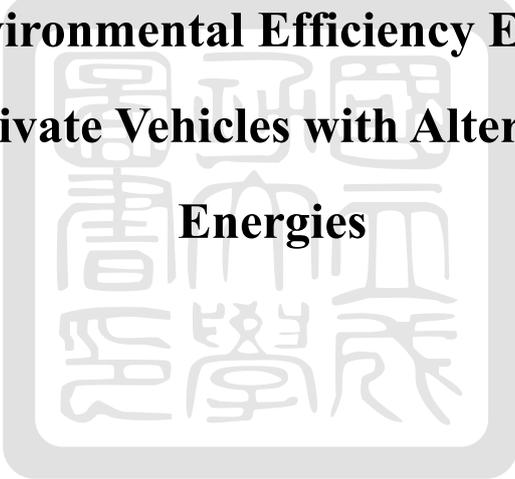


國立成功大學
交通管理科學系碩士班
碩士論文

替代能源應用於私有運具之環境效益評估

**The Environmental Efficiency Evaluation
of Private Vehicles with Alternative
Energies**



研究生：吳怡蓁

指導教授：張瀨之 博士

中華民國一百零九年六月

國立成功大學

碩士論文

替代能源應用於私有運具之環境效益評估
The Environmental Efficiency Evaluation of
Private Vehicles with Alternative Energies

研究生：吳怡蓁

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：
謝金厚
沈宗緯

指導教授：張靜之

系(所)主管：陳勁甫

中華民國 109 年 6 月 5 日

摘要

近年來臺灣私有運具之使用加劇了溫室效應與空氣汙染，造成環境衝擊及影響到人類健康。本研究以臺灣私有運具能源面為研究對象，探討替代能源(風力發電、水力發電、太陽能發電與氫能)及傳統能源(能源火力燃煤發電、天然氣發電與汽油)生命週期碳足跡溫室氣體排放，藉此提出減排策略，評估若實施減排策略後，臺灣 2030 年及 2050 年溫室氣體及細懸浮微粒(PM_{2.5})是否能落實《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範。最後探討隨著替代能源比例提升，運用失能調整生命年(Disability Adjusted Life Year)為換算外部環境健康成本單位基礎，藉以判斷因細懸浮微粒(PM_{2.5})所造成的失能調整生命年，以瞭解私有運具外部環境健康成本改善幅度。

研究結果顯示，替代能源中以風能排放最低其次分別為水力發電、氫能與太陽能；傳統能源以火力燃煤發電排放最高，其次為天然氣與汽油。2030 年使用 30%低排放車輛取代汽油車及使用 35%替代能源與 65%傳統能源，溫室氣體排放量比 2005 年(BAU2005)減少 607.99 萬公噸(約 21%)。PM_{2.5} 排放量比 2005 年(BAU2005)減少 403.72 公噸(約 28%)，外部環境健康成本比基礎情境(BAU2030)改善 188.79DALY(約 22%)，亦及 188.79 個失能調整生命年。2050 年使用 60%低排放車輛取代汽油車及使用 86%替代能源與 14%傳統能源，溫室氣體排放量比 2005 年(BAU2005)減少 1804.28 萬公噸(約 61%)。PM_{2.5} 排放量比 2005 年(BAU2005)減少 865.42 公噸(約 59%)，外部環境健康成本比基礎情境(BAU2050)改善 447.31DALY(約 55%)，亦即 447.31 個失能調整生命年。總結研究結果，臺灣私有運具未來若能以替代能源取代傳統能源，將能夠大幅減少臺灣全球暖化及空氣汙染，進而提升臺灣人民之健康品質。

關鍵字：替代能源、生命週期評估法(LCA)、私有運具、溫室氣體、細懸浮
微粒(PM_{2.5})、外部環境健康成本



The Environmental Efficiency Evaluation of Private Vehicles with Alternative Energies

Yi-Jou Wu

Ching-Chih Chang

Department of Transportation and Communication Management Science

SUMMARY

This study examines the life cycle carbon footprint of greenhouse gases and PM_{2.5} emissions of alternative energies (wind power, hydropower, solar energy, and hydrogen energy) and of traditional energies (coal-fired power, natural gas, and gasoline) and proposes mitigation strategies to reduce global warming and the air pollution caused by Taiwan's private vehicles. The study then assesses the degree to which emissions are reduced if the goals of Taiwan's the Intended Nationally Determined Contribution and the Greenhouse Gas Reduction and Management Act mitigation strategies are met by 2030 and 2050. Finally, the study explores the external environmental health costs of the private vehicle (based on Disability-Adjusted Life Year) and the degree to which improvements occur.

Results show that wind power has the lowest level of greenhouse gas emissions and coal-fired power has the highest. The mitigation strategy for 2030 means that low-emission vehicles will replace 30% of gasoline vehicles, and using 35% of alternative energies and 65% of traditional energies; GHG emissions and PM_{2.5} will decrease by 6,079,900 tons and 403.72 tons compared to 2005; and external environmental health costs will improve by 188.79 DALY compared with BAU2030. In 2050, low-emissions vehicles will replace 60% of gasoline vehicles; 86% of traditional energy will replace alternative energy; GHG and PM_{2.5} emissions will decrease by 18,042,800 tons and 403.72 tons compared to 2005; and external environmental health costs will improve by 447.31 DALY compared with BAU2050.

Keywords: Alternative energy, External Environmental Health Cost, GHG and PM_{2.5}emission, Life Cycle Assessment, Private vehicles

Introduction

In recent years, the use of private vehicles has exacerbated the global greenhouse effect and air pollution, resulting in extensive impacts on the environment and human health, so it is important to reduce global warming and the air pