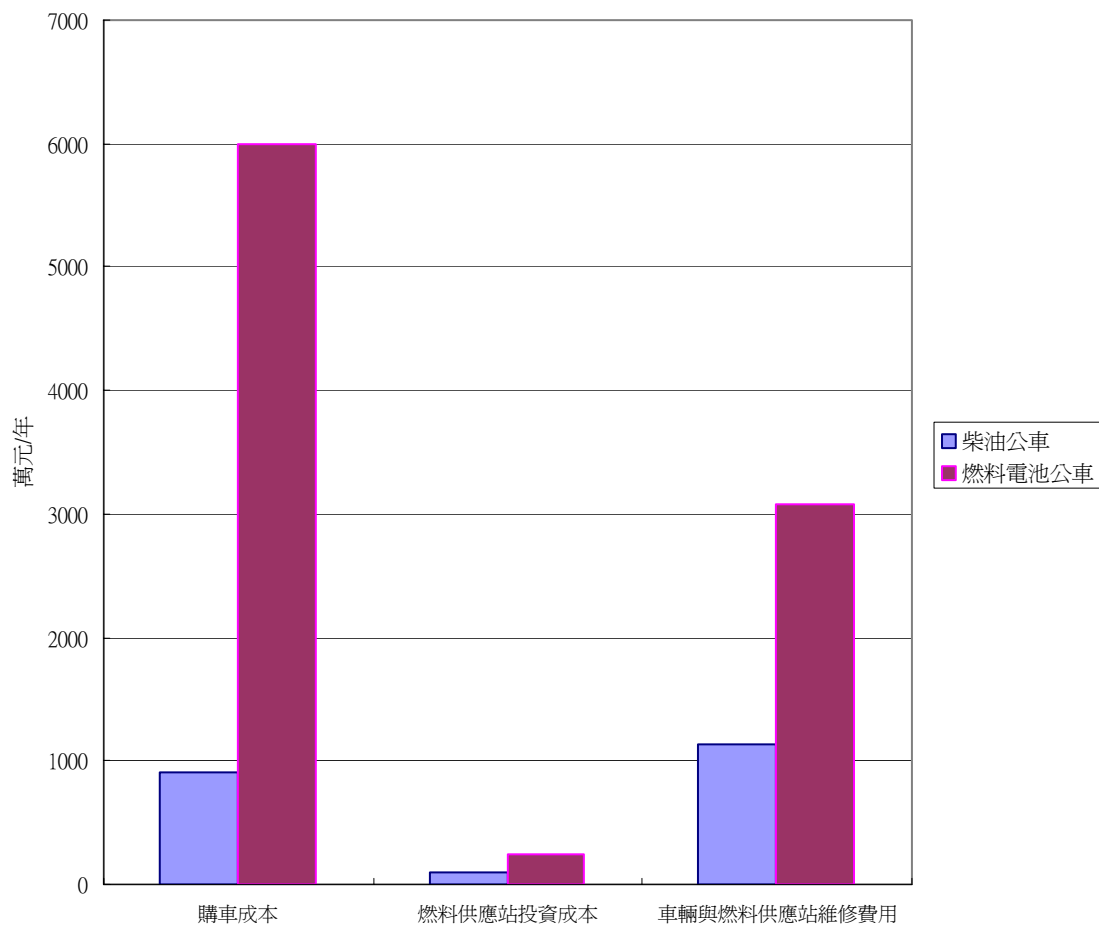


圖 3-7 兩公車系統每年所需攤提之固定成本比較圖

[資料來源：本研究整理]

若簡單以直線折舊法將車輛與燃料供應站等固定成本分攤至每年的觀點來看，結果如圖 3-7 所示，由圖可看出燃料電池公車系統每年所需分攤之固定成本均高於柴油公車系統，且除了燃料供應站投資成本差距不大之外，其餘兩者差距不算小，尤其以購車成本相差最多。由此可知，公車業者在龐大且沉重的固定成本考量下，於現階段欲引進燃料電池公車系統確有其困難所在。

然而，燃料電池車輛現階段雖然處於高成本狀態，但根據 ICCEPT (Imperial College Centre for Energy Policy and Technology) 與 UNEP (United Nations Environment Programme) (2002) 兩研究機構報告指出，若燃料電池公車在大量生產的情形下，其最快有可能在 2007~2010 年間可與現有傳統燃油公車競爭。本研究為探討燃料電池公車購置成本未來隨時間推移之變化情形，擬以 ICCEPT 與 UNEP (2002) 燃料電池公車購置成本數據為基礎，利用灰色預測方法將其預測值加以延伸，藉以觀察在量產之情形下，燃料電池公車購置成本隨其變化之趨勢。圖 3-8 為燃料電池公車未來購置成本與產量變化趨勢。

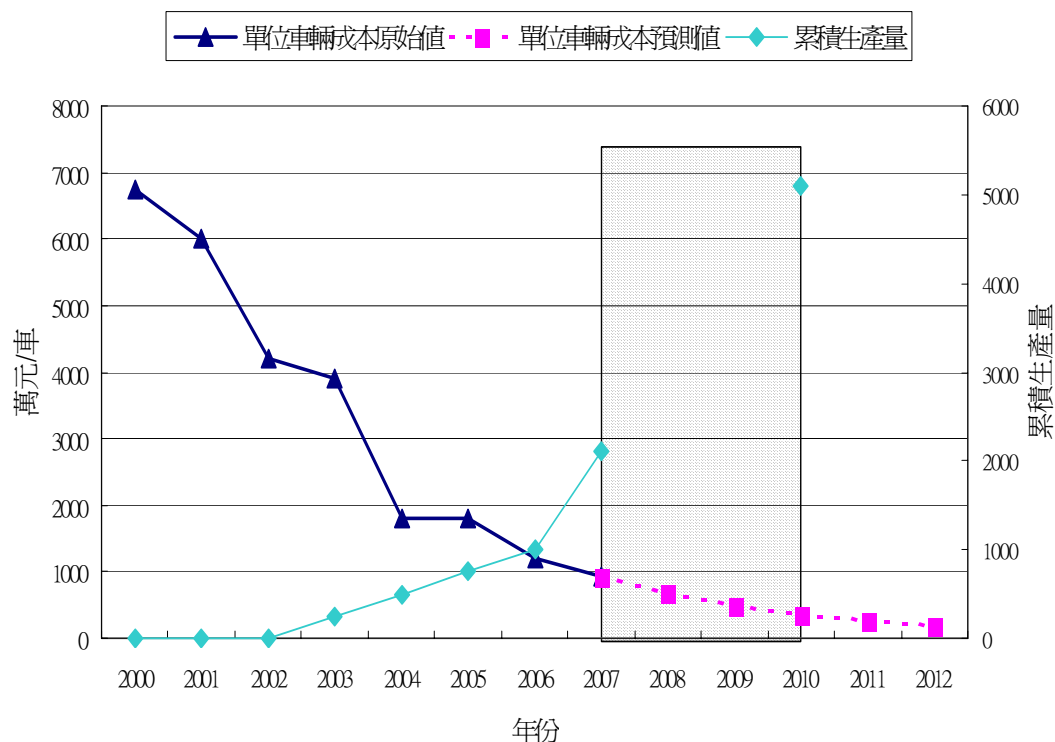


圖 3-8 燃料電池公車購置成本與產量變化趨勢

[資料來源：ICCEPT 與 UNEP 及本研究整理]

圖 3-8 虛線部份為本研究根據 ICCEPT 與 UNEP (2002) 之資料並利用灰色預測方法加以延伸推估之結果，由圖可看出，隨著累積產量從 2003 年逐年開始增加，單位車輛之購置成本相對隨之逐年下降，至 2006 年隨著成本之下降累積產量將可達 1000 輛，2007 年之後單位車輛購置成本可降至 1000(萬元)以下，此時累積產量將可突破 2000 輛，之後成本繼續逐年下降至與現有柴油公車購置成本接近，至 2010 年左右，車輛累積產量可達 5000 輛以上，且其相對之購置成本可降至約 357 (萬元)，此時約與現有柴油公車單位車輛購置成本相近，意味其可進入現有運輸市場與現有燃油公車競爭，即圖中矩形網底的部分。

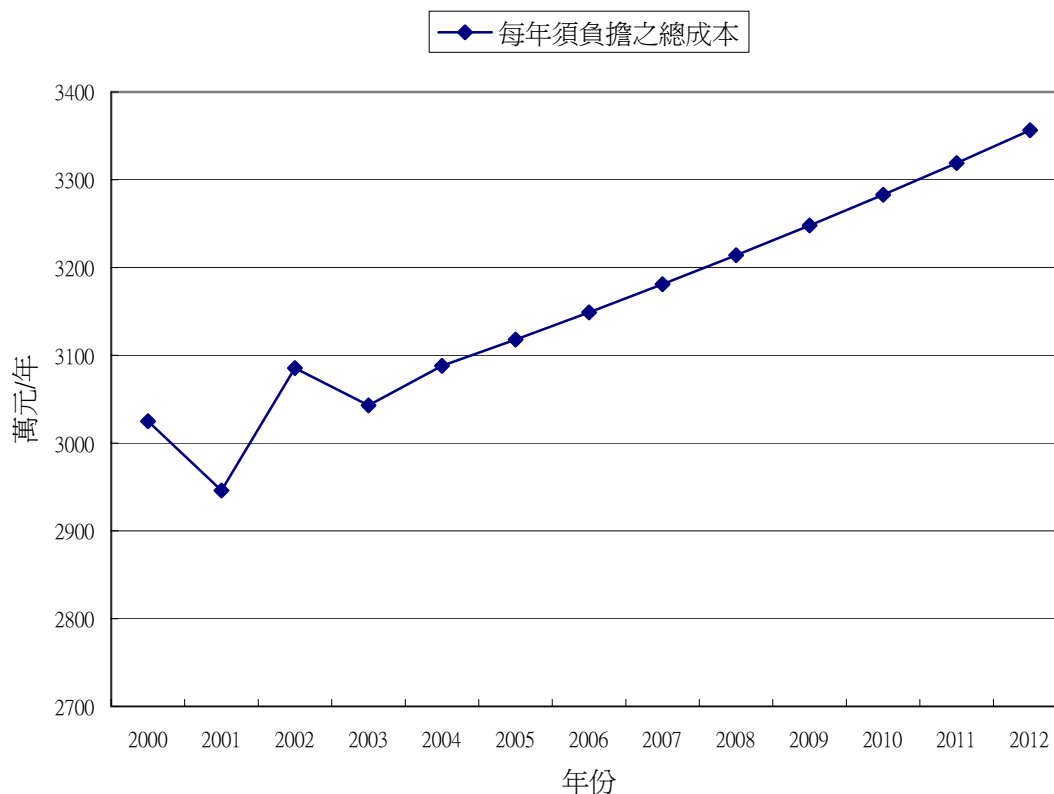


圖 3-9 現有柴油公車系統總成本變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

圖 3-9 為現有柴油公車系統每年所需負擔之成本變化趨勢圖，此處所指之總成本為每年所需分攤的車輛購置成本與維修成本、供應站設置成本與維修成本以及燃料成本之和。其中，燃料成本的部份，為本研究先前利用灰色理論所預測之未來油價並配合年燃油消耗量一併換算而得。由圖可知，未來柴油公車系統自 2003 年起每年須負擔之成本將呈現一路攀升之趨勢，至 2005 年將超過 3100 (萬元/年)，至 2011 年將達超過 3300 (萬元/年)，至 2012 年將達到約 3350 (萬元/年) 左右，每年約以 1.5% 之成長率增加，此結果對於公車業者而言，無疑不是一個沉重負擔，而造成此結果的主要原因在於未來油價因石油蘊藏量有限且全球石油需求量將逐年遞增之情形而將呈現不斷上漲的現象，因此加重了公車業者燃料成本之負擔，進而反應至總成本上，此分析結果亦說明了氫能源需加速發展之迫切性與重要性。

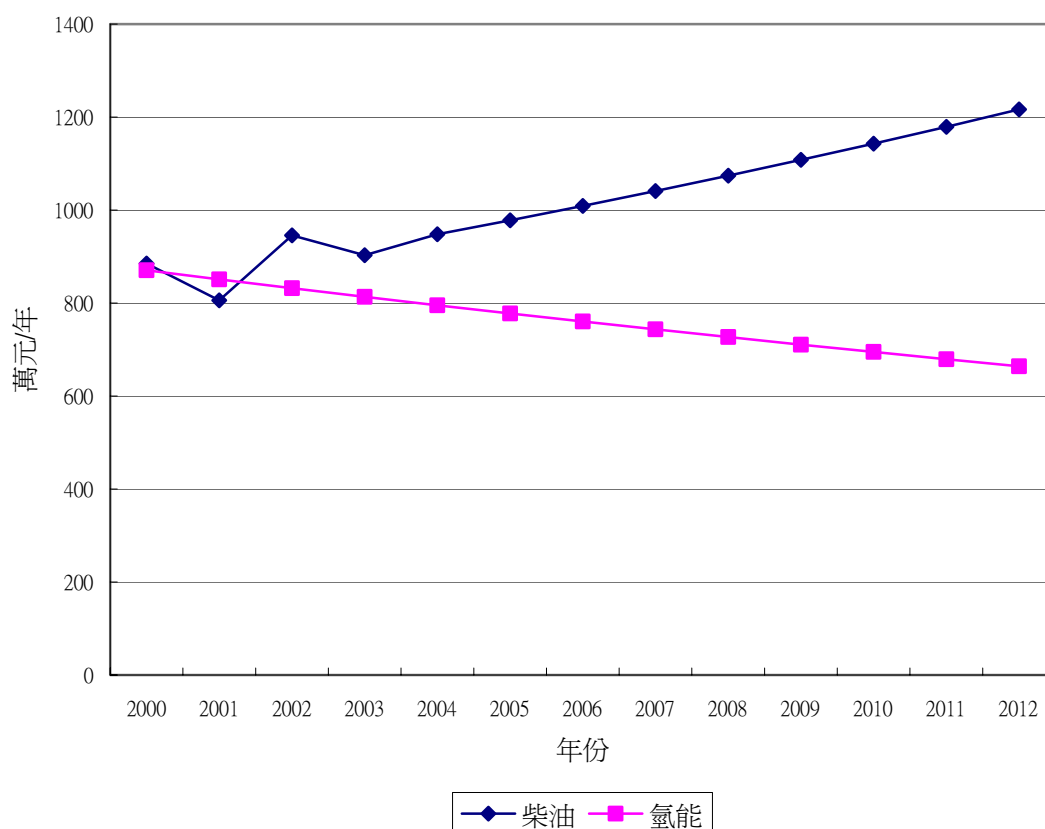


圖 3-10 兩種燃料成本未來變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

由先前 3.4.1 小節之分析，約至 2012~2013 年左右，氫能價格才會降至與柴油價格相同，若從未來兩種燃料價格變化下配合公車業者年燃料消耗量推估燃料成本之觀點來分析時，亦有相同之結果。圖 3-10 顯示氫能成本與柴油成本未來將呈現相反的走向，以使用柴油為燃料時，因為來油價將呈現不斷上漲的趨勢，故業者所須負擔之燃料成本會直接受其衝擊而相對提高；而若以使用氫能為燃料時，雖然根據前面青能價格預測與分析之結果，至 2012 年左右氫能價格才有可能降至與柴有價格同等，但圖 3-10 所顯示之結果卻不是如此，業者若以氫能為燃料時，其所須負擔之成本反而小於以柴油為燃料時所須負擔之成本，會有此結果之主要原因在於氫能源效率與柴油能源效率之不同，簡單來說，是由於氫能之能源效率高於柴油之能源效率所致。根據交通部運輸研究所(民 89)指出，目前國內柴油公車的能源效率為 2.5 (公里/公升) 且燃料電池公車之能源效率約為柴油公車之 1.9 倍左右，因此，經過本研究單位換算與概估，柴油公車的能源效率約為 3 (公里/公斤)，而燃料電池公車之能源效率約為 5.7 (公里/公斤)，換言之，目前一公斤之柴油可使柴油公車行駛 3 公里，而同樣是一公斤的氫能，則可使燃料電池公車行駛 5.7 公里左右，故以公車系統發展現況而言，燃料電池公車之效率較柴油公車為高，故本研究即假設單位柴油與單位氫能所能行駛距離分別

為 3（公里/公斤）與 5.7（公里/公斤），而圖 3-10 即是在此假設狀況下所推出的情況，根據結果顯示，雖然目前氫能的價格仍高於柴油價格，但由於氫能能源效率較柴油能源效率為高之情況下，使得氫能價格即使高過柴油價格，但以燃料成本之觀點來看，其終究仍會小於以柴油為燃料之成本。因此，由此可預知，若未來隨著燃料電池各相關商品之逐漸普及使氫能價格得以下降，同時配合燃料電池運具發展技術之進步與成熟，使氫能能源效率更加提高時，則公車業者在使用燃料電池公車營運時，其所須負擔之氫能燃料成本會比先前使用柴油為燃料時所須負擔之燃料成本為低，此結果以微觀之角度而言，不但可幫助公車業者節省筆龐大的燃料成本支出，以巨觀之角度來看，更可幫整個國家甚至全球節省更多有限的化石能源，此可謂創造出雙贏之效果。

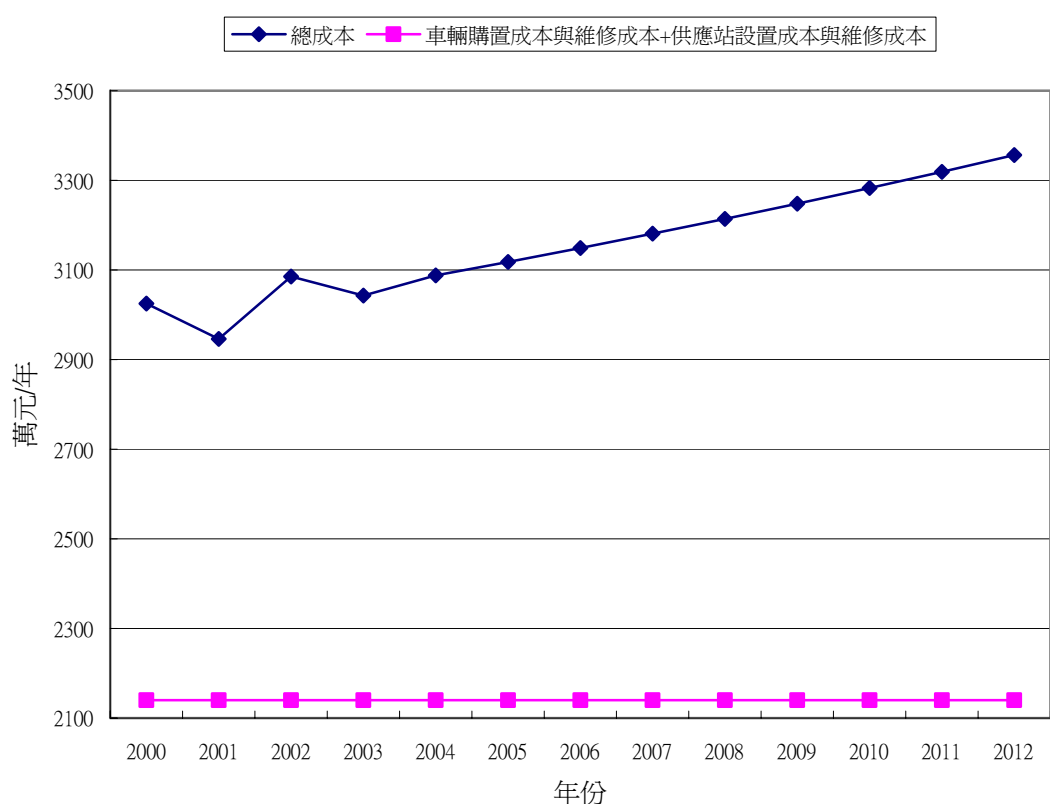


圖 3-11 柴油公車系統總成本與固定成本趨勢比較圖

[資料來源：本研究整理]

圖 3-11 為柴油公車系統總成本與固定成本比較圖，因柴油價格未來隨時間推移而不斷增加使得業者每年所須負擔之總成本亦隨之逐年攀升，而固定成本部份，即燃料成本除外的其他成本，包括車輛購置成本與維修成本、供應站設置成本與維修成本，其每年所需分攤的部份為 2140（萬元/年），占總成本之比例從 2004 年的 69% 左右降至 2011 年約 65%，主要原因在於業者隨著每年須負擔之總成本的增加使得其所佔比例相對降低。

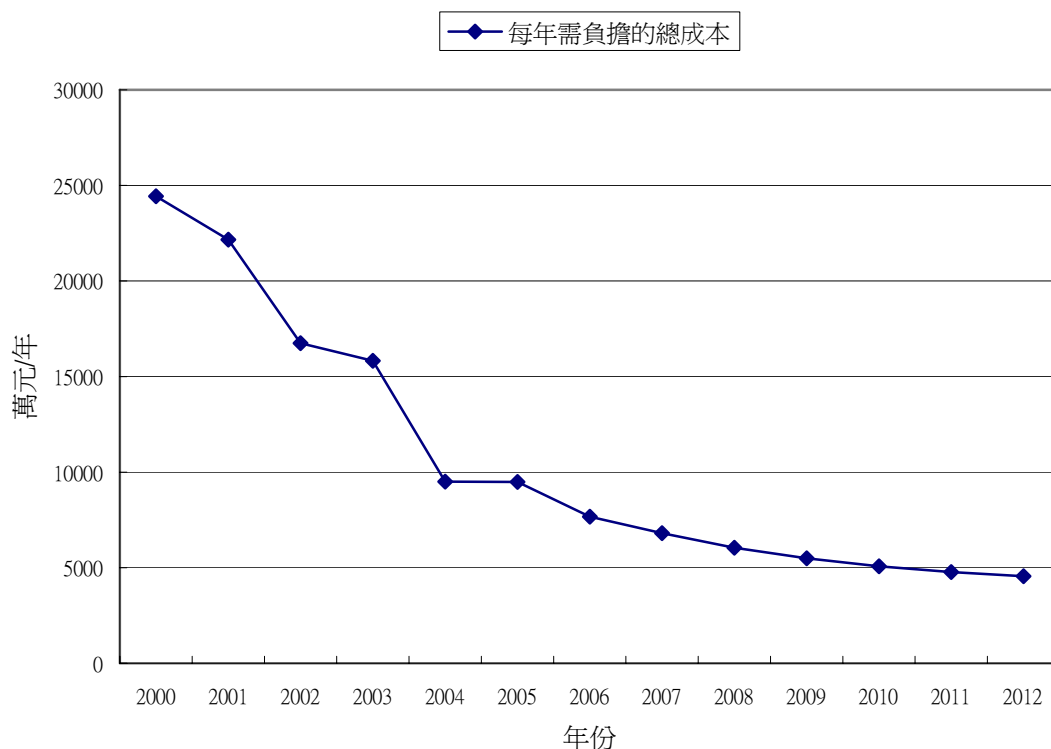


圖 3-12 燃料電池公車系統總成本未來變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

圖 3-12 為隨者燃料電池公車購置成本與氫能價格逐年變動下之總成本變化趨勢，即各年度之總成本值為各年所需分攤之車輛購置成本加上各年氫能價格下所推算而得之氫能成本再加上其他不變之固定成本之總和，其他不變之固定成本包括供應站設置與維修成本以及車輛維修成本，因此，各年度之總成本值中除了此類成本保持不變外，車輛之購置成本與氫能成本皆會改變。以 2000 年為例，公車業者若於 2000 年引進燃料電池公車系統時，則從該年起，每年所需負擔之總成本為以該年之車輛售價去計算每年所需分攤之車輛購置成本加上以該年氫能價格所推算之燃料成本，再加上其他不變之固定成本；簡言之，自 2000 年起，往後每年所需分攤之車輛購車成本為以 2000 年車輛價格下換算所獲得，而 2000 年當年所需負擔之氫能成本則以該年度之氫能價格去換算；同理，若自 2001 年起，往後每年所需分攤之車輛購車成本為以 2001 年車輛價格去換算，該年所需負擔之氫能成本則以 2001 年之氫能價格去換算，餘此類推，故圖 3-12 所示之各年所需分攤之總成本為以該年之車輛售價與氫能價格為基礎，並以該年為起始年計算起。圖 3-12 主要目的在於觀察燃料電池公車系統總成本因車輛購置成本與氫能燃料成本隨時間推移之變動而變化之情形，由圖可知，隨著未來燃料電池車輛購置成本與氫能價格之下降，使總成本呈現遞減之趨勢，至 2012 年時，車輛購置成本與氫能價格已降至某一程度，若於此時引進使用，則公車業者自 2012 年起，每年所須負擔之燃料電池公車系統總成本可下降至 5000 (萬元/年) 以下，

但與圖 3-11 所示 2012 年柴油公車總成本 3300~3500 間（萬元/年）之結果比較，仍高出約 1.4~1.5 倍左右，且須多付出 1500~1700（萬元/年）之成本。值得一提的是，此處之車輛購置成本為 ICCEPT 與 UNEP（2002）在量產情形下所推估而得，加上車輛購置成本占業者總成本極高之比例，因此，若無此假設前提，則燃料電池公車系統成本下降之幅度與趨勢恐將不致如此快速，亦即燃料電池公車系統成本欲下降至與現有柴油公車系統並駕齊驅之時間點勢必會再往後延。

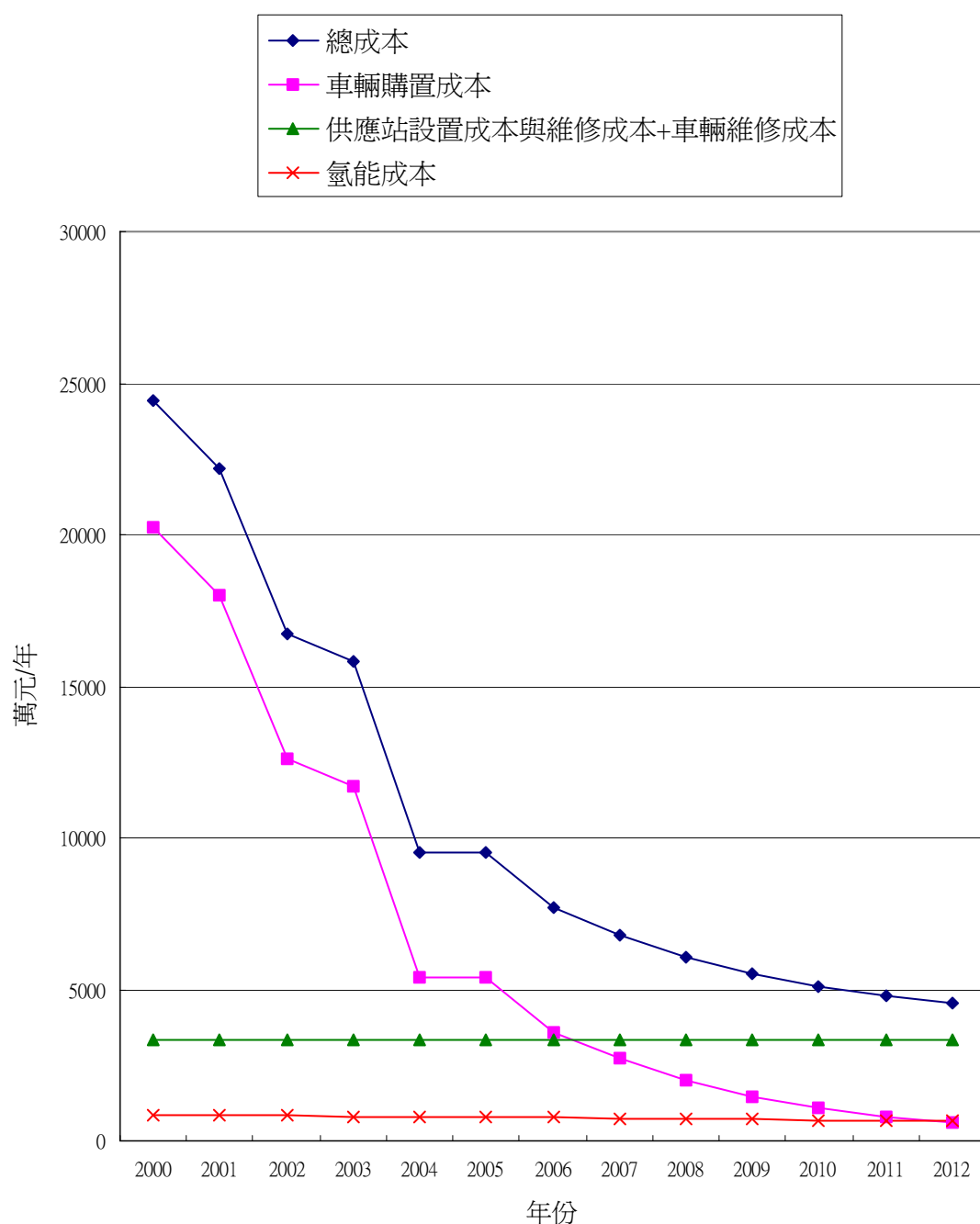


圖 3-13 燃料電池公車系統總成本與各成本項趨勢比較圖

[資料來源：本研究整理]

圖 3-13 為圖 3-12 之延伸，主要在於觀察燃料電池公車系統總成本與各成本項之相對關係。如圖 3-13 所示，車輛購置成本占總成本之比例最高，且隨量產的情形下，車輛購置成本將隨時間推移而遞減，而在所有成本項中，氫能成本占總成本之比例最低且逐年降低；此外，每年所需分攤之供應站設置成本與維修成本以及車輛維修成本約為 3312（萬元/年），若此類成本保持固定之情況下，其佔總成本之比例會隨總成本逐年降低而增加，至 2006 年時，若業者於該年引進燃料電池公車系統，則往後每年所需分攤之此類成本將約等同於車輛購置成本，即兩者所佔比例相當，如圖 3-13 所示。當然，此情形為假設供應站設置成本與維修成本以及車輛維修成本保持不變且車輛購置成本在量產之條件下所產生的；然而，在實際狀況，若車輛購置成本於量產之情形下逐年降低時，供應站之設置成本與維修成本以及車輛維修成本會隨車輛之量產而有規模經濟之效益，即此類成本將會更低。在總成本方面，2000 年時業者每年所需負擔總成本約為 25000（萬元/年），在車輛量產之假設下，至 2012 年時，業者每年所需負擔總成本降至 5000（萬元/年）以下，降了約 5 倍左右。

小結

經由前面針對兩公車系統成本所作之分析，在車輛成本方面，在量產之情況下，至 2007 年之後單位燃料電池車輛購置成本可降至 1000（萬元）以下，而至 2010 年左右，單位燃料電池車輛之購置成本才可降至約 357（萬元），此時約亦才與現有柴油公車單位車輛購置成本相近，故就目前而言，即使燃料電池車輛是處於量產階段，其車輛購置成本仍高於現有柴油公車許多；此外，柴油公車系統每年所須負擔之車輛購置成本與維修成本、供應站設置成本與維修成本約為 2140（萬元/年），燃料電池公車系統方面，每年所須負擔之供應站設置成本與維修成本以及車輛維修成本約為 3312（萬元/年），超過柴油公車系統 1172（萬元/年），即業者需多負擔 1172（萬元/年）之支出，且此支出還不包括車輛購置成本在內，由此可知，業者若考慮引入燃料電池公車系統進行營運時，其需多負擔之成本仍高；在總成本方面，未來柴油公車系統因油價逐年提高之故而使其每年將負擔更多成本，而燃料電池公車系統則可能在車輛量產以及氫能能源效率提高之情形下使其成本逐年遞減，但以現階段而言，燃料電池公車系統所須負擔之成本仍高於柴油公車系統，且至 2012 年時，雖然燃料電池公車系統之總成本以可降至 5,000（萬元/年）以下，但仍高過於柴油公車系統 2012 年總成本約 1.4 倍左右。綜言之，以上各項成本均是在車輛為量產之假設下所分析之結果，由結果可知，在車輛為量產之前提下，燃料電池公車系統之成本仍處於高成本狀態，更遑論目前未達量產階段之成本結構。因此，在政府政策目標與燃料電池公車系統高成本之考量下，若欲使公車業者有意願引進燃料電池公車營運的話，唯有政府單位給予業者適當之補貼才有可能使業者不在虧損狀態下提前引進運輸市場，故本研究即在後續進行相關補貼規劃模式，結果可供政府相關單位參考。

第四章、空氣污染改善效益與補貼規劃模式

本章探討之內容主要有二，其一為業者引入燃料電池公車系統後，對外部成本改善之成效，即分析其對空氣污染之改善程度；其二則是在滿足政府部門補貼預算之限制下，進行補貼規劃模式，即針對業者進行資本補貼與績效補貼，在績效補貼方面，本研究以不同於過去研究之方式，將以往針對行駛里程之補貼轉換為對空氣污染改善成效之績效補貼。4.1 節為基本分析與假設；4.2 節為空氣污染改善成效分析；4.3 節為補貼分析；4.4 節則以前章所構建之模式與 4.2 節為基礎，進行政府補貼之數學規劃模式，藉以研擬政府部門對公車業者之資本補貼與空氣污染改善之績效補貼策略，以做為交通單位研擬相關政策之參考。

4.1 基本分析

空氣污染之議題之所以會在近年來逐漸受到國內外環保團體與先進國家高度關注的主要原因在於溫室效應日益嚴重，現有燃油車輛所排放之污染物亦為加速溫室效應的重要“推手”之一，在人口密度較多且較集中之地區，公車業者在此所經營之公車路線亦相對較多，以滿足各種旅次的需求量，故公車密度自然相對增加，如 CBD；但以另一觀點而言，公車密度之增加雖然帶給民眾「行」之便利性，卻也因其為燃油車輛之故，相對的帶來了嚴重的空氣污染，在這種情形下，造成地區之污染量較多，使當地民眾身體健康的機能直接受到衝擊，且人口密度愈高的地區受空氣污染影響的程度較大，進而造成了高外部成本之結果。故本研究以個別公車業者為對象，分別推估其於資本補貼政策下之使用量及其對空氣污染改善成效所獲致之績效補貼；此外，將個別業者之使用量加以總計，藉以分析空氣污染之改善成效及可節省之外部成本，同時推估能源之節省量。本研究以燃料電池公車系統引入前後分析空氣污染排放變化之情形，並比較引入運輸市場前後空氣污染程度之差異性，透過公車業者之營運路線數與車輛數，探討一般空氣污染物與二氧化碳之減量成效與節省之成本，同時推估能源節約量以及能源節約效益。簡言之，即以公車業者經營路線之服務地區為基礎，進而分析燃料電池公車引入前後，外部成本改善之效益。本章所探討之空氣污染改善成效之觀念架構如圖 4-1 所示。

由於燃料電池公車最大優點為其清潔之特性，不但不會對環境造成污染，且其排放物可循環再利用，故本研究以其符合環保之特性為基礎，探討空氣污染所造成之外部成本，且以公車所造成之污染為主要考量，其餘如機車或自小客車等

運具所造成之污染與噪音、擁擠等所形成之外部成本則不在本研究中探討。在滿足各路線民眾旅次需求量之條件下，假設燃料電池公車引入前後，公車業者*i*於每條路線*j*之營運車輛數 N_{ij} 不變，且各路線燃料電池公車使用量等於燃油公車汰換量，以利於分析燃料電池公車對空氣污染改善之成效。

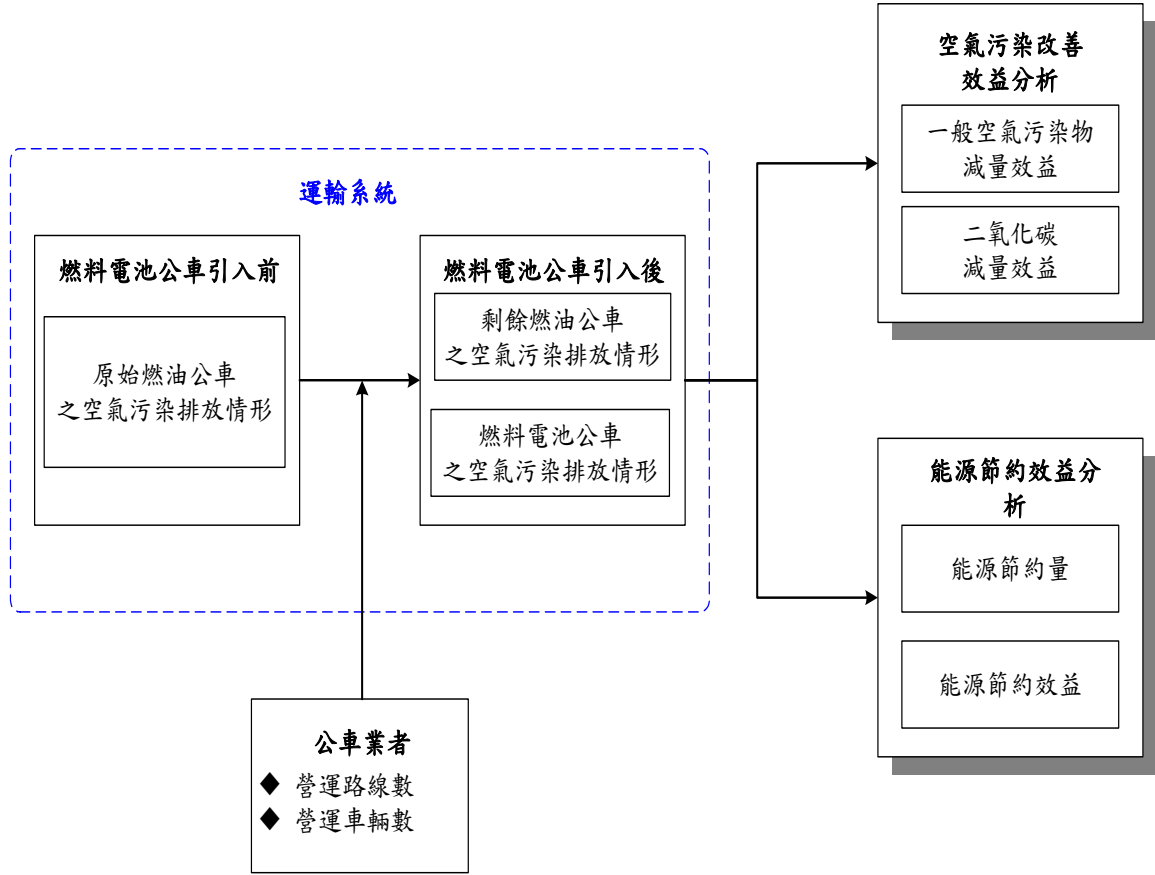


圖 4-1 空氣污染改善成效觀念架構圖

4.2 空氣污染改善效益分析

在空氣污染改善效益分析方面，本研究區分一般空氣污染物、二氧化碳與能源節約三方面來探討。首先，在一般空氣污染物方面，以 L_i 表示業者*i*每輛燃料電池公車每年平均之行駛里程數，而 λ_{TB} 與 λ_{FB} 分別為燃油公車與燃料電池公車一般空氣污染物單位里程之排放率，當公車業者*i*未使用燃料電池公車前，其造成之一般空氣污染量（ AB_i ）為

$$AB_i = \sum_{\forall j} N_{ij} \cdot L_i \cdot \lambda_{TB} \quad (4-1)$$

而當業者*i*引入燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 營運時，其造成之一般空氣污染量（ AA_i ）變成

$$AA_i = \sum_{\forall j} (N_{ij} - D_{ij}^{FB}) \cdot L_i \cdot \lambda_{TB} + D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot \lambda_{FB} \quad (4-2)$$

故當公車業者*i*使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 時，則每年對一般空氣污染物減量成效

(AR_i) 可以下式表示

$$AR_i = \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) \quad (4-3)$$

根據以上之推導，其結果與交通部運輸研究所(民 89)對空氣污染物減量之推估方式一致。由此可知，一般空氣污染物減量成效 (AR_i) 與業者*i*之燃料電池公車使用量 (D_{ij}^{FB}) 以及每車年行駛里程 (L_i) 有關，即業者使用量愈多或每車年行駛里程愈高時，則對於空氣污染之減量成效愈大。故在某地區之服務範圍內，所有公車業者每年對於一般空氣污染物之減量成效為

$$\sum_{\forall i} AR_i = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) \quad (4-4)$$

以 δ_A 表示一般空氣污染物之單位外部成本，則業者*i*使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 營運後，其可節省之一般空氣污染物外部成本，即帶來之效益 (ARC_i)

$$ARC_i = \sum_{\forall j} \delta_A \cdot D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) \quad (4-5)$$

故所有公車業者對於一般空氣污染物減量每年可帶來之總效益為

$$\sum_{\forall i} ARC_i = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \delta_A \cdot D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) \quad (4-6)$$

同理，在二氧化碳減量方面，以 ϕ_{TB} 與 ϕ_{FB} 分別表示燃油公車與燃料電池公車二氧化碳單位里程之排放率，則當公車業者*i*使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 時，則每年對二氧化碳減量成效 (CR_i) 可以下式表示

$$CR_i = \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\phi_{TB} - \phi_{FB}) \quad (4-7)$$

而以 δ_C 表示二氧化碳之單位外部成本，則業者*i*使用燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 後，其可節省之二氧化碳外部成本 (CRC_i) 為

$$CRC_i = \sum_{\forall j} \delta_C \cdot D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\phi_{TB} - \phi_{FB}) \quad (4-8)$$

故所有公車業者對於二氧化碳減量每年可帶來之總效益為

$$\sum_{\forall i} CRC_i = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} \delta_C \cdot D_{ij}^{FB} \cdot L_i \cdot (\phi_{TB} - \phi_{FB}) \quad (4-9)$$

若綜合考量一般空氣污染物與二氧化碳時，以 η_{TB} 表示燃油公車單位里程之所有空氣污染物排放率，污染物包括一般空氣污染物與二氧化碳，即

$$\eta_{TB} = \lambda_{TB} + \phi_{TB} \quad (4-10)$$

則業者 i 引入燃料電池公車 D_{ij}^{FB} 後，其所造成之外部成本（ EC_i ）為

$$EC_i = \sum_{\forall j} \delta_A \cdot (N_{ij} - D_{ij}^{FB}) \cdot L_i \cdot \lambda_{TB} + \delta_C \cdot L_i \cdot [(N_{ij} - D_{ij}^{FB}) \cdot \phi_{TB} + D_{ij}^{FB} \cdot \phi_{FB}] \quad (4-11)$$

另外，在能源節約方面，其主要與各家業者燃料電池公車之使用量（ D_{ij}^{FB} ）、每車年行駛里程（ L_i ）與單位柴油之能源效率（ L_o ）有關，業者 i 每年可節省之

柴油量（ OR_i ）計算式為

$$OR_i = \frac{\sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i}{L_o} \quad (4-12)$$

而其節約效益（ ORC_i ）為

$$ORC_i = \frac{P_o \cdot \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i}{L_o} \quad (4-13)$$

當業者之使用量（ D_{ij}^{FB} ）愈多或每車年行駛里程（ L_i ）愈高時，則每年可節省愈多柴油能源。故在某地區之服務範圍內，所有公車業者每年所節省之柴油總量為

$$\sum_{\forall i} OR_i = \frac{\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i}{L_o} \quad (4-14)$$

總節約效益為

$$\sum_{\forall i} ORC_i = \frac{P_o \cdot \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} D_{ij}^{FB} \cdot L_i}{L_o} \quad (4-15)$$

4.3 補貼分析

由 3.4 小節的分析可知，影響公車業者使用燃料電池公車之主要關鍵因素為其高成本之特性，因燃料電池公車系統之成本高於現有柴油公車系統之成本，故若欲使公車業者有使用意願，則政府部門之補貼政策為一關鍵之因素。若政府部門願意給予公車業者適當之補貼額度，使燃料電池公車系統與現有柴油公車系統得以縮短其成本差距時，則公車業者才有較高的使用意願。故本研究即以此觀點為基礎，同時考量公車業者與政府部門兩方面之因素，並構建數學規劃模式，在滿足政府部門預算限制下，求取政府部門給予公車業者最適之資本與績效補貼額度，進而提高業者採用意願，並藉以吸引更多業者加入採用，使燃料電池運具普及化之目標能在政府的帶動與相關政策的配合下，得以早日達成。表 4-1 為環保署補助汽車客運業更新車輛補助標準。

表 4-1 環保署補助汽車客運業更新車輛補助標準

原車處理情況 新車適用標準	報廢原營業柴油 大客車，新購一 輛營業大客車	繳銷營業柴油大 客車，新購一輛 營業大客車	未報廢或繳銷原營 業柴油大客車，新 購一輛大客車
新購符合於 82.7.1 施 行之交通工具空氣污 染物排放表準第五條 之大客車	25 萬元 (10% ¹)	20 萬元 (8% ¹)	—
新購符合於 88.7.1 施 行之交通工具空氣污 染物排放表準第五條 之大客車	35 萬元 (14% ¹)	30 萬元 (12% ¹)	10 萬元 (4% ¹)
新購電動大客車、柴 油及電力混合大客 車、液化石油氣大客 車、天然氣大客車等 低污染性大客車	50 萬元 (5% ²)	45 萬元 (4.5% ²)	25 萬元 (2.5% ²)

註：1 指補助款項佔柴油大客車購置成本之比例（柴油大客車成本以 250 萬元計）；

2 指補助款項佔低污染性大客車購置成本之比例（低污染性大客車成本以 1000 萬元計）

[資料來源：交通部運輸研究所]

根據交通部運輸研究所（民 89）指出，目前柴油大客車之進口價格若由美國進口約為 600~700 萬元，遠高於韓國進口 250~300 萬元（進口底盤僅需 200 萬元），因此業者多半由韓國進口底盤，再由國內廠商打造車身；反之，低污染性大客車（電動、天然氣、混合電動大客車等）主要廠商分佈於歐美國家，由於尚未量產，多半接單訂造，進口成本約在 800~1200 萬元，遠高於柴油大客車之成本，造成國內公路客運業者購置意願不高。交通部運輸研究所(民 89)針對低污染公車所做的調查報告指出，由於大眾運輸系統旅客的流失造成私人運具急遽成長，對此，為使民眾願搭乘大眾運輸系統，環保署補助客運業者加速汰舊換新每輛車補助 20 至 25 萬元，85 年度補助 576 輛，86 年度補助 1122 輛。此外，為加速公共汽車運輸客運業者車輛汰舊換新以改善空氣品質，環保署曾特定「行政院環保署補助汽車客運業更新車輛執行要點」，如表 4-1 所示，此要點針對報廢、繳銷、未報廢或繳銷原柴油大客車之情況下，明定新購車輛補助金額，且此補助金額視新購車輛所符合之環保標準而有所不同，執行期間自民國 84 年七月一日至民國 87 年六月三十日止，不過為推廣低污染公車，該類之補助要點有存在的必要性。由表 4-1 可看出，配合行政院環保署之補助金額與目前之購車成本相比較的結果，柴油大客車部分介於 8%~14%，低污染性大客車部分則僅佔 2.5%~5%，故無法有效吸引業者購買低污染性大客車，且相關之週邊設備（加氣站、充電站）造價高昂，適法爭議性仍高，因此業者多半仍在觀望階段，且希望政府能提供有效之補貼政策，對於車輛購置成本、燃料供應站之設置成本之補貼能達 50% 之比例，業者多半傾向全額補助，其他相關之成本項亦應有適當之補貼。

根據交通部運輸研究所(民 89)統計結果指出，公車業者欲引進低污染公車可能面臨之問題主要為「車輛購置成本過高」、「燃料供應站設置成本高」、「維修技術不足」等問題。因此，若無政府補助，沒有業者願意引進；而若有政府補貼之情形下，有 61% 業者有意願引進，補貼措施如先前所述，以「車輛購置成本」居冠，為業者所好，補貼比例傾向 50%~100%，而「燃料供應站設置成本」之補貼居次，補貼比例同樣為 50%~100%，第三為「燃料之補貼」，業者希望有 30%~100% 的補貼比例，再者為行駛里程之補貼，業者希望最少有 25~45 元/每車公里的補貼額。此外，根據臺北市推動低污染公車細部執行計畫之資料指出，國外在推動低污染公車之獎勵措施首推「購買低污染車輛差價之補貼」，採用國家有日本、澳大利亞、阿根廷、法國、巴西、玻利維亞等，另外，「提供使用低污染車輛的大眾運輸業者相關稅費的優惠或減免」、「控制柴油及低污染車輛能源價格的相對價格優勢」、「控制低污染車輛改裝成本」、「提供優惠的貸

款利率及償還期限用以購置低污染車輛」等皆為國外常見之推廣措施。簡言之，就公車業者而言，業者並非不配合政府政策而不使用低污染性之環保運具，而是因其高成本結構的問題使業者有所疑慮，因此，政府若能在此關鍵點上適時給予補貼之幫助而使問題有所突破，有超過半數的業者有引進低污染公車的意願。但就政府立場而言，雖然樂見公車業者因給予成本上的補貼而提高其者採用意願，但由於財政預算上之限制，不可能對業者所希望的額度漫無止盡的給予補貼，故對於公車業者給予補貼的議題上，在某種程度上，其實是加諸政府財政上之壓力。因此，補貼政策實為一體兩面之問題，補貼政策需有良好且完善之規劃方能避免基金預算不敷支應而停止補助之情況產生，原因在於補貼額度之多寡會同時影響公車業者使用意願與政府之態度，若政府部門可補貼額度愈高時，不但可減輕業者所顧慮之高成本，同時可吸引更多業者加入採用，使燃料電池運具普及化的目標有好的開始，並可朝永續運輸的目標前進；另一方面，雖然給予業者補貼可增加業者採用意願，並刺激其他業者的潛在需求，但此相對會增加政府部門財政預算的負擔，使政府部門本身之財政支出壓力愈重，甚至可能影響其他政策之執行，並壓縮其預算空間，如地方之重大建設；有鑑於此，本研究擬同時考慮公車業者與政府部門兩方面，構建補貼的數學規劃模式，以最小化社會總成本為目標，在配合業者所希望之補貼比例範圍內，並滿足政府部門補貼大眾運輸業之財政預算限制下，求取最適之資本補貼額度與業者之使用量，同時以此使用量配合業者之行駛里程與兩公車系統間之成本差距，加以決定業者對空氣污染改善之績效補貼。

4.4 政府補貼規劃模式

由於引進一新興運輸系統且使之得以在運輸市場中逐漸普及為一長期且浩大之工程，而短期內應以吸引業者使用為目標，故本研究之補貼規劃模式以短期為主。交通部運輸研究所(民 89)探討短、中、長期之優惠與補助措施中論及，短期應以購買補助為主，包括環保署可對購買低污染公車及設置燃料供應站給予適度補助，故本研究擬以此觀點為基礎，並配合 3.4 節所分析之相關結果，進行短期之補貼規劃模式。本研究之資本補貼規劃主要考量之補貼有車輛購置成本之補貼、氫能供應站設置成本之補貼，而績效補貼則是以空氣污染改善效益為主。考慮車輛購置與氫能供應站之補貼在於減輕業者高成本之負擔，同時藉以吸引其他業者之潛在需求；而空氣污染減量成效與業者使用量以及每車年行駛里程有關，即業者使用量愈多或行駛里程愈高時，則對於空氣污染之減量成效愈大。但由於各家公車業者之經營規模不盡相同，其車隊規模與年行駛里程亦不相同，故對於

空氣污染改善成效之貢獻亦不同。因此，在規劃績效補貼時，須適時根據各家公車業者使用燃料電池公車之情形，進而評估其對於空氣污染改善之貢獻程度而定，故本研究亦將此觀念納入補貼規劃模式中，同時考量兩公車系統之成本差距，擬針對個別公車業者進行績效補貼。此外，本研究不考慮氫能之燃料補貼，主要原因在於 3.4 節中分析之結果顯示，雖然目前氫能之價格高於柴油之價格，但因氫能之能源效率高於柴油之能源效率使業者所須負擔之氫能成本較柴油成本為低，且未來亦隨燃料電池技術之進步與商品之普及以及氫能價格之下降而逐年降低，故在此不將燃料成本之補貼納入考量。如前所述，補貼額之多寡將影響業者使用意願，進而影響業者需求量，而業者之需求量將會使供應站平均設置成本、平均營運成本與設備維護成本間有權衡取捨（trade-off）之關係，因需求量增加可降低供應站平均設置成本與平均營運成本，但卻會增加供應站設備維護成本，故政府之補貼額多寡影響之層面可謂深且廣，故本研究之補貼規劃模式即以單位燃料電池車輛之補貼、氫能供應站設置之補貼、改善單位空氣污染之補貼與業者使用量為決策變數，以適時反映業者需求與政府部門財政預算考量下之補貼關係。

由於公車業者之成本與空氣污染所造成之外部成本均為整個社會體系中的一環，因此本研究以最小化總社會成本為目標進行補貼規劃模式，即最小化公車業者總成本與外部成本之和，即前述式（3-18）與式（4-11）之和

$$STC = \sum_{\forall i} (TC_i + EC_i) \quad (4-16)$$

由於考慮到資本之補貼較龐大且地方政府財源有限之情形下，故本研究之資本補貼預算假設以中央政府之補貼款為主要來源，而地方政府之補貼款則假設全數用於改善空氣污染之績效補貼。以 m_{1i} 表示政府對業者 i 購置單位燃料電池車輛之補貼，由於業者 i 所使用之燃油公車購買時程不盡相同，故其受汰換時所剩餘之殘值亦不同，故為簡化此問題，本研究假設購置單位燃料電池車輛之補貼 m_{1i} 包含受汰換燃油車輛所剩殘值；另以 m_{2i} 表示政府對業者 i 設置氫能供應站之補貼， m_{3i} 為政府對公車業者 i 改善單位空氣污染之補貼，此種補貼目的一方面在於肯定公車業者使用燃料電池公車對空氣污染改善之貢獻，進而鼓勵其他業者跟進使用，另一方面可彌補業者使用燃料電池公車時，其總成本高出使用燃油公車之部份； H_i 為業者 i 單位里程之營運成本， B_1 為中央政府補貼預算， B_2 為地方政府補貼預算，則政府補貼數學規劃模式如下所示：

$$\underset{D_{ij}^{FB}, m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}}{\text{Min}} \quad STC \quad (4-17)$$

$$s.t. \sum_{\forall j} H_i L_i D_{ij}^{FB} - TC_i + S_{3i} \geq 0 \quad (4-18)$$

$$S_{1i} = \sum_{\forall j} m_{1i} D_{ij}^{FB} \quad (4-19)$$

$$S_{2i} = m_{2i} \quad (4-20)$$

$$0.5 \leq \frac{m_{1i}}{(P_{FB} - P_{TB})} \leq 1 \quad (4-21)$$

$$0.5 \leq \frac{m_{2i}}{M} \leq 1 \quad (4-22)$$

$$S_{3i} = m_{3i} \left(\sum_{\forall j} L_i D_{ij}^{FB} (\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) + \sum_{\forall j} L_i D_{ij}^{FB} (\phi_{TB} - \phi_{FB}) \right) \quad (4-23)$$

$$0 \leq m_{3i} [(\lambda_{TB} - \lambda_{FB}) + (\phi_{TB} - \phi_{FB})] \leq H_i \quad (4-24)$$

$$\sum_{\forall i} S_{1i} + S_{2i} \leq B_1 \quad (4-25)$$

$$\sum_{\forall i} S_{3i} \leq B_2 \quad (4-26)$$

$$D_{ij}^{FB} = N_{\beta_0 + \beta_1} \cdot \theta_{\left(\frac{P_{FB} - P_{TB}}{R_i} \right) + \beta_2 \left(\frac{P_H - P_O}{L_H - L_O} \right) + \beta_3 (V_{FB} - V_{TB}) + \beta_4 (\eta_{FB} - \eta_{TB})} \quad (4-27)$$

$$\theta_i = \frac{e}{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{P_{FB} - P_{TB}}{R_i} \right) + \beta_2 \left(\frac{P_H - P_O}{L_H - L_O} \right) + \beta_3 (V_{FB} - V_{TB}) + \beta_4 (\eta_{FB} - \eta_{TB})} \quad (4-28)$$

$$m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}, D_{ij}^{FB} \geq 0 \quad (4-29)$$

政府補貼之數學規劃模式如式 (4-17) 至式 (4-29) 所示。式 (4-17) 為目標式，即最小化社會總成本；式 (4-18) 為業者 i 在政府績效補貼下可彌補兩公車系統成本間之差距；式 (4-19) 公車業者 i 購置車輛之補貼總額；(4-20) 為公車業者 i 氫能供應站設置補貼額；式 (4-21) ~ 式 (4-22) 分別為單位車輛購置補貼與供應站設置補貼限制式，根據 4.3 小節之分析，本研究綜合考量國外之施行經驗與業者所期望之補貼比例，故將單位車輛購置之補貼比例限制在燃料電池公車與燃油公車差價之 50%~100%，而氫能供應站之設置補貼則為全額之 50%~100%；式 (4-23) 為改善空氣污染之績效補貼關係式；式 (4-24) 為限制單位里程空氣污染改善之補貼額不能高於單位里程之成本；式 (4-25) ~ 式 (4-26) 分別為兩種補貼需在中央政府與地方政府總補貼預算下；式 (4-27) 為業者需求關係式；式 (4-28) 為業者 i 之選擇機率；式 (4-29) 為決策變數非負限制式。

第五章、範例分析

在完成前兩章節模式後，本研究以兩客運公司為例，運用本研究所構建之相關模式分析與說明模式之操作方法，藉以求得政府部門對於兩客運公司使用燃料電池公車系統所需之資本補貼與績效補貼，另分析其使用狀況對於空氣污染之改善成效。在此範例分析中，本研究收集實際客運公司營運資料以及燃料電池公車系統相關成本數據為模式之輸入資料，並利用 LINGO8.0 軟體求解，以驗證與說明本研究模式之應用以及其於實務上之與貢獻性參考價值，並做為未來政府相關部門未來引進燃料電池公車系統之參考依據。5.1 節為模式基本參變數之設定，5.2 節為輸出結果與補貼之分析，5.3 節為空氣污染改善效益分析，5.4 節為敏感度分析。

5.1 基本參變數之設定

在進行範例分析之前，首先蒐集模式中相關參變數之實際值與數據之假設。燃料電池公車目前雖已於歐洲十個城市運轉，但畢竟仍處於起步狀態，且燃料電池相關研發技術目前亦在研發之中，故部份參數之數據則以不失一般性之前提下，利用相關文獻進行合理之推估與假設。茲將重要之參變數所擬定之數值整理如表 5-1、表 5-2 與表 5-3 所示，以做為模式求解之起始值。

表 5-1 兩家客運公司營運資料參數設定表

客運公司 \ 營運資料	營運 路線數	營運 車輛數	每車每年平 均行駛里程	每車公里平 均營運成本	每年 平均營收
S 公司	28 條	386 輛	90,000 公里	35 元	659,981,223 元
T 公司	37 條	488 輛	64,800 公里	40 元	428,323,561 元

[資料來源：<http://www.iot.gov.tw/ct.asp?xItem=104245&CtNode=1058>、

<http://ezgo.taipei-elif.net/Homepage/mainfram3/index.asp?goMainLink=../emap/program/html/bus.asp>]

表 5-1 之基本參數數值主要設定原則如下：

1. 假設兩家客運公司每年營運日數為 360 天。
2. 每年平均營收係根據兩家客運公司過去歷年營收之平均值來表示。
3. 兩家客運公司每車每年平均行駛里程係依據每車每日行駛里程與客運公司

每年營運日數估算而得。

兩家客運公司不同之處在於 S 公司之營運路線數與車輛數均較 T 公司多，但 S 公司每車每年平均行駛里程高於 T 公司，本研究即針對兩家公司營運上之不同進行後續相關之分析，藉以說明兩家公司於政府補貼、外部成本改善與能源節約等方面之差異性。

表 5-2 燃料電池公車系統相關成本參數設定表

燃料電池公車 相關成本變數			設定值	資料來源
單位車輛購置成本 (P_{FB})			36,000,000 元/輛	http://www.investteda.org http://www.sina.com.cn 與本研究貨幣單位換算
車輛預計使用年限 (t)			10 年	本研究假設
車輛維修成本 (U_m)			20 元/公里	交通部運輸研究所(民 89)
單位燃料電池公車 所能載裝之氫能容量 (Ca)			72 公斤/輛	Hörmandinger et al.(1996) 與本研究容量單位換算
氫能價格 (P_H)			29.57 元/公斤	本研究灰色理論之預測值
單位氫能所能行駛距離 (L_H)			5.7 公里/公斤	交通部運輸研究所(民 89) 與本研究估算
氫能供應站設置成本 (M)			24,000,000 元	交通部運輸研究所(民 89)
氫能供應站資本回復因子 (X_{gu})			預計使用 15 年 利率為 5%	本研究假設
氫能供應站 營運成本 ($C_{FS,i}^O$)	電解槽運作 成本 (C_i^E)	S 公司	32,677,758 元/年	Battelle and Eudy(2003)與 Amos(1998)以及本研究之估算
		T 公司	29,646,693 元/年	
	壓縮機運轉成本 (C_C)		70,169,615 元/年	Battelle and Eudy(2003)與 Amos(1998)以及本研究之估算
	大量儲氫容器運作成本 (C_{SR})		30,187,830 元/年	Battelle and Eudy(2003)與 Amos(1998)以及本研究之估算
氫能供應站設備 例行性預防保養成本 (A)			2,385,000 元/年	Hörmandinger et al.(1996) 與本研究貨幣單位換算
氫能供應站管理費用			2,000,000 元/年	交通部運輸研究所(民 89)
氫能供應站每年可服務車輛數			113,400 輛/年	Kauffman(2003)與本研究概估

[資料來源：本研究整理]

表 5-2 為燃料電池公車系統相關成本參數設定表，其主要設定原則如下：

1. 單位車輛購置成本：根據 <http://www.sina.com.cn>，燃料電池車輛之燃料電池

成本約每千瓦 3000 美元，並由 <http://www.investteda.org> 指出，現行之燃料電池車輛為 100 千瓦且傳動系統約佔整部車成本的四分之一，故經本研究推估與貨幣單位換算，將單位燃料電池公車購置成本設定為 36,000,000 元。

2. 車輛預計使用年限：本研究將其假設為 10 年。
3. 單位里程維修成本：根據交通部運輸研究所(民 89)針對低污染公車營運技術評估及應用之研究，將燃料電池公車之維修費用設定為 20 元/公里，故本研究即以此數值為基礎。
4. 單位燃料電池公車所能載裝之氫能容量：以 Hörmandinger et al.(1996)文獻中所提及之 12 公尺長 50 人座之都市燃料電池公車為例，並透過本研究容量單位換算，將其設定為 72 公斤/車。
5. 氫能價格：係根據本研究利用灰色理論所算之 2005 年預測值。
6. 單位氫能所能行駛距離：根據交通部運輸研究所(民 89)指出，目前國內柴油公車的能源效率為 2.5 (公里/公升) 且燃料電池公車之能源效率約為柴油公車之 1.9 倍左右。故本研究據此經過單位換算與概估，柴油公車的能源效率約為 3 (公里/公斤)，而燃料電池公車之能源效率約為 5.7 (公里/公斤)。
7. 氫能供應站設置成本：根據交通部運輸研究所(民 89)，將其設定為 24,000,000 元，本研究假設其預計使用 15 年，且利率為 5%。
8. 氫能供應站營運成本：根據 Battelle and Eudy(2003)與 Amos(1998)以及本研究之估算，將壓縮機運轉成本與大量儲氫容器運作成本分別設定為 70,169,615 元/年與 30,187,830 元/年；而電解槽運作成本因隨公車業者所需氫能總量之不同而有所差異，故本研究則依據兩家業者所需之氫能總量進行估算，分別將其所需之電解槽運作成本設定為 S 公司 32,677,758 元/年，T 公司 29,646,693 元/年。
9. 氫能供應站設備維護成本：根據 Hörmandinger et al.(1996)，並透過本研究貨幣單位換算，將其設定為 2,385,000 元/年。
10. 氫能供應站管理費用：以交通部運輸研究所(民 89)之估算為本研究之設定值。

11. 氫能供應站每年可服務車輛數：Kauffman(2003)與時代信報(2004)指出，現有燃料電池小汽車每輛平均之載氫容量為 5 公斤，而本研究概估之燃料電池公車載氫容量為 72 公斤/輛，約為小汽車之 15 倍左右，故本研究即以氫能供應站每日可服務之公車數為小客車的 15 倍，並配合業者每年營運日數來加以估算，故設定其每年可服務車輛數為 113,400 輛/年。

表 5-3 空氣污染相關參數設定值

空氣污染相關參數	設定值	資料來源
一般空氣污染物之單位成本 (δ_A)	4.7 元/公斤	交通部運輸研究所(民 89) 與本研究概估
二氧化碳之單位成本 (δ_C)	3.2 元/公斤	交通部運輸研究所(民 89)
柴油公車一般空氣污染物 排放率 (λ_{TB})	28.45 公克/公里	交通部運輸研究所(民 89)
燃料電池公車一般空氣污染物 排放率 (λ_{FB})	0 公克/公里	Santarelli and Bertolasco(2003) 與陳菟蕙等人 (民 92)
柴油公車二氧化碳排放率 (ϕ_{TB})	1.7 公斤/公里	Environment Canada (MECA, 1997)
燃料電池公車二氧化碳排放率 (ϕ_{FB})	0.2 公斤/公里	http://www.fuelcell.org/fuel/fcbenefi.shtml , Courtesy of Jeremy Snyder, Desert Research Institute

[資料來源：本研究整理]

表 5-3 為空氣污染相關參數之設定值，主要有柴油公車與燃料電池公車一般空氣污染排放物、柴油公車與燃料電池公車二氧化碳排放率。其中，一般空氣污染排放物主要有 PM、NO_x、HC 與 CO。Santarelli and Bertolasco(2003)指出，燃料電池公車一般空氣污染物之排放率均極少量，且陳菟蕙等人 (民 92) 亦建議將此類污染物參數值設定為 0，因此本研究即設定其為 0 公克/公里；此外，根據交通部運輸研究所(民 89)所蒐集之資料，本研究將柴油公車一般空氣污染物排放率、柴油公車二氧化碳排放率分別設定為 28.45 公克/公里、1.7 公斤/公里。其中，在燃料電池二氧化碳排放率方面，由於本研究所蒐集之國內外相關資料有多種版本，有些文獻實際測試結果發現無任何二氧化碳濃度存在，如 Contadini(2000)以及 Santarelli and Bertolasco(2003)，但有些文獻與機構實際測時結果發現仍有少量二氧化碳存在，如 Ekdunge and Råberg(1998)與 Desert Research Institute，因此，為保守估計二氧化碳減量效益，本研究將燃料電池公車二氧化碳排放率設定為 0.2 公斤/公里。

表 5-4 需求模式效用函數參數值

變數	參數值 β_i	
常數項	β_0	0.412
單位車輛購置成本/營收	β_1	-0.184
單位里程所需成本	β_2	-0.076
最高速度	β_3	0.262
污染排放量	β_4	-0.302

[資料來源：Brownstone et al. (2000)]

此外，表 5-4 為本研究需求模式效用函數所採用之參數值，主要是參考 Brownstone et al. (2000) 對選擇替代燃料車之研究所校估之結果。

5.2 輸出結果與補貼分析

將上節所設定之參數值輸入模式中，透過 LINGO8.0 軟體求解數學規劃模式，可獲得業者在政府部門資本補貼下之使用量，以及其對外部成本之改善效益可獲得之績效補貼。

表 5-5 兩家客運公司使用情形輸出結果

	最小化社會總成本
社會總成本	3,634,854,000 元
S 公司總成本	1,646,004,000 元
T 公司總成本	1,859,735,000 元
S 公司外部成本	67,554,110 元
T 公司外部成本	61,561,070 元
S 公司選擇機率	0.74 (0.7355820)
T 公司選擇機率	0.74 (0.7351377)
S 公司使用量	284(283.9347)輛
T 公司使用量	359(358.7472)輛
S 公司單位車輛購置補貼額	18,237,980 元/輛

T 公司單位車輛購置補貼額	18,111,930 元/輛
S 公司氫能供應站補貼額	12,000,000 元
T 公司氫能供應站補貼額	12,000,000 元
S 公司改善單位空氣污染之績效補貼	19(19.24332)元/公斤
T 公司改善單位空氣污染之績效補貼	26(26.17)元/公斤
S 公司空氣污染改善成效績效補貼額	751,609,500 元
T 公司空氣污染改善成效績效補貼額	929,862,000 元

[資料來源：本研究整理]

表 5-5 為兩家客運公司使用情形之輸出結果。根據行政院主計處中央政府總預算預算表，彌補台灣汽車客運股份有限公司民營化前累積虧損所需經費，九十三年度為 40 億元，但因燃料電池車之燃料電池成本為傳統燃油公車成本之三倍左右，故本研究即將中央政府補貼預算取三倍，將其上限設為 120 億元，此用於業者資本補貼，而地方政府補貼預算上限則設為 17 億元，用於業者績效補貼。經由 LINGO8.0 軟體求解結果，社會總成本為 3,634,854,180 元，其中，業者總成本為 3,505,739,000 元，外部總成本為 129,115,180 元；而在有政府資本補貼與績效補貼之情形下，兩家客運公司選擇燃料電池公車之機率均為 0.74 左右，表中括號之數值為精確值，因此，兩家公司之使用量分別約為 284 輛與 359 輛。在資本補貼部份，S 公司車輛購置成本可享有政府每輛 18,237,980 元之補助，T 公司則有享有每輛 18,111,930 元之補助；而兩家公司之氫能供應站設置成本補貼均相同，為 12,000,000 元，即 50% 之補助；在改善空氣污染之績效補貼方面，S 公司改善單位空氣污染可獲得每公斤約 19 元之補貼，而 T 公司改善單位空氣污染則獲得每公斤約 26 元之補貼，配合兩家公司之行駛里程，S 公司可獲得空氣污染改善成效績效補貼額 751,609,500 元，T 公司可獲得空氣污染改善成效績效補貼額 929,862,000 元。

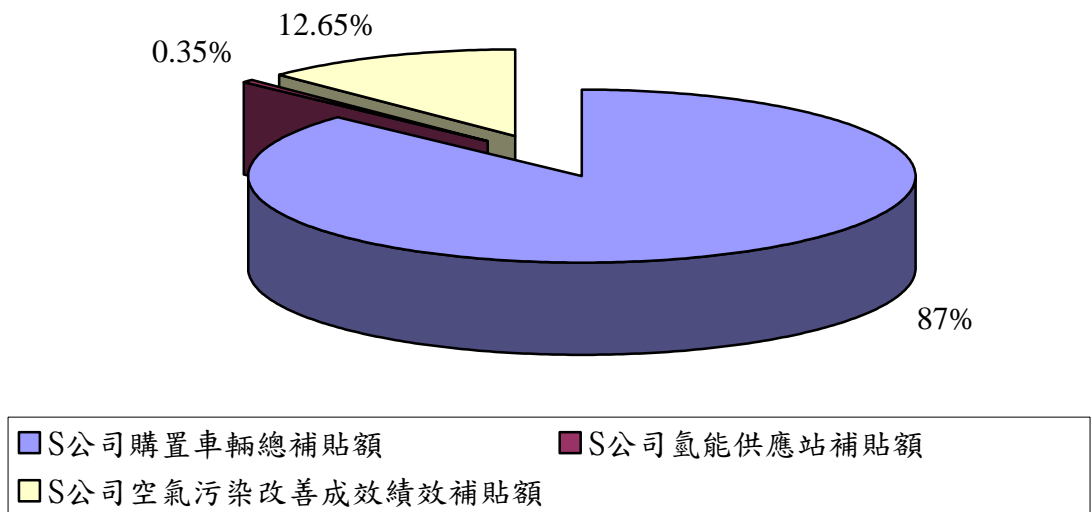


圖 5-1 S 公司各項補貼比例圖

[資料來源：本研究整理]

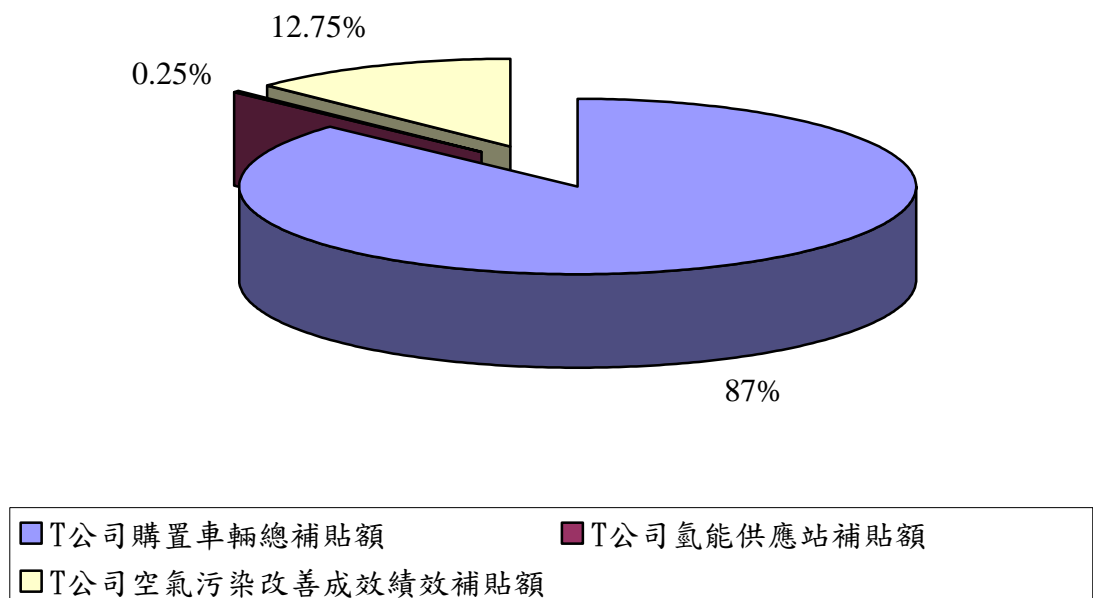


圖 5-2 T 公司各項補貼比例圖

[資料來源：本研究整理]

圖 5-1 與圖 5-2 分別為 S 公司與 T 公司受政府各項補貼之比例圖，其可看出

兩家公司受政府補貼均以車輛購置補貼總額比例佔最多，均約為 87%；其次為改善空氣污染所獲致之績效補貼，分別約為 12.65% 與 12.75%；而氫能供應站設置之資本補貼所佔比例最少，分別約為 0.35% 與 0.25%。其中改善空氣污染之績效補貼主要與兩家公司之行駛里程以及燃油公車與燃料電池公車兩者成本差距有關，原則上行駛里程愈多，則空氣污染改善成效愈大，績效補貼自然愈多，但若將兩公車系統營運成本納入考量時，補貼多寡則需視兩公車系統之成本差距而定；以 S 公司為例，其車輛每年之行駛里程數高於 T 公司，但另一方面，其若使用傳統燃油公車而不使用燃料電池公車時，其每車公里之營運成本低於 T 公司，換言之，S 公司兩公車系統之成本差距低於 T 公司兩公車系統之成本差距，故在綜合考量下，其所獲得之績效補貼少於 T 公司；反之，對 T 公司而言，其車輛每年之行駛里程數雖不及於 S 公司，但其兩公車系統之成本差距高於 S 公司，故在綜合考量下，其最後所獲得之績效補貼多於 S 公司。綜言之，改善空氣污染之績效補貼除了與行駛里程數有關之外，亦與客運公司本身選擇使用兩公車系統間之成本差距有關。

表 5-6 S 公司每年所須負擔之成本明細表

單位：元

車輛成本	折舊成本	998,844,188
	維修成本	511,200,000
	氫能成本	132,602,525
	小計	1,642,646,713
氫能供應站成本	平均設置成本	1,152,000
	平均營運成本	471,342
	設備維護成本	1,309,916
	管理費用	2,000,000
	小計	4,933,258
	總計	1,647,579,971

[資料來源：本研究整理]

表 5-7 T 公司每年所須負擔之成本明細表

單位：元

車輛成本	折舊成本	1,271,583,744
	維修成本	465,264,000
	氫能成本	120,699,713
	小計	1,857,547,457
氫能供應站成本	平均設置成本	1,152,000
	平均營運成本	364,495
	設備維護成本	1,192,333
	管理費用	2,000,000
	小計	4,708,828
	總計	1,862,256,285

[資料來源：本研究整理]

表 5-6 與表 5-7 則為兩家客運公司於政府補貼後，其每年所須負擔之成本明細。於車輛成本部份，由於兩家公司車輛購置受政府之部份補助，故間接影響其每年須負擔之車輛折舊成本，此部分即可了然，勿庸贅述；而車輛維修成本方面，主要與車輛行駛里程與車輛數有關，S 公司燃料電池公車使用量雖少於 T 公司，但其每車每年之行駛里程卻高於 T 公司，因此，在相同單位里程之維修成本下，S 公司之車輛維修成本為 511,200,000 元，高於 T 公司之 465,264,000 元；氫能成本方面，主要與每年所需之氫能總量與車輛數有關，S 公司之車輛數少於 T 公司，但因其每年每車之行駛里程較 T 公司多，故使其每年所需之氫能總量相對較多，因此，在單位氫能價格相同之條件下，S 公司每年所需之氫能成本為 132,602,525 元，較 T 公司 120,699,713 元為多。此外，在氫能供應站成本方面，因兩家公司供應站之設置受政府補貼均相同，因此每年所須負擔之成本亦相同，為 1,152,000 元；而平均營運成本的部份則與使用之車隊數有關，當使用之車隊數愈多時，其所需分攤之單位營運成本可降低，故 T 公司之平均營運成本為 364,495 元，較 S 公司之 471,342 元為低；在設備維護成本的部份，主要與設備之年使用率有關，而使用率又與所需之氫能總量以及車隊數有關，故情況與氫能成本相似，因此，

T 公司之設備維護成本為 1,192,333 元，少於 S 公司之 1,309,916 元；而在總成本方面，由於 S 公司車輛購置受政府補助高於 T 公司，故其每年所須負擔之總成本 1,647,579,971 元少於 T 公司每年須負擔之總成本 1,862,256,285 元，約少 11.5 % 的成本支出。圖 5-3 與圖 5-4 則為兩家客運公司各車輛成本項與氢能供應站各成本項之比較圖。

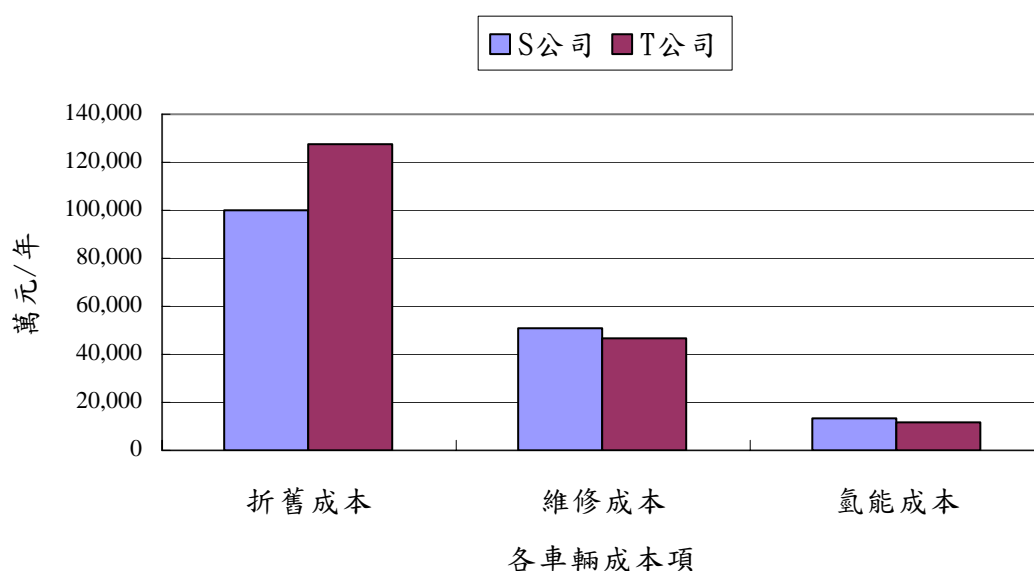


圖 5-3 兩家客運公司各車輛成本項比較圖
[資料來源：本研究整理]

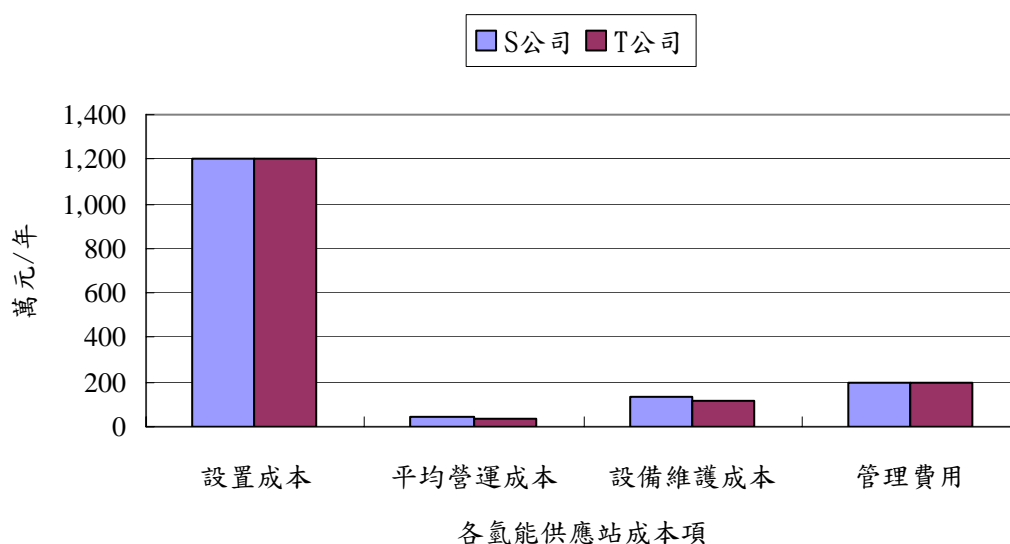


圖 5-4 兩家客運公司氢能供應站各成本項比較圖
[資料來源：本研究整理]

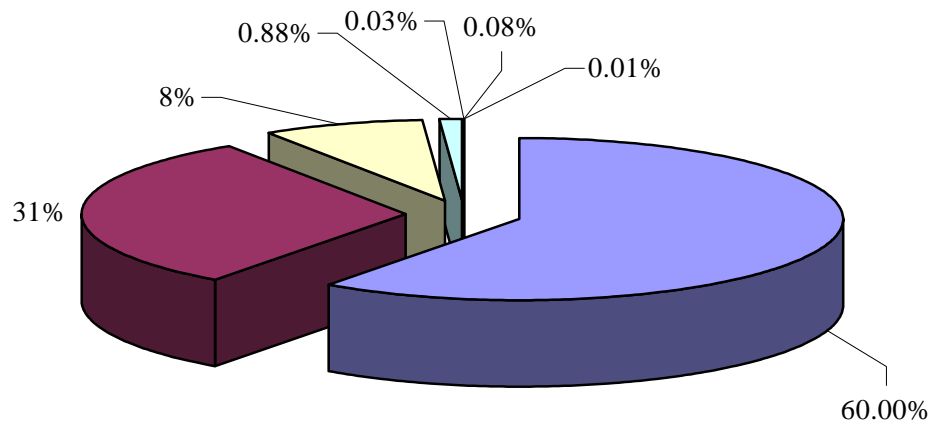
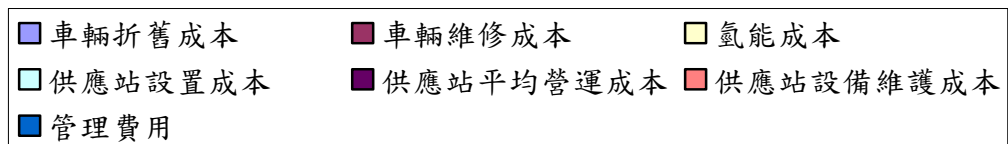


圖 5-5 S 公司各成本項所佔比例圖

[資料來源：本研究整理]

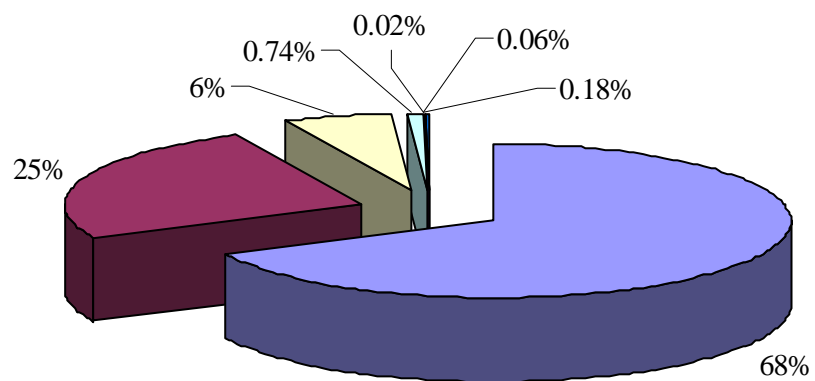
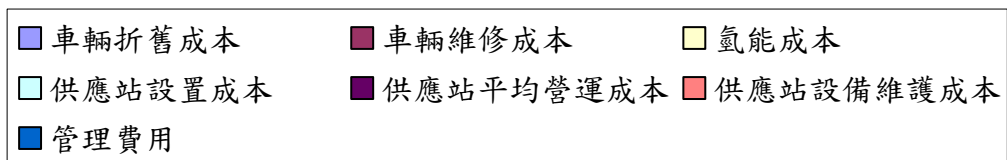


圖 5-6 T 公司各成本項所佔比例圖

[資料來源：本研究整理]

圖 5-5 與圖 5-6 為兩家客運公司各成本項所佔比例圖，S 公司之車輛折舊成本所佔比例 60% 為最大，其次為車輛維修成本比例 31%，再者為氫能成本比例 8%；而 T 公司之車輛折舊成本所佔比例 68% 為最高，其次則為車輛維修成本 25%，再者為氫能成本比例 6%；而其餘成本項所佔比例中，兩家客運公司大致上亦為相似，其中以供應站平均營運成本所佔比例最低，分別約為 0.01% 與 0.18%。

5.3 空氣污染改善效益分析

本小節將針對兩家公司使用燃料電池公車前後對空氣污染改善成效做分析，主要探討一般空氣污染物與二氧化碳減量程度，並評估其所帶來之效益；此外，配合兩家公司各營運路線別，估算使用前後各路線污染情形之減量效果與其服務範圍可能受影響之人口數；最後，推估使用後各路線之能源節約量，並配合本研究先前之灰色預測結果，估算能源節約效益。

表 5-8 兩家客運公司 2005 年使用燃料電池公車前後對一般空氣污染物排放之影響

	使用燃料電池公車前 一般空氣污染物排放 情形 (公斤/年)	使用燃料電池公車後 一般空氣污染物排放 情形 (公斤/年)	減量 (公斤/年)	減量百分比 (%)	效益 (元/年)
S 公司	(386) 988,353	(102) 261,171	727,182	74%	3,417,755
T 公司	(488) 899,657	(129) 237,619	661,838	74%	3,110,639
總計	(874) 1,888,010	(231) 498,790	1,389,020	74%	6,528,394

[資料來源：本研究整理]

由於移動性污染源目前並無有效反應污染減量效益之參數，故本研究參考交通部運輸研究所(民 89)，以柴油隨油徵收空氣污染防治費收費率加以估算一般空氣污染減量效益，其費率為 0.2 元/公升，透過本研究單位換算與概估，將一般空氣污染物之單位成本設定為 4.7 元/公斤，並以此進行效益估算。估算結果如表 5-8 所示，兩家客運公司在 2005 年使用燃料電池公車前，一般空氣污染物排放情形每年分別為 988,353 公斤與 899,657 公斤，其中括號內之數值為使用前之燃油公車數，而在 2006 年使用燃料電池公車後，兩家公司一般空氣污染物排放情形變成每年 261,171 公斤與 237,619 公斤，括號內之數值為使用燃料電池公車後所餘之燃油公車數，每年總共減少了 1,389,020 公斤，約 74%，效益分別為每年 3,417,755 元與 3,110,639 元，即每年可節省約 6,528,394 元之外部成本，進而間接可減少無謂的社會成本支出，可見燃料電池公車對空氣品質影響層面甚廣及其帶來之效益亦相

當驚人。圖 5-7 為兩家公司使用前後對一般空氣污染物之排放情形。

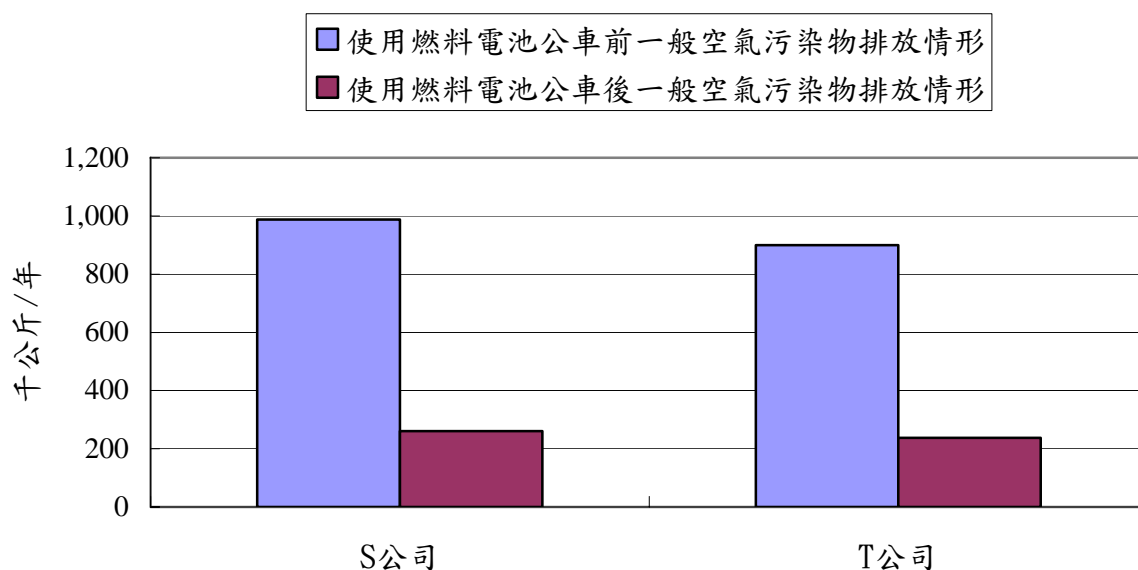


圖 5-7 兩家公司使用燃料電池公車前後對一般空氣污染物之排放情形

[資料來源：本研究整理]

表 5-9 兩家客運公司 2005 年使用燃料電池公車前後對二氧化碳排放之影響

	使用燃料電池公車前 二氧化碳排放情形 (公斤/年)	使用燃料電池公車後 二氧化碳排放情形 (公斤/年)	減量 (公斤/年)	減量百分比 (%)	效益 (元/年)
S 公司	(386) 59,058,000	(102) 20,718,000	38,340,000	65%	122,688,000
T 公司	(488) 53,758,080	(129) 18,863,280	34,894,800	65%	111,663,360
總計	(874) 112,816,080	(231) 39,581,280	73,234,800	65%	234,351,360

[資料來源：本研究整理]

除了一般空氣污染物之外，目前國內外各產官學界所關心之污染氣體非二氧化碳莫屬，尤其京都議定書之制定即可看出國際間對二氧化碳濃度之重視程度，因此本研究將二氧化碳所造成之影響單獨提出探討。在此部份之分析，由於本研究蒐集之國內外有關燃料電池公車二氧化碳排放率之資料有多種版本，故本研究將所蒐集之資料中二氧化碳排放率最高者每公里 0.2 公斤設定為本研究燃料電池公車二氧化碳之排放率，以保守估計至少可改善之效益值。本研究參考交通部運輸研究所(民 89)，以每公斤碳 3.2 元進行效益分析。如表 5-9 所示，在兩家公司使用燃料電池公車前，二氧化碳排放情形分別為每年 59,058,000 公斤與

53,758,080 公斤，而使用後則減量為每年 20,718,000 公斤與 18,863,280 公斤，分別減少了 38,340,000 公斤與 34,894,800 公斤，總計每年可減少 73,234,800 公斤，約 65%，且其每年所帶來之效益分別為 122,688,000 元與 111,663,360 元，總計每年可節省約 234,351,360 元。圖 5-8 為兩家公司使用前後對二氧化碳之排放情形。

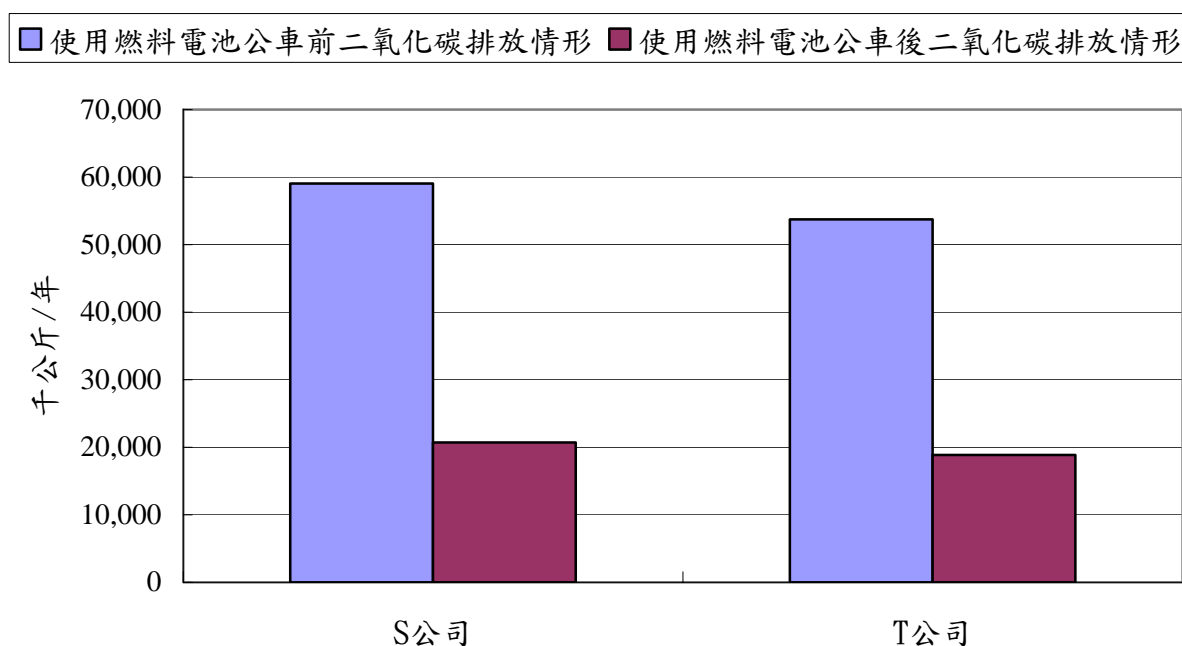


圖 5-8 兩家公司使用燃料電池公車前後對二氧化碳之排放情形

[資料來源：本研究整理]

表 5-10 與表 5-11 分別為兩家公司各營運路線使用燃料電池公車前後整體空氣污染物排放情形。其中，本研究假設研究區域為格子型路網之道路型態、人口密集且均勻分布之都會區，故擬以台北都會區為例，將人口居住密度設為每平方公里 9560 人進行換算。結果顯示，在本研究之假設條件下，S 公司路線 25 減量成效最大，每年約可減量 3,301,452 公斤之空氣污染物，而路線 8 與路線 27 影響之人口數最多，約有 516,240 受污染影響；在 T 公司方面，以路線 11 減量成效最大，每年約可減量 4,159,829.52 公斤之空氣污染物，影響人口數方面，同樣以路線 11 為最，約有 453,144 人受污染影響。

表 5-10 S 公司各路線使用燃料電池公車前後整體空氣污染物排放情形

路線別	總里程 (公里)	原始 配車數 (輛)	燃料電池 公車使用量 (輛)	使用前 排放量 (公斤/年)	使用後 排放量 (公斤/年)	減量 (公斤/年)	受污染影 響人口數 (人)
1	35.4	13	10	2022286.5	646681.5	1375605	338424
2	26.2	30	22	4666815	1640484	3026331	250472
3	34.6	4	3	622242	209560.5	412681.5	330776
4	44.6	2	1	311121	173560.5	137560.5	426376
5	27	12	9	1866726	628681.5	1238044.5	258120
6	43.4	6	4	933363	383121	550242	414904
7	49.1	30	22	4666815	1640484	3026331	469396
8	54	16	12	2488968	838242	1650726	516240
9	22.4	14	11	2177847	664681.5	1513165.5	214144
10	20.6	6	4	933363	383121	550242	196936
11	37	3	2	466681.5	191560.5	275121	353720
12	43.7	26	19	4044573	1430923.5	2613649.5	417772
13	26.8	2	1	311121	173560.5	137560.5	256208
14	29.6	20	15	3111210	1047802.5	2063407.5	282976
15	32.5	15	11	2333407.5	820242	1513165.5	310700
16	32	15	11	2333407.5	820242	1513165.5	305920
17	37.6	24	18	3733452	1257363	2476089	359456
18	42.2	16	12	2488968	838242	1650726	403432
19	26.6	16	12	2488968	838242	1650726	254296
20	38.1	3	2	466681.5	191560.5	275121	364236
21	47.6	15	11	2333407.5	820242	1513165.5	455056
22	25.2	1	1	155560.5	18000	137560.5	240912
23	52.2	18	13	2800089	1011802.5	1788286.5	499032
24	32.3	10	7	1555605	592681.5	962923.5	308788
25	34.6	32	24	4977936	1676484	3301452	330776
26	28	6	4	933363	383121	550242	267680
27	54	16	12	2488968	838242	1650726	516240
28	47.6	15	11	2333407.5	820242	1513165.5	455056
總計	1024.9	386	284	60046353	20979171	39067182	9798044

[資料來源：本研究整理]

表 5-11 T 公司各路線使用燃料電池公車前後整體空氣污染物排放情形

路線別	總里程 (公里)	原始 配車數 (輛)	燃料電池 公車使用量 (輛)	使用前 排放量 (公斤/年)	使用後 排放量 (公斤/年)	減量 (公斤/年)	受污染影響 人口數 (人)
1	24.6	2	1	224007.12	124963.56	99043.56	235176
2	25	30	22	3360106.8	1181148.48	2178958.32	239000
3	22	1	1	112003.56	12960	99043.56	210320
4	19.6	30	22	3360106.8	1181148.48	2178958.32	187376
5	26.8	18	13	2016064.08	728497.8	1287566.28	256208
6	11.3	1	1	112003.56	12960	99043.56	108028
7	35	31	23	3472110.36	1194108.48	2278001.88	334600
8	36.4	1	1	112003.56	12960	99043.56	347984
9	23.4	5	4	560017.8	163843.56	396174.24	223704
10	33.8	35	26	3920124.6	1344992.04	2575132.56	323128
11	47.4	57	42	6384202.92	2224373.4	4159829.52	453144
12	30.5	18	13	2016064.08	728497.8	1287566.28	291580
13	25	30	22	3360106.8	1181148.48	2178958.32	239000
14	32	42	31	4704149.52	1633799.16	3070350.36	305920
15	38.1	4	3	448014.24	150883.56	297130.68	364236
16	26.2	30	22	3360106.8	1181148.48	2178958.32	250472
17	34.4	6	4	672021.36	275847.12	396174.24	328864
18	18.6	5	4	560017.8	163843.56	396174.24	177816
19	43.6	4	3	448014.24	150883.56	297130.68	416816
20	38.2	1	1	112003.56	12960	99043.56	365192
21	39.2	1	1	112003.56	12960	99043.56	374752
22	45.6	1	1	112003.56	12960	99043.56	435936
23	26	12	9	1344042.72	452650.68	891392.04	248560
24	15.6	2	1	224007.12	124963.56	99043.56	149136
25	26	4	3	448014.24	150883.56	297130.68	248560
26	35	6	4	672021.36	275847.12	396174.24	334600
27	23.6	2	1	224007.12	124963.56	99043.56	225616
28	23	2	1	224007.12	124963.56	99043.56	219880
29	22.8	4	3	448014.24	150883.56	297130.68	217968
30	30.8	3	2	336010.68	137923.56	198087.12	294448
31	31	11	8	1232039.16	439690.68	792348.48	296360
32	27.6	25	19	2800089	918261.36	1881827.64	263856
33	27.6	10	7	1120035.6	426730.68	693304.92	263856
34	18.8	25	19	2800089	918261.36	1881827.64	179728
35	24.5	9	7	1008032.04	314727.12	693304.92	234220
36	29.3	17	12	1904060.52	715537.8	1188522.72	280108
37	17.1	3	2	336010.68	137923.56	198087.12	163476
總計	1055.4	488	359	54657737	19101099	35556638	10089624

[資料來源：本研究整理]

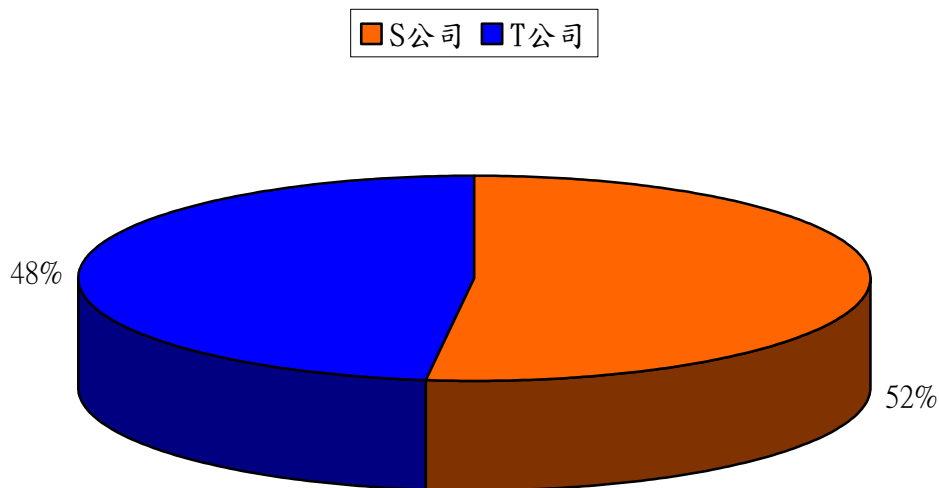


圖 5-9 兩家公司使用燃料電池公車後對整體空氣污染減量之貢獻程度

[資料來源：本研究整理]

圖 5-9 為兩家公司使用燃料電池公車後對整體空氣污染減量之貢獻程度比例圖，即綜合考慮一般空氣污染物與二氧化碳減量成效。整體而言，兩家公司使用燃料電池公車後對空氣污染減量每年共達 74,623,820 公斤，其中，S 公司每年貢獻了 39,067,182 公斤的減量，約占 52%；而 T 公司每年則貢獻了 35,556,638 公斤的減量，約 48%，兩者所貢獻之程度差距不大。

此外，當業者引入燃料電池公車進行營運時，即減少燃油公車之使用量，亦即間接減少了石油能源之耗用量，故本研究據此推估業者使用燃料電池公車後之能源節約量，並利用 3.4 小節之油價預測值估算能源節約效益。兩家公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益整理如表 5-12 與表 5-13 所示，其中油價部份以本研究預測 2005 年每公斤 19.56 元之油價進行估算。

表 5-12 S 公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益

路線別	原始配車數	燃料電池 公車使用量	總行駛里程 (公里/每年)	能源節省量 (公斤/年)	能源節約效益 (元/年)
1	13	10	900,000	300,000	5,868,000
2	30	22	1,980,000	660,000	12,909,600
3	4	3	270,000	90,000	1,760,400
4	2	1	90,000	30,000	586,800
5	12	9	810,000	270,000	5,281,200
6	6	4	360,000	120,000	2,347,200
7	30	22	1,980,000	660,000	12,909,600
8	16	12	1,080,000	360,000	7,041,600
9	14	11	990,000	330,000	6,454,800
10	6	4	360,000	120,000	2,347,200
11	3	2	180,000	60,000	1,173,600
12	26	19	1,710,000	570,000	11,149,200
13	2	1	90,000	30,000	586,800
14	20	15	1,350,000	450,000	8,802,000
15	15	11	990,000	330,000	6,454,800
16	15	11	990,000	330,000	6,454,800
17	24	18	1,620,000	540,000	10,562,400
18	16	12	1,080,000	360,000	7,041,600
19	16	12	1,080,000	360,000	7,041,600
20	3	2	180,000	60,000	1,173,600
21	15	11	990,000	330,000	6,454,800
22	1	1	90,000	30,000	586,800
23	18	13	1,170,000	390,000	7,628,400
24	10	7	630,000	210,000	4,107,600
25	32	24	2,160,000	720,000	14,083,200
26	6	4	360,000	120,000	2,347,200
27	16	12	1,080,000	360,000	7,041,600
28	15	11	990,000	330,000	6,454,800
總計	386	284	25,560,000	8,520,000	166,651,200

[資料來源：本研究整理]

在表 5-12 中，路線 25 之能源節約量最多，每年約有 720,000 公斤的節約量，相對可帶來每年 14,083,200 元之節約效益，總計 S 公司在 284 輛燃料電池公車之使用量下，每年可節省約 8,520,000 公斤的石油能源，進而可隨之帶來 166,651,200 元之節約效益。圖 5-10 則為 S 公司各營運路線能源節約效益比較圖。

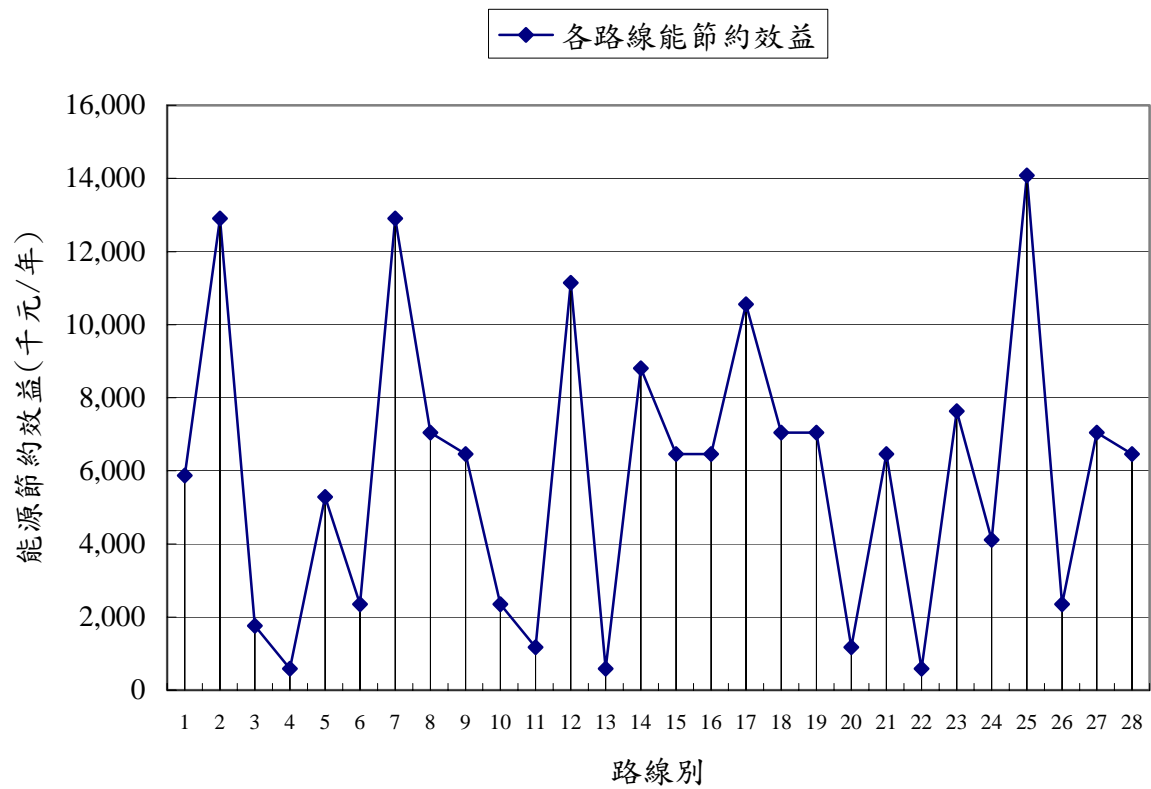


圖 5-10 S 公司各營運路線能源節約效益

[資料來源：本研究整理]

表 5-13 T 公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益

路線別	原始配車數	燃料電池 公車使用量	總行駛里程 (公里/每年)	能源節約量 (公斤/年)	能源節約效益 (元/年)
1	2	1	64,800	21,600	4,224,96
2	30	22	1,425,600	475,200	9,294,912
3	1	1	64,800	21,600	422,496
4	30	22	1,425,600	475,200	9,294,912
5	18	13	842,400	280,800	5,492,448
6	1	1	64,800	21,600	422,496
7	31	23	1,490,400	496,800	9,717,408
8	1	1	64,800	21,600	422,496
9	5	4	259,200	86,400	1,689,984
10	35	26	1,684,800	561,600	10,984,896
11	57	42	2,721,600	907,200	17,744,832
12	18	13	842,400	280,800	5,492,448
13	30	22	1,425,600	475,200	9,294,912
14	42	31	2,008,800	669,600	13,097,376
15	4	3	194,400	64,800	1,267,488
16	30	22	1,425,600	475,200	9,294,912
17	6	4	259,200	86,400	1,689,984
18	5	4	259,200	86,400	1,689,984
19	4	3	194,400	64,800	1,267,488
20	1	1	64,800	21,600	422,496
21	1	1	64,800	21,600	422,496
22	1	1	64,800	21,600	422,496
23	12	9	583,200	194,400	3,802,464
24	2	1	64,800	21,600	422,496
25	4	3	194,400	64,800	1,267,488
26	6	4	259,200	86,400	1,689,984
27	2	1	64,800	21,600	422,496
28	2	1	64,800	21,600	422,496
29	4	3	194,400	64,800	1,267,488
30	3	2	129,600	43,200	844,992
31	11	8	518,400	172,800	3,379,968
32	25	19	1,231,200	410,400	8,027,424
33	10	7	453,600	151,200	2,957,472
34	25	19	1,231,200	410,400	8,027,424
35	9	7	453,600	151,200	2,957,472
36	17	12	777,600	259,200	5,069,952
37	3	2	129,600	43,200	844,992
總計	488	359	23,263,200	7,754,400	151,676,064

[資料來源：本研究整理]

同理，表 5-13 為 T 公司各營運路線使用燃料電池公車情形與能源節約效益，其中路線 11 之能源節約量最多，每年約可節省 907,200 公斤的石油能源，相對可帶來 17,744,832 元之能源效益，總計 T 公司在 359 輛燃料電池公車之使用量

下，每年可節省約 7,754,400 公斤的石油能源，進而可隨之帶來 151,676,064 元之節約效益。

綜上，雖然 S 公司營運路線數與車隊數少於 T 公司，但其能源節約效益卻大於 T 公司，主要原因在於 S 公司每年所行駛之里程比 T 公司多，故其對石油能源之耗用量自然相對較大，因此，其所帶來之能源節約效益亦較多。圖 5-11 為 T 公司各營運路線能源節約效益比較圖。

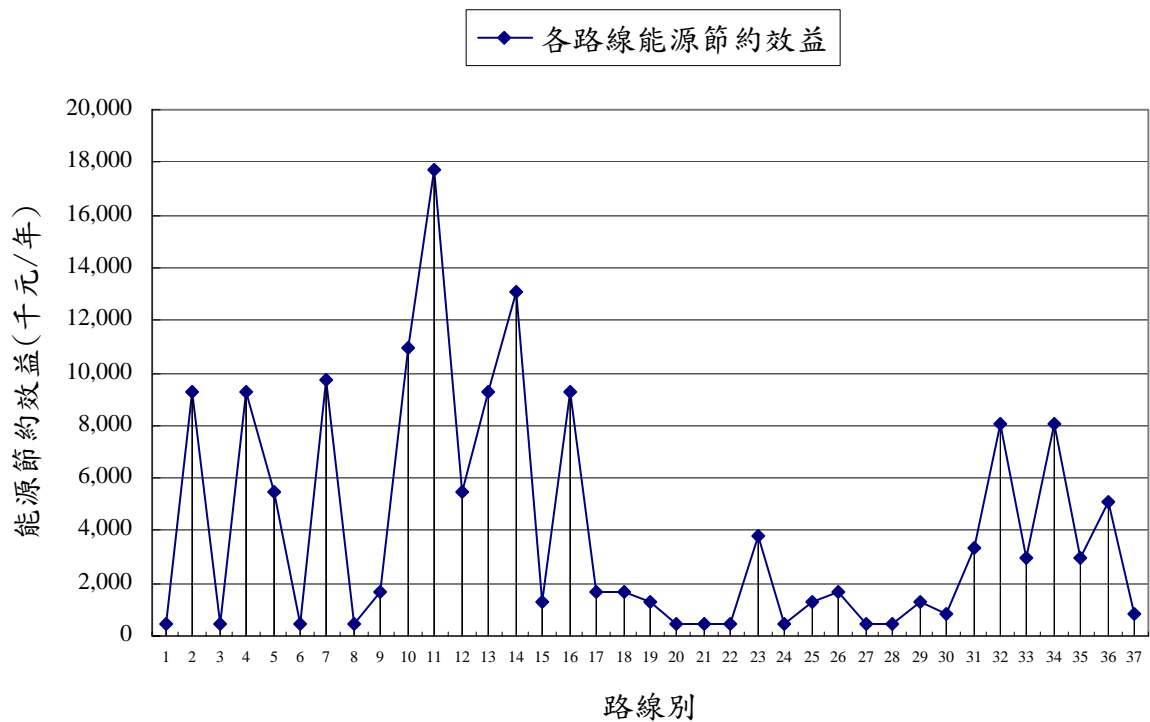


圖 5-11 T 公司各營運路線能源節約效益

[資料來源：本研究整理]

5.4 敏感度分析

上述各類分析皆屬靜態分析，本小節將以敏感度分析為基礎進行動態分析，藉以了解未來隨時間推移與燃料電池發展技術之變化對業者使用意願與政府部門補貼機制之影響，同時探討業者各成本項與政府補貼額之變化情形，以作為客運業者與政府相關單位評估未來是否採用燃料電池公車之參考。根據<http://www.investteda.org>指出，未來燃料電池車之生產成本需降至每千瓦 50 美元方能與現有傳統的內燃機之燃油車輛競爭，但礙於燃料電池相關資料甚少且不易取得，故本研究此部份擬配合各年燃油價格與氫能價格下，並假設燃料電池每千瓦成本逐年下降 10%，即以單位車輛購置成本逐年減少 10% 的幅度進行分析，藉以了解未來隨時間推移與燃料電池發展技術之變化對業者使用意願與政府部門補貼機制之影響，同時探討業者總成本與政府補貼額之變化情形。輸出結果如下表 5-14 所示：

表 5-14 敏感度分析輸出結果

年	油價 (元/斤)	氫能價格 (元/公斤)	單位車輛 購置成本 (元/輛)	公 司 別	使用量 (輛)	單位車輛 購置補貼 (元/輛)	改善空氣污染 之績效補貼 (元)	業者總成本 (元)
2005	19.56	29.57	36000000	S	284	18237980	751609500	1646004000
				T	359	18111930	929862000	1859735000
2006	20.18	28.91	32400000	S	286	16334120	657564700	1557830000
				T	362	14700000	919711300	1855606000
2007	20.82	28.27	29160000	S	288	13288490	647779700	1553808000
				T	364	13080000	806518900	1748568000
2008	21.48	27.64	26244000	S	290	11829400	565561500	1477447000
				T	366	11622000	703830600	1651742000
2009	22.16	27.02	23619600	S	292	10571710	487484400	1405229000
				T	369	10309800	609828600	1564175000
2010	22.86	26.42	21257640	S	294	9186284	431087600	1354647000
				T	371	9128820	527832600	1484993000
2011	23.58	25.83	19131876	S	296	8365552	393124600	1284204000
				T	373	8065938	446875400	1413427000
2012	24.33	25.25	17218688	S	297	7436875	343853500	1231703000
				T	376	7109344	376146500	1348842000
				S	299	6414765	298286800	1195316000

2013	25.10	24.69	15496820	S	299	6414765	298286800	1195316000
2013	25.90	24.69	15496820	T	308	5248419	301713200	1290108000
				T	381	5473569	302952000	1238047000
2015	26.72	23.60	12552424	S	303	4793155	172927700	1125734000
				T	383	4776212	257072300	1190437000
2016	27.56	23.08	11297181	S	305	4206374	131187400	1089801000
				T	385	4148591	218812600	1147624000
2017	28.44	22.56	10167463	S	307	3882588	80604670	1045143000
				T	388	3583732	105851500	1109127000
2018	29.34	22.06	9150717	S	309	3175994	59726050	1030106000
				T	390	3075358	65067700	1074450000
2019	30.27	21.57	8235645	S	310	2743867	28037160	1004287000
				T	392	2617823	27771140	1043273000
2020	31.23	21.09	7412081	S	312	2265964	5000000	986611200
				T	395	2206040	0	1015267000
2021	32.22	20.62	6670873	S	314	2066684	0	970889600
				T	397	1835436	0	975767000
2022	33.24	20.16	6003785	S	316	1828490	0	953524900
				T	399	1501893	0	966982300
2023	34.29	19.71	5403407	S	318	1240883	0	935544700
				T	402	1201703	0	947393000
2024	35.38	19.27	4863066	S	320	939751	0	924226100
				T	404	931553	0	928845700
2025	36.50	18.84	4376760	S	322	923447	0	911980500
				T	406	688380	0	898312600
2026	37.65	18.42	3939084	S	323	570560	0	901095700
				T	409	469542	0	892426000
2027	38.85	18.01	3545175	S	325	505008	0	884505300
				T	411	272588	0	886154000
				S	327	112108	0	881992500
				T	414	95329	0	874834700

[資料來源：本研究整理]

表 5-14 輸出結果可知，T 公司於 2020 年時起停止獲得政府的績效補貼，其意味此時其燃油公車系統總成本已正式超過燃料電池公車系統總成本，故此時應改採用燃料電池公車營運對其較有利；同理，對 S 公司而言，其亦自 2021 年起停止獲得政府的績效補貼，因其燃油公車系統總成本此時亦超過燃料電池公車

系統總成本。綜上，整體而言，隨著未來燃油價格、氫能價格與燃料電池車輛成本逐年變化之情形下，約自 2021 年起，燃料電池公車系統相對於燃油公車系統已開始具有競爭力。

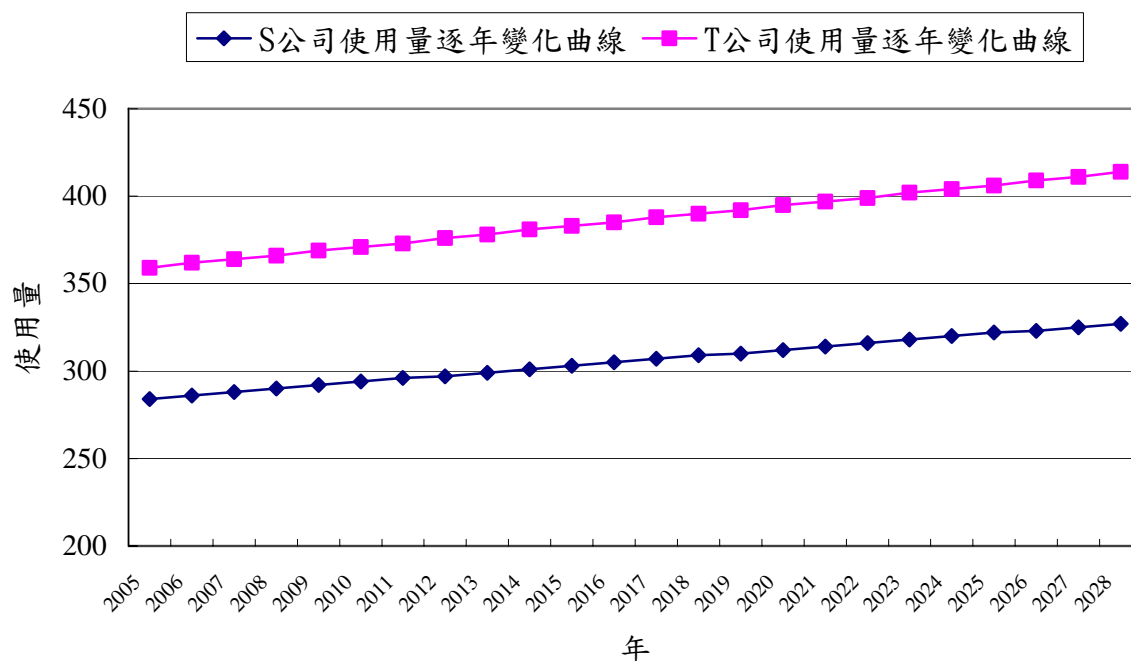


圖 5-12 兩家公司使用量逐年變化曲線

[資料來源：本研究整理]

圖 5-12 為未來兩家公司考慮採用燃料電池公車之變化情形，即一次採用量，而非單一客運公司逐年之採用量。易言之，圖 5-12 即假設在該年未使用燃料電池公車之狀態，而未來隨燃料電池發展技術之演變與氫能燃油價格之相對變化下，考慮引入時之可能使用量。舉例來說，若考慮於 2007 年引入，則 S 公司之使用量為 288 輛，T 公司之使用量為 364 輛，若考慮於 2008 年引入，則 S 公司之使用量為 290 輛，T 公司之使用量為 366 輛，餘此類推，故此二條使用量之變化曲線亦可說是未來使用量之預測值，且為單一公司各年之一次使用量而非單一公司逐年之多次使用量。此外，由圖中可看出在未來單位燃料電池公車購置成本與氫能價格逐年下降，柴油價格逐年提高之情形下，兩家公司未來可能之使用量亦隨之逐年增加。

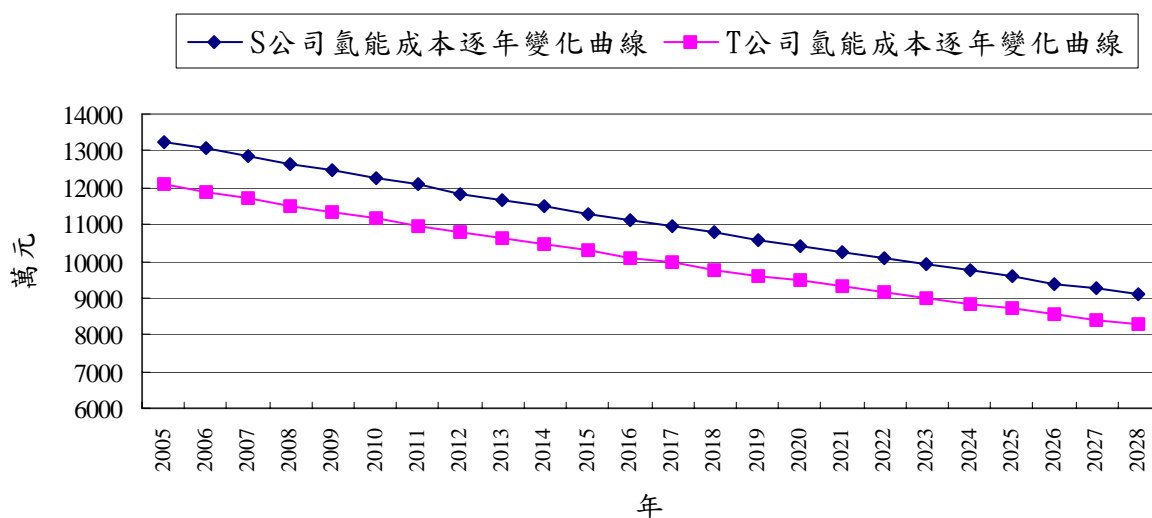


圖 5-13 兩家公司氫能成本未來變化曲線

[資料來源：本研究整理]

圖 5-13 為兩家公司未來在使用燃料電池公車之情況下，逐年須負擔之氫能成本變化趨勢，此變化趨勢是配合 3.4 小節中氫能未來價格預測值所推導出來之結果。由圖可知，自 2005 年起，業者在年行駛里程不變之條件下，未來須負擔之氫能成本將不增反減，且下降之幅度不算小，對 S 公司而言，若於 2005 年引入燃料電池公車，其使用量為 284 輛，該年須負擔超過 13000 萬元之氫能成本，若至 2021 年才考慮引採用時，則該年之使用量為 314 輛，該年須負擔之氫能成本已低於 11000 萬元；同理，對 T 公司而言，若於 2005 年引入，使用量為 359 輛，該年須負擔之氫能成本約為 12000 萬元左右，若於 2021 年才採用，其使用量為 397 輛，且該年須負擔之氫能成本已低於 10000 萬元。簡言之，未來業者引入時之採用量將逐年增加，但須負擔之氫能成本卻逐年減少，主要原因在於在氫能價格逐年下降之幅度比業者引入時使用量增加之幅度來的大所致，因此造成未來業者可能使用量雖增加，但實際上須負擔之氫能成本卻下降之現象。

此外，圖 5-13 曲線上所示之各年氫能成本亦可解釋為該年使用燃料電池公車時所須負擔之起始值，之後逐年遞減，即在使用量不變之情況下，業者所須負擔之氫能成本亦將逐年下降。以 S 公司為例，若其於 2005 年引入燃料電池公車，其使用量為 284 輛，該年須負擔之氫能成本為 13260 萬元，而 2006 年之後，在其使用量維持 284 輛且年行駛里程不變之條件下，會因氫能價格逐年下降的關係而減少其每年所須負擔之氫能成本，換言之，自 2006 年起，其每年所須負擔之氫能成本將比 13260 萬元低，且逐年降低。

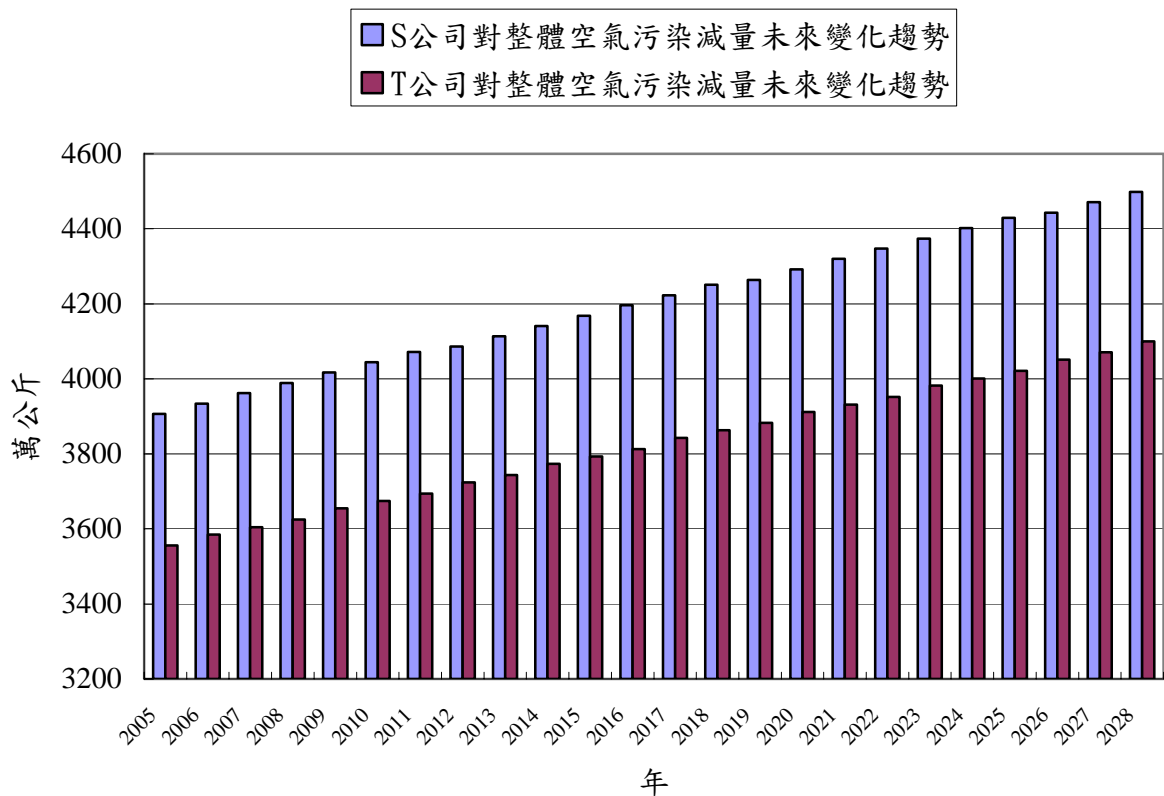


圖 5-14 兩家公司對於整體空氣污染減量情形未來變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

圖 5-14 為業者對於燃料電池公車未來可能之使用量下所對應之整體空氣污染改善情形，包括一般空氣污染物與二氧化碳之減量成效。由圖可看出，隨著兩家客運公司於未來可能之使用量增加，其所能改善之空氣污染程度相對增加，即空氣污染物減量效果逐年遞增，S 公司若於 2005 年採用，則其該年可減少約 3900 萬公斤之空氣污染物，若至 2021 年才使用，則其可減少之空氣污染物將超過 4200 萬公斤；同理，對 T 公司而言，若其於 2005 年採用，該年將可減少超過 3500 萬公斤之空氣污染物，若至 2021 年才使用，則空氣污染物可減量約 3900 萬公斤。簡言之，空氣污染改善程度將隨使用量之增加而增加，直到業者完全採用燃料電池公車時，對整體空氣污染改善之成效將達到最大。

此外，值得注意的是，S 公司之營運路線數與車輛數比 T 公司少，但其對空氣污染改善之貢獻程度卻高於 T 公司，主要因在於 S 公司車輛之年行駛里程高於 T 公司，使得其可減少更多空氣污染物之排放，故空氣污染物之減量除了與業者營運路線數以及車輛數有關之外，年行駛里程亦為重要之影響因素之一。

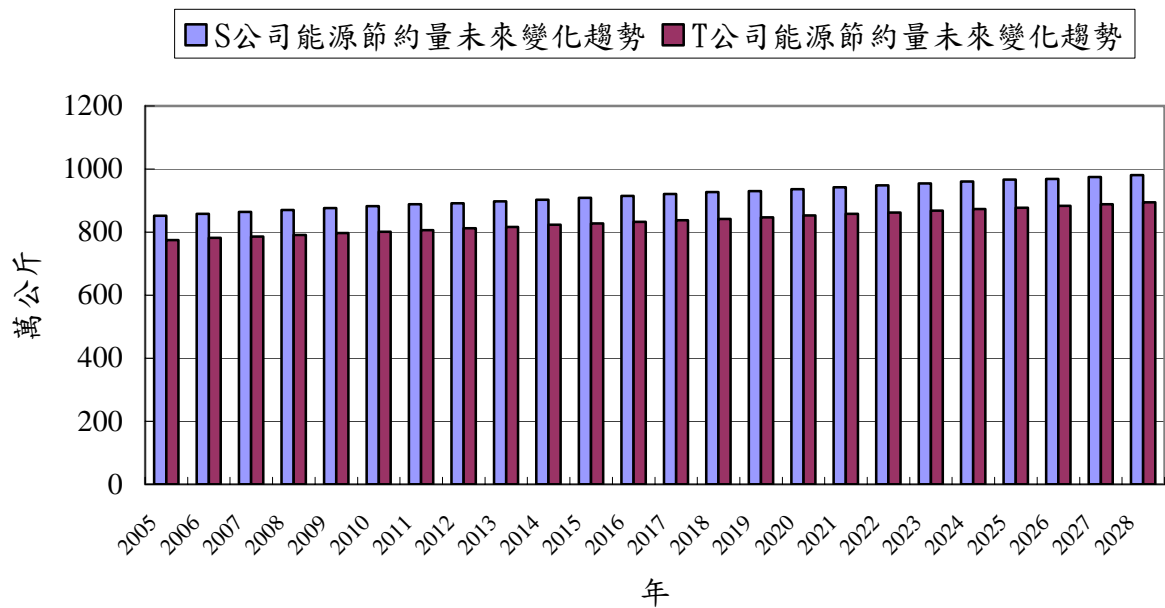


圖 5-15 兩家公司對於能源節約量之貢獻未來變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

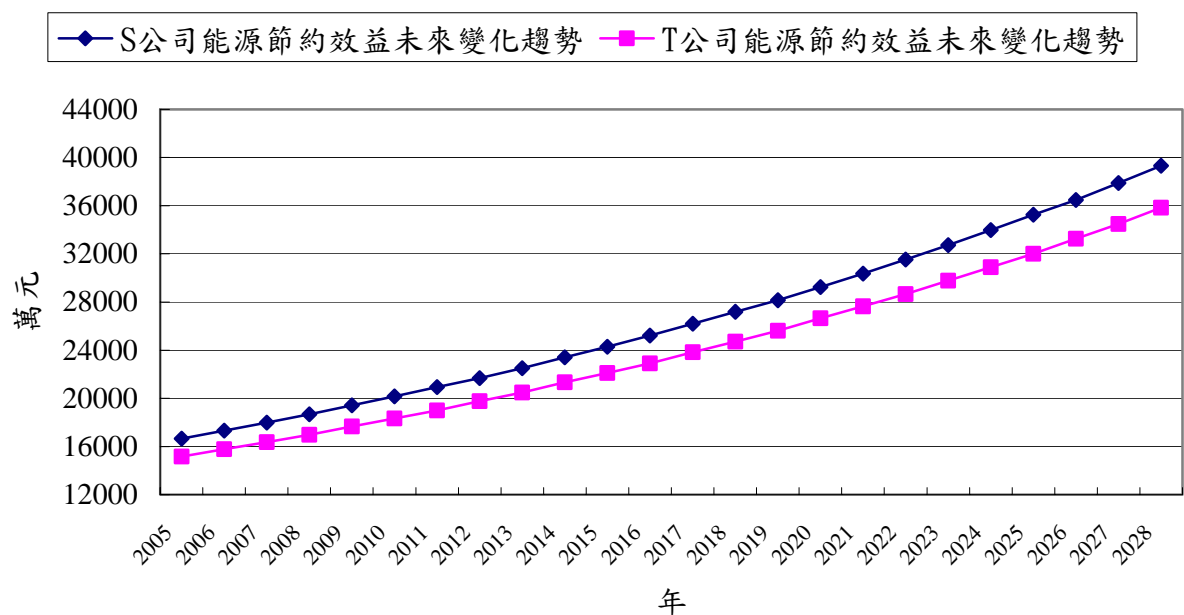


圖 5-16 兩家公司能源節約效益未來變化趨勢

[資料來源：本研究整理]

圖 5-15 為兩家公司對於能源節約量之貢獻未來變化情形，而圖 5-16 為其所對應之能源節約效益。隨著未來業者可能使用量之增加，其可節省之石油能源量亦隨之增加，然而，其所對應之能源節約效益則與氢能成本有異曲同工之妙，隨著能源節約量之增加，加上未來油價將逐年上漲，故其所帶來之能源節約效益將

逐年遞增，如圖 5-16 所示，若業者於 2005 年引入時，S 公司該年有超過 16000 萬元之能源節約效益，T 公司該年則有約 15000 萬元之能源節約效益，若業者至 2021 年採用，S 公司該年將有約 30000 萬元之能源節約效益，增加之幅度約 47 %，而 T 公司亦將有約 28000 萬元之能源節約效益，增加之幅度約 46%，能源節約效益可謂相當驚人，此對於傳統工業之能源需求無疑注入一劑強心針。

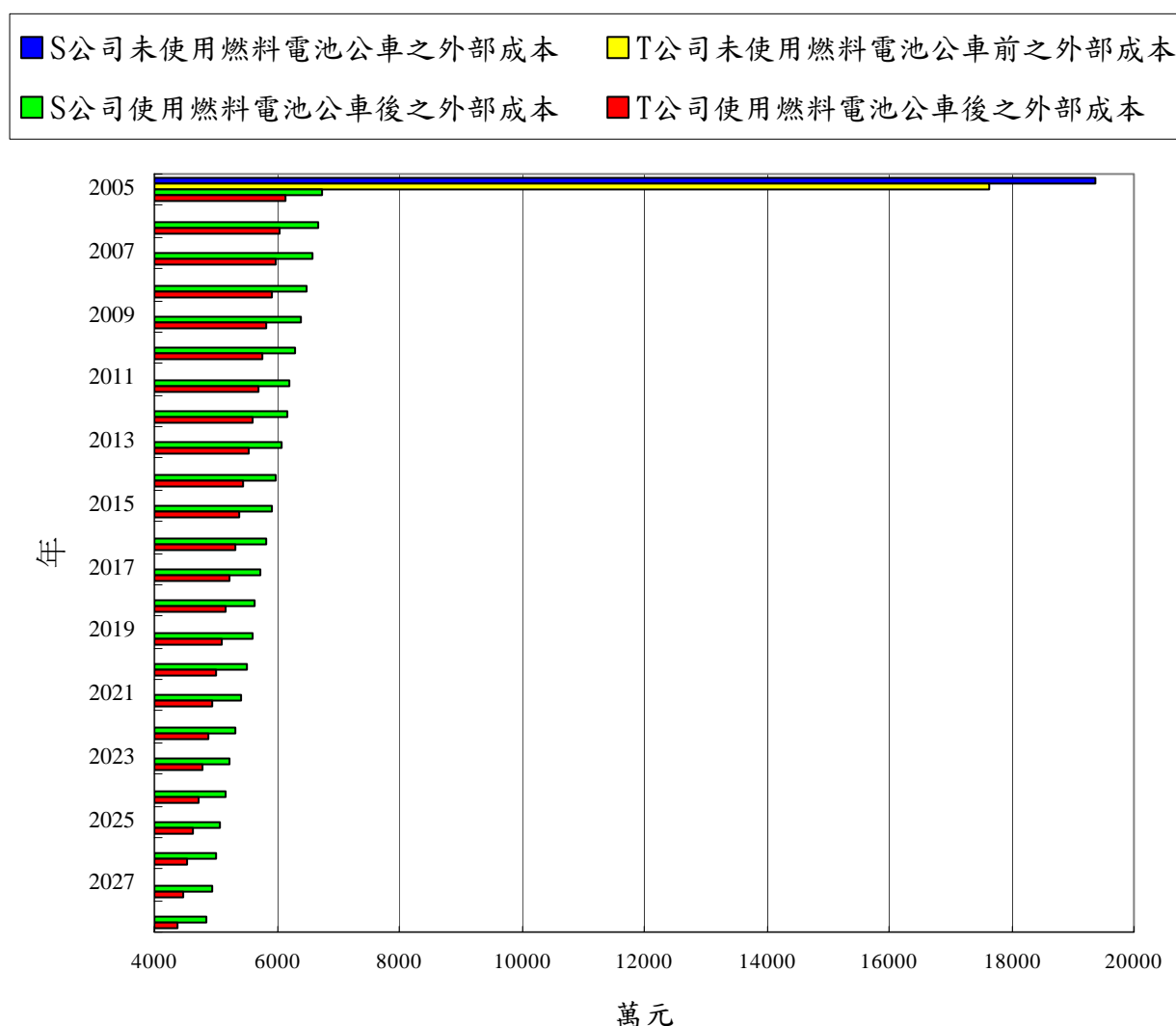


圖 5-17 兩家公司未來對外部成本改善之變化情形

[資料來源：本研究整理]

圖 5-17 為兩家公司未來對外部成本改善之變化情形，由圖可看出，若未採用燃料電池公車營運時，S 公司每年將會產生接近 20000 萬元之外部成本，T 公司每年則會產生接近 18000 萬元之外部成本，然而，業者倘若在 2005 年使用，則 S 公司所造成之外部成本可減少至約 7000 萬元，而 T 公司則可減少至約 6000 萬元，S 公司減少幅度為 65%，T 公司減少幅度則為 67% 左右；若業者於 2021

年使用的話，S 公司造成的外部成本將不到 6000 萬元，T 公司則不到 5000 萬元。
綜言之，使用燃料電池公車將可大量減少的外部成本的支出。

由上述分析可知，隨著時間推移，兩家公司對於整體空氣污染減量情形與能源節約效益將逐年遞增，此結果看似越晚引進燃料電池公車對公車業者與政府部門均越有利；然而，以外部成本之觀點而言，若公車業者至 2021 年才引進使用燃料電池公車，則屆時所累積損失之外部成本將相當可觀，此部份待後續圖 5-23 與圖 5-24 做分析。

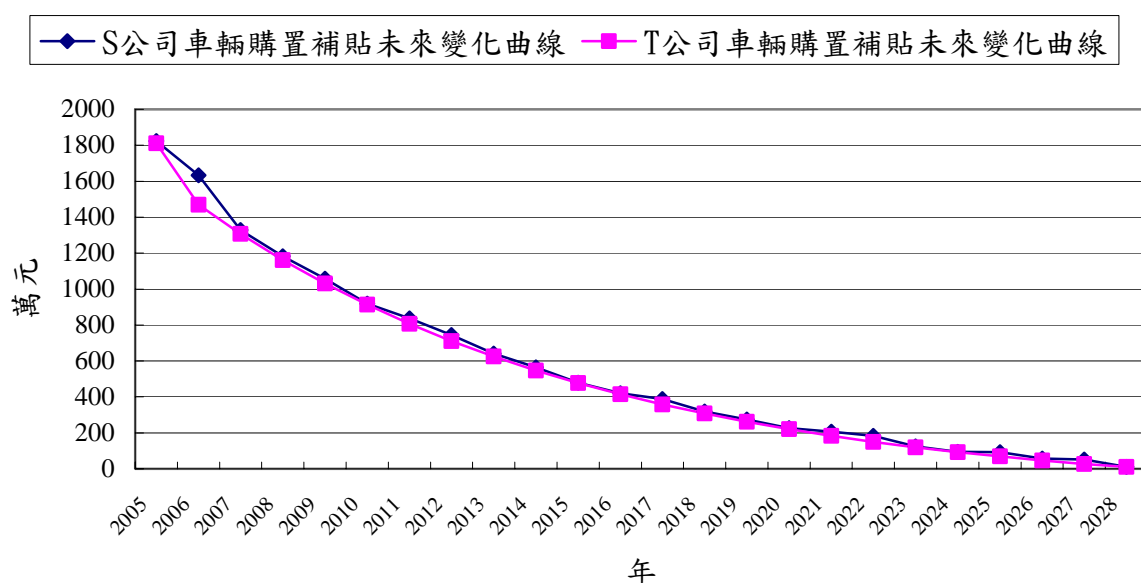


圖 5-18 兩家公司未來購置單位車輛之補貼變化情形

[資料來源：本研究整理]

圖 5-18 為未來單位車輛購置之補貼情形，由圖可知，未來隨著單位燃料電池公車購置成本之下降，政府部門對業者之補貼亦隨之減少，兩家公司之補貼情形差距不大，其中 S 公司之補貼額落在燃油公車與燃料電池公車差價之 50% ~100 % 間不等，而 T 公司之補貼額除了 2005 年之外，其餘均落在限制式之下界，即差價之 50%，補貼額於 2005 年時約 1800 萬元左右，至 2021 年時，政府給予公車業者之補貼額即可減少至約 200 萬元。

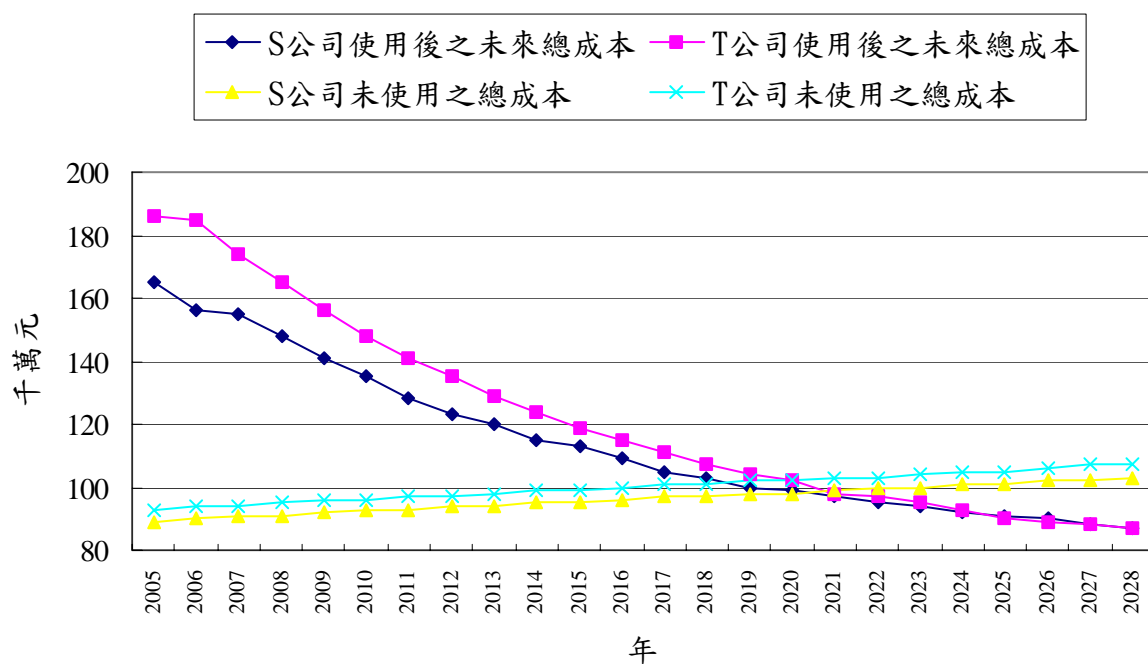


圖 5-19 兩家公司未來使用燃料電池公車與否之總成本變化圖

[資料來源：本研究整理]

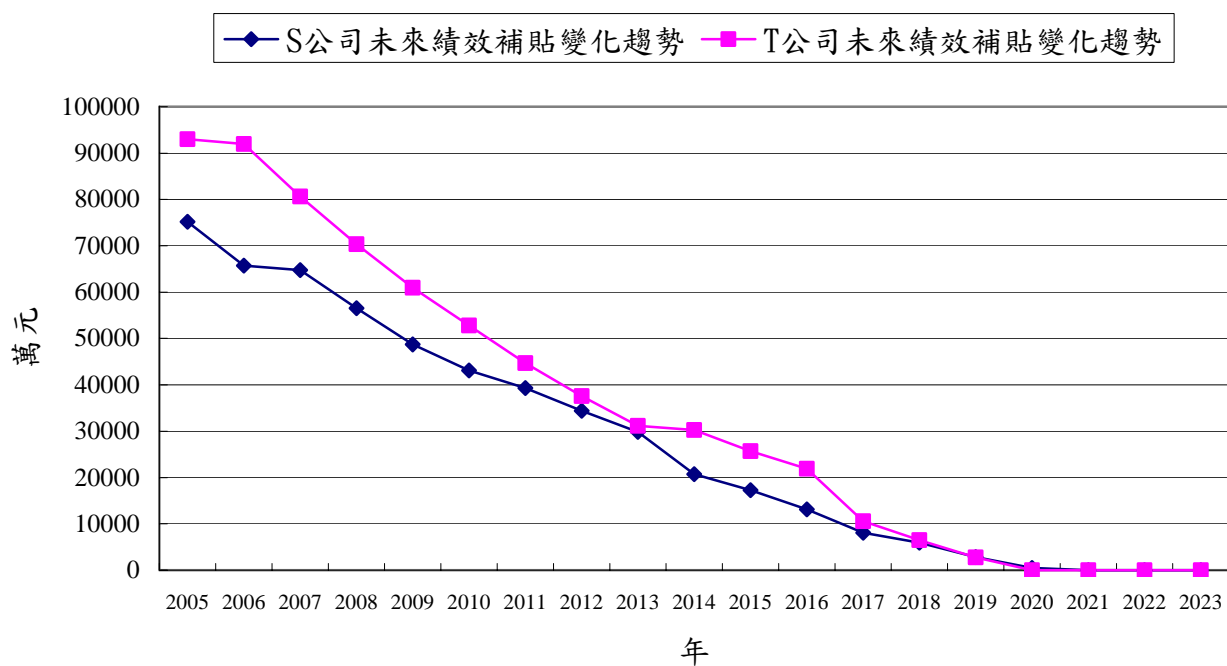


圖 5-20 兩家公司未來空氣污染改善之績效補貼變化情形

[資料來源：本研究整理]

圖 5-19 為業者有使用與未使用燃料電池公車時之總成本差異，由圖可知，兩家業者不管於 2005 年至 2028 年間哪一年使用燃料電池公車，其總成本之變化

均為逐年遞減之趨勢；反之，若業者仍使用燃油公車時，其總成本將逐年提高。對 T 公司而言，兩公車系統之成本於 2019 年時差距最小，於 2020 年時燃油公車系統之總成本與燃料電池公車系統之總成本相當，易言之，若此時業者仍使用燃油公車營運則會相對不利，故此時 T 公司應全面使用燃料電池公車營運；同理，對 S 公司而言，同樣於 2021 年時，其燃油公車系統之總成本將高於燃料電池公車系統之總成本，故此時 S 公司亦應全面使用燃料電池公車營運才較具優勢。而圖 5-20 則為補貼業者在燃料電池公車系統總成本高於燃油公車系統總成本時使用之績效補貼變化情形，即當業者願意於 2021 年前使用燃料電池公車之補貼變化曲線，補貼目的在於彌補兩公車系統總成本之差距，一方面減輕業者營運成本之負擔，另一方面藉以吸引潛在業者之需求。由圖 5-20 亦可看出，隨著兩公車系統間總成本差距逐漸縮小，績效補貼額亦逐年減少，至 2021 年時，因兩家業者之燃油公車系統之總成本已高於燃料電池公車系統，故此時即可停止績效補貼，即對兩家業者之補貼額均為 0。此處需特別說明的是圖 5-20 所示之逐年績效補貼額均為業者於當年引入燃料電池公車時之績效補貼起始值，而非單一業者逐年之多次績效補貼，為深入探討單一業者於某時程採用後之逐年多次績效補貼情形，以下即針對此議題做分析。

表 5-15 至表 5-22 為兩家業者於各年引入燃料電池公車後之後續逐年多次績效補貼列表，表中之總成本區分為未使用燃料電池公車與使用燃料電池公車後之總成本，未使用燃料電池公車之意即為業者仍使用傳統燃油公車。其中，未使用之總成本是透過業者每車公里之營運成本換算而得，因此，其意為使用與燃料電池公車數量相同之燃油公車每年所須負擔之總成本值。

表 5-15 S 公司於 2005 年至 2008 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
未使用之總成本	894600000					
使用後之總成本	1646004000	1432943000	1243518000	1075485000	926544900	772382300
績效補貼	751609500	538342800	348917800	180885300	31944940	0
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
未使用之總成本	900900000					

使用後之總成本	1557830000	1365225000	1193252000	1040673000	905447300	7856668500
績效補貼	657564700	464325200	292352400	139773000	4547250	0
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012
未使用之總成本	907200000					
使用後之總成本	1553808000	1379205000	1222293000	1083006000	959411300	849820300
績效補貼	647779700	472004900	315092600	175806400	52211320	0
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
未使用之總成本	913500000					
使用後之總成本	1477447000	1319688000	1177218000	1050686000	938377600	838811300
績效補貼	565561500	406187800	263718200	137185600	24877640	0

[資料來源：本研究整理]

由表 5-15 可看出，若 S 公司於 2005 年至 2008 年期間引入燃料電池公車後，將可連續五年獲得績效補貼，且補貼額逐年遞減，分別自第六年起，S 公司使用後之總成本已低於未使用之總成本，故自該年起停止補貼。

表 5-16 S 公司於 2009 年至 2012 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2009	2010	2011	2012	2013
未使用之總成本	919800000				
使用後之總成本	1405229000	1262804000	1133423000	1018488000	916495200
績效補貼	487484400	343003700	213622600	98688260	0
年份	2010	2011	2012	2013	2014
未使用之總成本	926100000				
使用後之總成本	1354647000	1226034000	1108373000	1003854000	911024700
績效補貼	431087600	299933600	182272500	77753820	0
年份	2011	2012	2013	2014	2015
未使用之總成本	932400000				
使用後之總成本	1284204000	1168264000	1061529000	966665400	882398500
績效補貼	393124600	235864200	129129200	34265360	0
年份	2012	2013	2014	2015	2016
未使用之總成本	935550000				
使用後之總成本	1231703000	1123402000	1026746000	940814000	864503400
績效補貼	343853500	187852100	91195630	5263964	0

[資料來源：本研究整理]

由表 5-16 可看出，若 S 公司於 2009 年至 2012 年期間引入燃料電池公車後，

可連續四年獲得績效補貼，分別自第五年起，S 公司使用後之總成本已低於未使用之總成本，故自該年起停止補貼。

表 5-17 S 公司於 2013 年至 2015 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2013	2014	2015	2016
未使用之總成本	941850000			
使用後之總成本	1195316000	1097434000	1009322000	931136800
績效補貼	298286800	155583800	67471560	0
年份	2014	2015	2016	2017
未使用之總成本	948150000			
使用後之總成本	1154117000	1065582000	985650600	914485200
績效補貼	207048000	117431700	37500600	0
年份	2015	2016	2017	2018
未使用之總成本	954450000			
使用後之總成本	1125734000	1045935000	973098500	908299300
績效補貼	172927700	91484890	18648500	0

[資料來源：本研究整理]

表 5-17 則為 S 公司於 2013 年至 2015 年期間引入燃料電池公車後之逐年多次補貼情形，與前兩年不同之處在於業者此期間只可連續三年獲得績效補貼，自第四年起，S 公司使用燃料電池公車之總成本已低於未使用之總成本，故自第四年起停止給予補貼。

表 5-18 S 公司於 2016 年至 2019 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2016	2017	2018
未使用之總成本	960750000		
使用後之總成本	1089801000	1017859000	951654200
績效補貼	131187400	57109300	0
年份	2017	2018	2019
未使用之總成本	967050000		
使用後之總成本	1045143000	980395000	920285200
績效補貼	80604670	13344990	0
年份	2018	2019	2020
未使用之總成本	973350000		
使用後之總成本	1030106000	971746800	916908600
績效補貼	59726050	0	0
年份	2019	2020	2021
未使用之總成本	976500000		
使用後之總成本	1004287000	948749400	901278800
績效補貼	28037160	0	0

[資料來源：本研究整理]

表 5-18 為 S 公司於 2016 年至 2019 年期間引入燃料電池公車後之逐年多次補貼情形，情形與前幾年引入燃料電池公車時之情況差不多，其中，S 公司於 2016 年至 2017 年期間引入燃料電池公車後，可連續兩年獲得績效補貼，自第三年起，S 公司使用燃料電池公車後之總成本已低於未使用之總成本，故自第三年起停止給予補貼；此外，於 2018 年至 2019 年期間引入燃料電池公車時，則僅獲得一次績效補貼，同理，自第二年起，S 公司使用燃料電池公車後之總成本已低於未使用之總成本，故自第二年起停止給予補貼。而表 5-19 至表 5-22 則為 T 公司各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼情形。

表 5-19 T 公司於 2005 年至 2008 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼

單位：元

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
未使用之總成本	930528000					
使用後之總成本	1859735000	1592195000	1353671000	1142173000	954793300	767073200
績效補貼	929862000	661667500	423143300	211645100	24265250	0
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011
未使用之總成本	938304000					
使用後之總成本	1855606000	1615043000	1397196000	1203880000	1032497000	880650100
績效補貼	919711300	676739200	458892300	265576200	94193270	0
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012
未使用之總成本	943488000					
使用後之總成本	1748568000	1528882000	1331408000	1156180000	1000767000	863037100
績效補貼	806518900	585394300	387920300	212691600	57278610	0
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013
未使用之總成本	948672000					
使用後之總成本	1651742000	1451015000	1272028000	1113137000	972183400	847278000
績效補貼	703830600	502343300	323355600	164465400	23511420	0

[資料來源：本研究整理]

表 5-20 T 公司於 2009 年至 2012 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2009	2010	2011	2012	2013
未使用之總成本	956448000				
使用後之總成本	1564175000	1384447000	1221717000	1077228000	949059200
績效補貼	609828600	427999100	265269300	120779600	0
年份	2010	2011	2012	2013	2014
未使用之總成本	961632000				
使用後之總成本	1484993000	1320747000	1173178000	1042161000	925879000
績效補貼	527832600	359114900	211546200	80529210	0
年份	2011	2012	2013	2014	2015
未使用之總成本	966816000				
使用後之總成本	1413427000	1263229000	1129428000	1010570000	905049000
績效補貼	446875400	296412700	162611900	43753920	0
年份	2012	2013	2014	2015	2016
未使用之總成本	974592000				
使用後之總成本	1348842000	1214576000	1092877000	984739400	888748600
績效補貼	376146500	239983900	118285200	10147380	0

[資料來源：本研究整理]

表 5-21 T 公司於 2013 年至 2015 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2013	2014	2015	2016
未使用之總成本	979776000			
使用後之總成本	1290508000	1167631000	1057212000	959111100
績效補貼	311713200	187854600	77436380	0
年份	2014	2015	2016	2017
未使用之總成本	987552000			
使用後之總成本	1238047000	1128248000	1027821000	938489800
績效補貼	302952000	140695800	40269100	0
年份	2015	2016	2017	2018
未使用之總成本	992736000			
使用後之總成本	1190437000	1090013000	998813000	917738500
績效補貼	257072300	97276840	6077018	0

[資料來源：本研究整理]

表 5-22 T 公司於 2016 年至 2019 年引入燃料電池公車之逐年多次績效補貼 單位：元

年份	2016	2017	2018
未使用之總成本	997920000		
使用後之總成本	1147624000	1055527000	972762600
績效補貼	218812600	57606650	0
年份	2017	2018	2019
未使用之總成本	1005696000		
使用後之總成本	1109127000	1027160000	951799400
績效補貼	105851500	21464310	0
年份	2018	2019	2020
未使用之總成本	1010880000		
使用後之總成本	1074450000	999180700	930716400
績效補貼	65067700	0	0
年份	2019	2020	2021
未使用之總成本	1016064000		
使用後之總成本	1043273000	974029200	913903200
績效補貼	27771140	0	0

[資料來源：本研究整理]

此外，圖 5-21 與圖 5-22 則分別為兩家公司未來各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼曲線圖，由圖可明顯看出，不論自哪個時程引入燃料電池公車，補貼額均逐年減少，且愈晚引入燃料電池公車，可獲得之績效補貼次數愈少，大體而言，自 2021 年之後引入燃料電池公車者，因使用後之總成本已低於未使用之總成本，故不給予補貼。

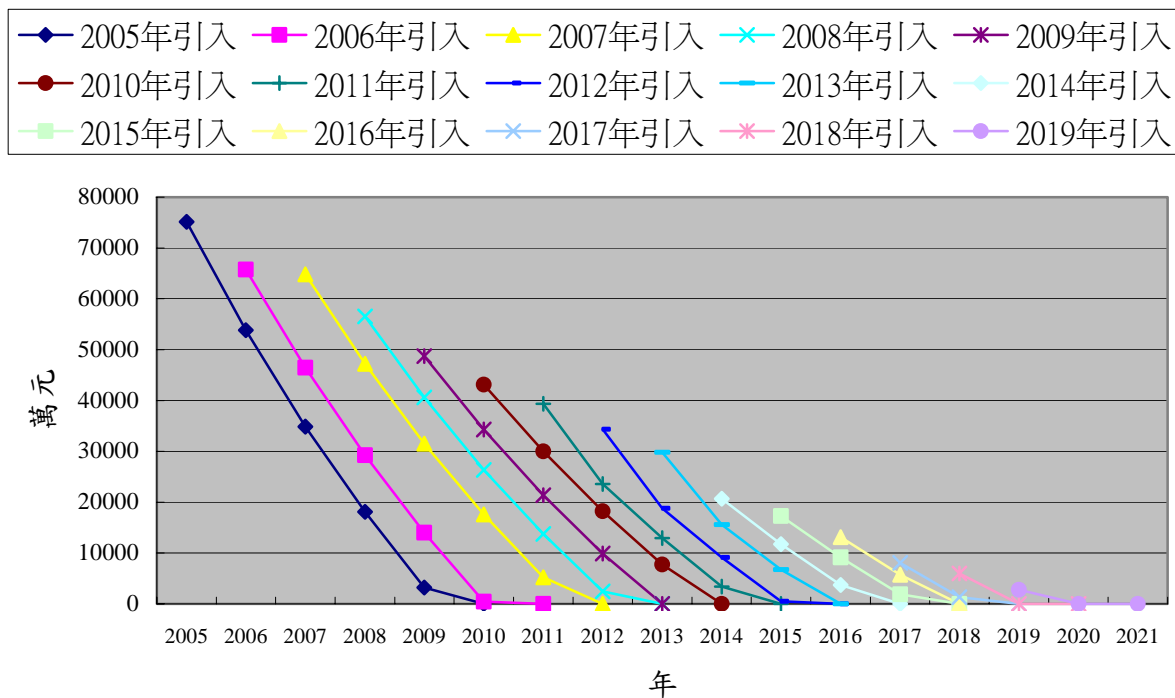


圖 5-21 S 公司未來各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼情形

[資料來源：本研究整理]

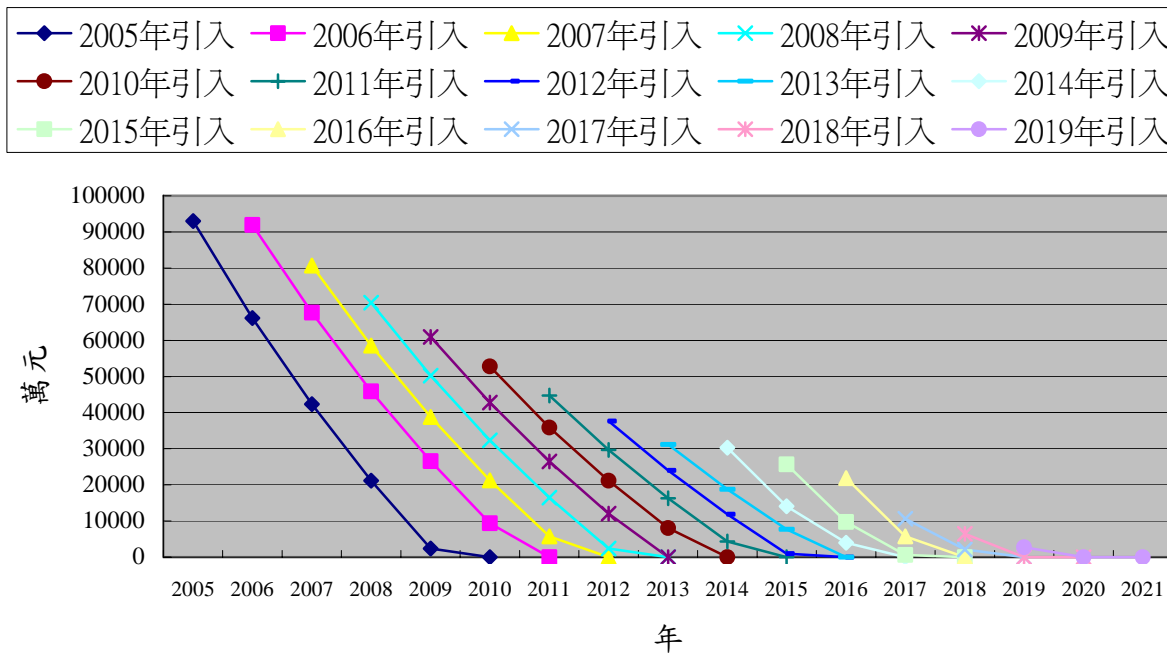


圖 5-22 T 公司未來各年引入燃料電池公車後之逐年多次績效補貼情形

[資料來源：本研究整理]

由以上分析可知，隨著時間推移，不但燃料電池公車系統總成本將可逐年降低，甚至到 2021 年時，燃料電池公車系統總成本已降至與燃油公車系統總成本

相當，此時已不需仰賴政府的補貼公車業者即可自行採用；此外，公車業者越晚使用燃料電池公車則政府部門補貼額將越少，將可為政府節省不少財政預算；綜上，以上結果看似越晚引進燃料電池公車對公車業者與政府部門均越有利，然而，以外部成本之觀點而言，如圖 5-23 所示，若以兩家公司公車業者原始燃油公車總營運量，配合一般空氣污染物與二氧化碳的排放量以及其單位外部成本進行換算，若公車業者至 2021 年才使用燃料電池公車，則從 2005 年至 2021 年期間將累積損失共約 62 億元的外部成本，此對整個社會而言無疑不是一大損失；反之，若自 2005 年即引入燃料電池公車的話，以該年兩家公司公車業者使用燃料電池公車之總量進行換算時，至 2021 年，外部成本之累積損失將可降至約 22 億元，對整個社會而言，約可節省 65% 無謂之付出；此外，以整個社會付出的成本觀之，若將政府此期間累積補貼納入考量時，則 2005 年至 2021 年期間整個社會所付出之成本雖高於未使用燃料電池公車時所累積之外部成本，但至 2021 年後，使用燃料電池公車所付出之社會成本將低於未使用燃料電池公車時的社會成本，換言之，至 2021 年時，政府補貼公車業者使用燃料電池公車之效益方能收到成效，並自該年起，成本效益越顯成效，如圖 5-24 所示；因此，政府部門應及早鼓勵公車業者使用燃料電池公車，一方面可加速現有燃油公車逐漸燃料電池化，另一方面可節省許多社會成本的損失，此對整個社會而言才是有正面助益的。

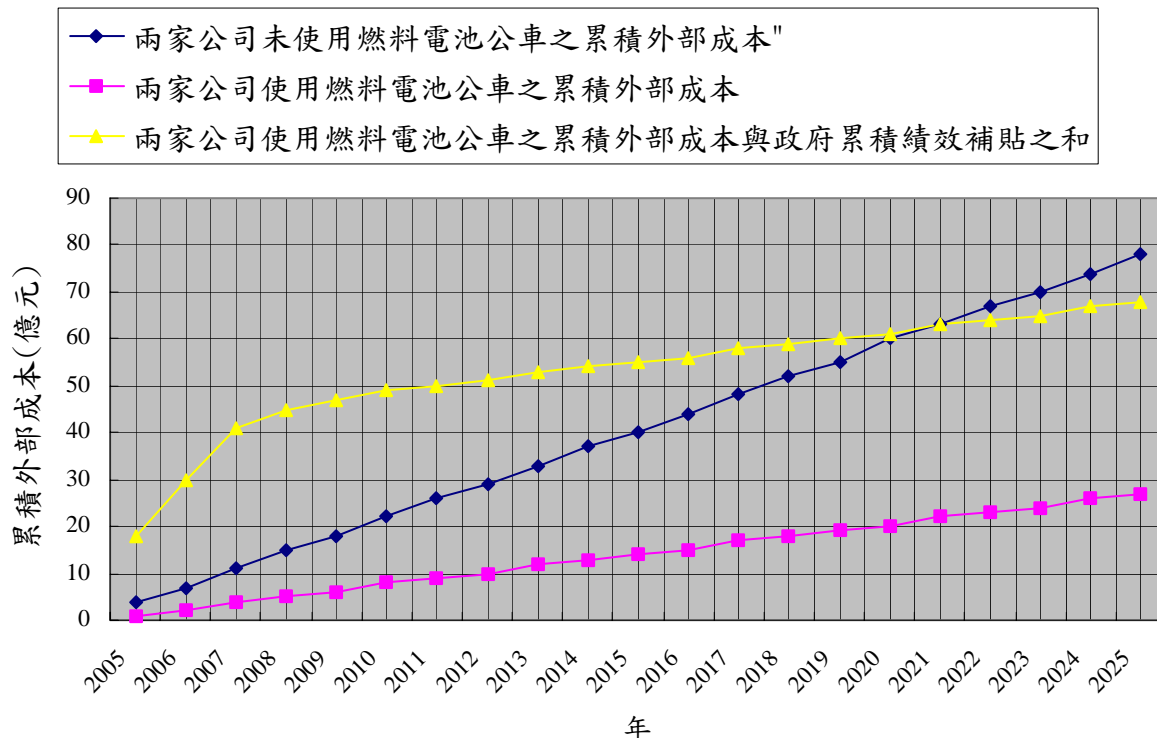


圖 5-23 兩家公司於 2005 年使用燃料電池公車與否所造成之累積外部成本

[資料來源：本研究整理]

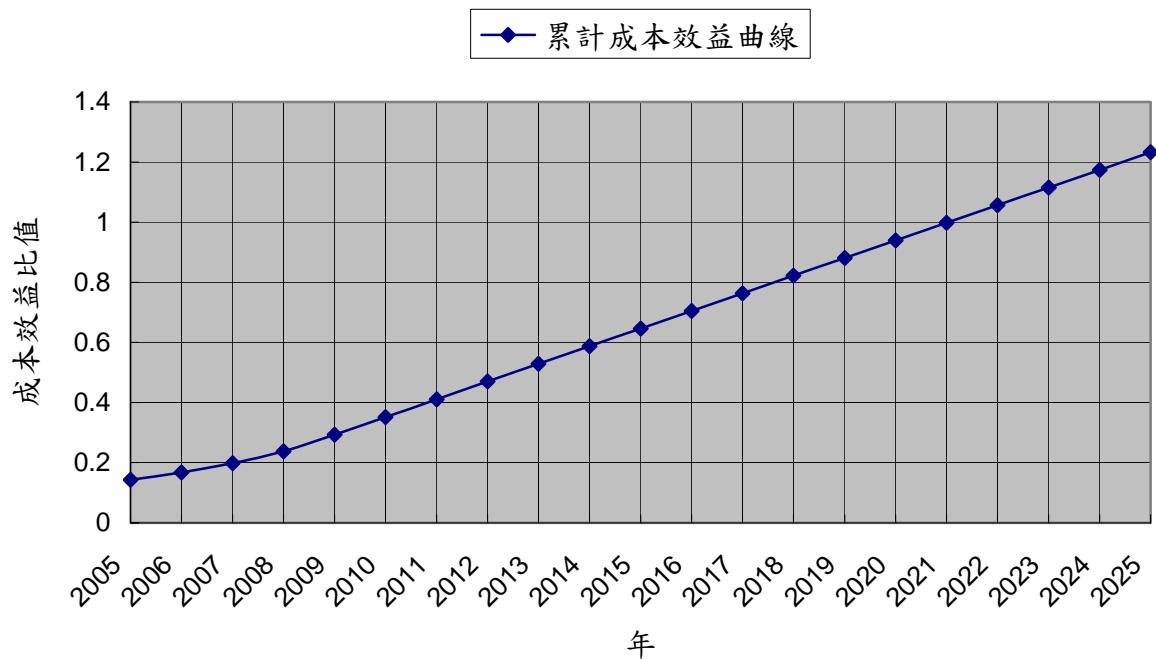


圖 5-24 兩家公司於 2005 年使用燃料電池公車後之累積成本效益曲線變化圖

[資料來源：本研究整理]

圖 5-25 為外部成本改善之成本效益，此處之成本效益比值為改善空氣污染所節省之外部成本除上政府部門給予業者績效補貼之花費。由圖可知，若業者於 2005 年引入時，其外部成本改善之成本效益約只有 0.1 左右，但 S 公司若於 2016 年引入時，其外部成本改善之成本效益比值已相當接近 1，而 T 公司亦於 2017 年引入的話，其外部成本改善之成本效益比值亦超過 1。綜言之，為推廣高成本之環保性運具，初期之投資報酬率可能較不具成本效益，即達不到成本效益為 1 之預期目標，但透過政府部門相關之補貼機制，經過一段時間後，方能達到預期的目標，至 2019 年時，外部成本改善之成本效益比值已超過 4.5，此時已具有相當程度之效益。

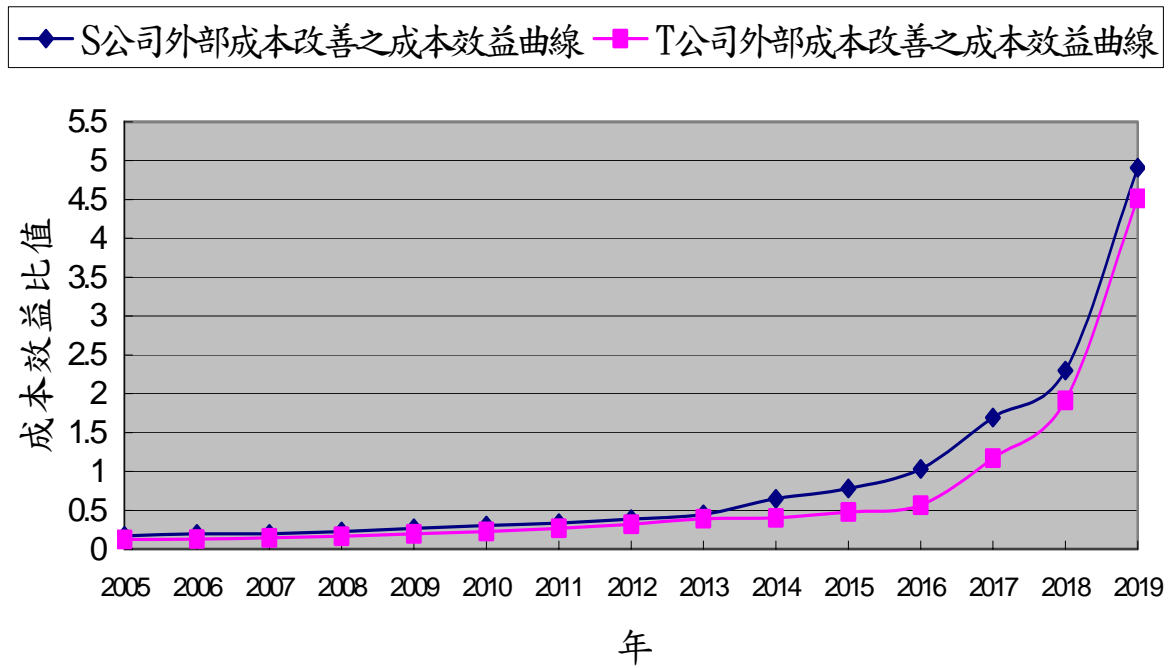


圖 5-25 外部成本改善之成本效益曲線圖

[資料來源：本研究整理]

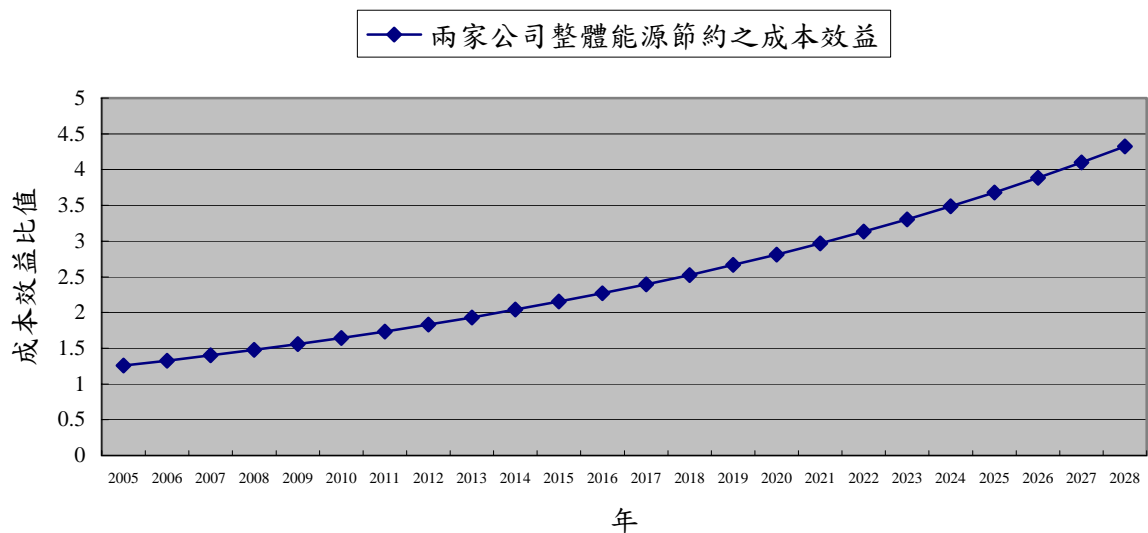


圖 5-26 兩家公司對於能源節約之成本效益曲線圖

[資料來源：本研究整理]

圖 5-26 為兩家公司對能源節約之成本效益，其成本效益比值主要係以能源節約效益除上氫能成本。如圖所示，若業者於 2005 年引入時，該年即具有能源節約之成本效益，若至 2016 年引入，則其成本效益比值將介於 1~1.5 之間，簡言之，自 2005 年起，往後各年能源節約之成本效益將逐漸增加，其主要原因有二：其一，如前所述，因燃油價格未來將逐漸攀升，而氫能價格將逐年下降，一來一往間將使氫能成本愈小，而能源節約效益愈大，進而使能源節約之成本效益

比值愈大；其二為氫能之能源效率高於燃油之能源效率，使所需之氫能總量少於原有所需之燃油總量，綜合以上兩個關鍵因素將使得能源節約成本效益比值愈來愈大。

第六章、結論與建議

6.1 結論

本研究探討燃料電池公車成本結構與市場潛力，同時考量公車業者使用成本與需求行為，並分析變數間之相互影響關係；此外，將政府改善空氣污染之政策目標納入考量，藉由提供公車業者資本補貼與改善空氣污染之績效補貼縮短現有燃油公車系統與燃料電池公車系統間之成本差距，以增加公車業者之採用意願，同時刺激潛在需求。本研究以解析性之方法分別構建公車業者成本模式與需求模式，並以數學規劃法建立補貼規劃模式，進而進行供需互動求解。於需求面上，對影響公車業者使用燃料電池公車之變數進行探討，並分析其影響程度；於成本面上，針對公車業者考慮使用燃料電池公車所關心之核心成本進行探討。最後同時考量公車業者需求與成本間之關係，並將政府部門補貼之預算限制納入考量，構建數學規劃模式，以分析政府部門之補貼多寡與公車業者之使用量。茲將本研究之結論與建議歸納如下：

1. 本研究構建之補貼規劃模式，可反應政府部門補貼多寡對公車業者使用意願之影響，過去文獻在大眾運輸補貼之議題方面多探討公車業者之虧損補貼，本研究則探討車輛購置與供應站設置之資本補貼與空氣污染改善之績效補貼，同時將過去以每車公里之補貼方式轉換為每車公里空氣污染改善之績效補貼，並建立一套綜合考量兩公車系統總成本差距與空氣污染改善成效之補貼機制。
2. 在業者願意使用燃料電池公車之條件下，據以推估一般空氣污染物與二氧化碳之減量情形，並估計其可帶來之效益；此外，透過燃料電池公車之使用反推石油能源之節約量，並根據本研究 3.4 小節油價未來之預測值，進一步計算能源節約效益。本研究範例結果顯示，當公車業者未來可能使用量愈多，空氣污染之減量成效愈彰，能源節約效益亦隨之愈大。
3. 未來隨著單位燃料電池公車購置成本之下降，政府部門對業者之補貼亦隨之減少。在本研究範例分析中，兩家公司之補貼情形差距不大，其中 S 公司之補貼額落在燃油公車與燃料電池公車差價之 50%~100% 間不等，而 T 公司之

補貼額除了 2005 年之外，其餘均落在限制式之下界，即差價之 50% ，補貼額於 2005 年時約 1800 萬元左右，至 2021 年時，政府給予公車業者之補貼額約 200 萬元。

4. 在本研究範例分析中，整體而言，隨著未來燃油價格、氫能價格與燃料電池車輛成本逐年變化之情形下，約自 2021 年起，燃料電池公車系統相對於燃油公車系統已開始具有競爭力。
5. 在本研究範例分析中，公車業者於各時程採用後之逐年多次績效補貼情況不盡相同，大體而言，績效補貼之補貼額逐年減少，且越晚採用補貼次數越少，至 2021 年起，因燃料電池公車系統之總成本低於燃油公車系統總成本，故自該年起停止實施績效補貼。
6. 本研究於外部成本改善之成本效益分析中，改善空氣污染之績效補貼初期較不具效益，其成本效益比值約為 0.1 左右，為推廣高成本之環保性運具，初期之投資報酬率可能較不具成本效益，即達不到成本效益為 1 之預期目標，但透過政府部門相關之補貼機制，經過一段時間後，方能達到預期的目標。本研究範例分析中，S 公司於 2016 年引入時，其外部成本改善之成本效益比值已相當接近 1，而 T 公司於 2017 年引入的話，其外部成本改善之成本效益比值亦超過 1，至 2019 年時，外部成本改善之成本效益比值皆已超過 4.5，此時已具有相當程度之效益，此顯示政府部門補貼公車業者之投資報酬具時間性，其成本效益之才會逐漸彰顯。

6.2 建議

1. 本研究中之氫能供應站之設置是以每家公車業者自行設置為考量，但因其設置成本很高，因此若考慮到燃料電池公車初期引入運輸市場時，業者需求量尚在少量階段，可建議其設置之方式為多家業者共用之氫能供應站，以分攤其設置成本，使其具有規模經濟之效果，並可提升其使用效率，待日後業者需求量逐漸增加時，可視增加情形逐步增設，或未來業者使用量增加至某一程度時，則亦可考慮各家業者自行設置。
2. 本研究之政府部門補貼財源係根據中央政府之相關補貼預算進行合理之假設，但考量到燃料電池研發技術目前尚未臻於成熟階段且仍處於高成本狀

態，故政府部門編列之大眾運輸補貼財源可能有限，因此未來若欲推廣燃料電池運具時，補貼財源可考慮將其他政府單位之相關預算納入，如環保署的空氣污染防治費等，以增加政府本身之補貼預算。

3. 在補貼規劃模式中，本研究採固定比例做分析，車輛購置成本之補貼比例固定限制在兩公車系統差價之 50%~100%，氢能供應站之設置成本則是全額的 50%~100%，而未來隨著燃料電池研發技術之逐漸進步與成本之逐漸降低，補貼之比例可視燃料電池相關成本之變化情況做適度之調整，如燃料電池公車系統與燃油公車系統成本差距不大時，可考慮以低比例之方式之補貼，甚或不用補貼。
4. 本研究因囿於時間與金錢上之限制，需求模式中之參數是參考文獻所校估的結果，並沒有針對公車業者進行實際問卷訪查，故後續研究可針對此部份加以補強，使研究結果更貼近實際狀況。

參考文獻

1. 工業技術研究院，「我國燃料電池發展策略研究與分析」，民國 91 年。
2. 工業技術研究院，「小型車輛用之新能源動力系統研究」，民國 91 年。
3. 中華大學管理學院，「新竹市低污染公車營運研究計畫」，新竹市環境保護局，民國 89 年。
4. 中華民國環境工程學會，「永續發展導論」，中華民國環境工程學會，民國 87 年。
5. 王小娥、黃泰林、陳垂彥，「兩岸海運直航貨運量預測與分佈之研究」，中華民國運輸學會，第十三屆論文研討會，民國 87 年。
6. 左峻德，「燃料電池之特性與運用兼論台灣燃料電池產業之發展」，行政院國家科學委員會科學技術資料中心，民國 90 年。
7. 交通部運輸研究所，「電動公共汽車技術調查及其做為都市運輸工具可行性研究」，交通部運輸研究所，民國 87 年。
8. 交通部運輸研究所，「低污染公車營運技術評估及其應用之研究」，交通部運輸研究所，民國 89 年。
9. 交通部運輸研究所，「運輸部門節約能源及減少溫室氣體排放之規劃研究」，交通部運輸研究所，民國 90 年。
10. 交通部運輸研究所，「公路汽車客運業營運虧損補貼計畫之效益分析」，交通部運輸研究所，民國 92 年。
11. 李瑛，王林山，「燃料電池」，北京冶金工業出版社，民國 89 年。
12. 李明彥，「營運虧損補貼對台北市聯營公車成本與生產力影響之研究」，淡江大學運輸管理研究所碩士論文，民國 89 年。
13. 林政剛，「空氣污染」，高立圖書有限公司，民國 84 年。
14. 林佳宜，「大眾運輸補貼分配制度之研究」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 85 年。
15. 周文生、曾群明，「品牌計程車服務品質評鑑指標擷取之研究」，運輸計劃季刊，第二十九卷，第一期，33-52 頁，民國 89 年。
16. 唐富藏、張國平，「運輸業統計成本函數之研究」，運輸計劃季刊，第九卷，第三期，269-292 頁，民國 69 年。
17. 高志勇，「我國燃料電池發展策略研究與分析」，工研院產業經濟與資訊服務中心，民國 91 年。
18. 陳榮輝，「規模經濟、旅行成本與都會設施規模之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，民國 80 年。
19. 陳俊宏，「公路汽車客運業補貼前後成本效率與服務效果之比較」，交通大學交通運輸研究所碩士論文，民國 88 年。
20. 陳菀蕙、蔡佳佳、高桂娟、游智銘、盧香君，「低污染公車引進之空氣污染減量經濟效益分析」，中華民國運輸學會，第十八屆論文研討會，民國 92 年。
21. 許卜仁，「永續運輸指標與策略之整合模式」，國立交通大學交通運輸研究所碩士論文，

民國 92 年。

22. 許巧鶯、江慧儀、白仁德，「消費者電子購物與傳統購物選擇行為分析」，運輸計劃季刊，第二十七卷，第三期，435-464 頁，民國 87 年。
23. 程玉萍，「大眾運輸補貼評估模式之研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 87 年。
24. 黃正義，「空氣污染污源與防治」，淑馨出版社，民國 80 年。
25. 黃泰林、王小娥、鄭仲凱、陳垂彥，「應用灰色理論於境外航運中心貨物運輸需求之研究」，中華民國運輸學會，第十三屆論文研討會，民國 87 年。
26. 張有恆，「大眾運輸系統之設計與營運管理」，黎明文化事業股份有限公司，民國 79 年。
27. 張有恆、萬宜灼，「航空公司經營管理對飛航安全水準之影響」，民航季刊，第三卷，第一期，頁 81-106，民國 90 年。
28. 馮正民、王榮祖，「應用灰色關聯分析於航空運輸業營運與財務績效代表性指標之擷取」，民航季刊，第三卷，第一期，頁 107-126，民國 90 年。
29. 程玉萍，「大眾運輸補貼評估模式之研究」，台灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 87 年。
30. 溫坤禮、黃宜豐、陳繁雄、李元秉、連志峰、賴家瑞，「灰預測原理與應用」，全華科技圖書股份有限公司，民國 91 年。
31. 楊家驊，「台北市公車營運分析和改進建言」，台北市政府交通局，民國 77 年。
32. 楊庸昇，「台南都會區大眾運輸技術選擇之研究—兼論輕軌運輸系統之適用性」，國立成功大學交通管理科學研究所碩士論文，民國 88 年。
33. 經濟部能源委員會，「九十一年經濟部能源委員會年報」，民國 92 年。
34. 經濟部能源委員會，「能源政策白皮書」，民國 87 年。
35. 蔡宜兼，「運銷設施配置與市場範圍之研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，民國 83 年。
36. 蔣敏玲，「網路購物商品之配送策略研究」，國立交通大學運輸工程與管理研究所碩士論文，民國 88 年。
37. 薛乃嘉，「燃料電池運具之燃料供應站配置密度與市場範圍之研究」，國立交通大學運輸科技與管理研究所碩士論文，民國 92 年。
38. Amos, W. A., "Costs of Storing and Transporting Hydrogen," U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, 1998.
39. Berechman, J. and Genevieve, G., "Analysis of the Cost Structure of an Urban Bus Transit Property," *Transportation Research*, Vol. 18B, No. 4/5, pp. 273-287, 1984.
40. Bly, P. H. and Oldfield, R. H., "An Analytic Assessment of Subsidies to Bus Services," *Transportation Science*, Vol. 20, No. 3, pp.200-212, 1986.
41. Brownstone, D., Bunch, D.S. and Train, K., "Joint Mixed Logit Models of Stated and Revealed Preferences for Alternative-Fuel Vehicles," *Transportation Research Part B*, Vol. 34, pp. 315-338, 2000.
42. Brodrick, C. J., Lipman, T. E., Farshchi, M., Lutesey, N. P., Dwyer, H. A., Sperling, D.,

- Gouse, S. W., Harris, D. B. and King, F. G., "Evaluation of Fuel Cell Auxiliary Power Units for Heavy-Duty Diesel Trucks," *Transportation Research Part D*, Vol. 7, pp. 303-315, 2002.
43. Battelle, K. C. and Eudy, L., "ThunderPower Bus Evaluation at SunLine Transit Agency," U.S. Department of Energy Transit Bus Evaluation Project, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
 44. Chan, S. H., Su, A. and Weng, F. B., "An Overview and Future Prospects of Taiwan's Fuel Cell Development," *International Fuel Cell Symposium, Taipei*. 2001.
 45. Calfee, J. E., "Estimating The Demand for Electric Automobiles Using Fully Disaggregated Probabilistic Choice Analysis," *Transportation Research Part B*, Vol. 19, pp. 287-301. 1985.
 46. Contadini, J. F., "Social Cost Comparison among Fuel Cell Vehicle Alternatives," *Institute of Transportation Studies-UCDavis*, 2002.
 47. Daganzo, C. F., *Logistics System Analysis*, Spring-Verlag Press, Berlin, Heidelberg, 1991.
 48. Delucchi, M. A. and Lipman, T. E., "An Analysis of The Retail and Lifecycle Cost of Battery-Powered Electric Vehicle," *Transportation Research Part D*, Vol. 6, pp. 371-404. 2001.
 49. Eilon, S., Watson-Grandy, C. D. T. and Chrsitofides, N., *Distribution Management: Mathematical Modelling and Practical Analysis*, Hafner, New York, N. Y., 1971.
 50. Ekdunge, P. and Råerg, M., "The Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use, Emission and Cost," *International Association for Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 5, pp. 381-385, 1998.
 51. Folkesson, A., Anderson, C., Alvfors, P., AlakÜla, M. and Overgaard, L., "Real Life Testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus," *Journal of Power Sources*, Vol. 118, pp. 349-357, 2003.
 52. Frankena, M. W., "The Efficiency of Public Transportation Objectives and Subsidy Formulas," *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 17, No. 1, pp.67-76, 1983.
 53. Greene, D. L. and Wegener, M., "Sustainable Transport," *Journal of Transport Geography*, Vol. 5, No. 3, pp. 177-190, 1997.
 54. HÖrmandinger, G. and Lucas, N. J. D., "Is Clean Enough? The Influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel Cells in Transport," *Transportation Research Part D*, Vol. 1, No. 1, pp. 63-78, 1996.
 55. Hsu, C. I. and Tsai, I. J., "Logistics Cost, Consumer Demand, and Retail Establishment Density," *Papers in Regional Science*, Vol. 78, No. 3, pp. 243-264, 1999.
 56. Hsu, C. I. and Wen, Y. H., "Application of Grey theory and multiobjective programming towards airline network design," *European Journal of Operational Research*, Vol 127, No 1, pp. 44-68, 2000.
 57. Imperial College Centre for Energy Policy and Technology and United Nations Environment Programme, "Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies Final Report," 2002.

58. Kauffman, M., "Electrolysis Development and Hydrogen Infrastructure," *U.S. Department of Energy*, 2003.
59. Matheny, M. S., Erickson, P. A., Niezrecki, C. and Roan, V. P., "Interior and Exterior Noise Emitted by a Fuel Cell Transit Bus," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 5, pp. 937-943, 2002.
60. Ogden, J., Sperling, D., Lipman, T., and Miller, M., "A Near-term Economic Analysis of Hydrogen Fueling Stations," Office of Graduate Studies, Department of Transportation Technology and policy, University of California at Davis, 2005.
61. Padró, C. E. G. and Putsche V., "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies," U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
62. Santarelli, M. G. L., Calì, M. and Bertonasco, A., "Different Fuelling Technologies for Urban Transport Bus Service in an Italian Big Town : Economic, Environmental and Social Considerations," *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 14, pp. 2353-2370, 2003.
63. Sperling, D., "FreedomCAR and Fuel Cell : Toward the Hydrogen Economy?," PPI, Policy Report, January 22, 2003.
64. Talley, W. K., "An Economic Theory of the Public Transit Firm," *Transportation Research B*, Vol. 22B, No. 1, pp. 45-54, 1988.
65. Whitelegg, J., "Transport for a Sustainable Future : The Case of Europe," Belhaven Press, London, 1993.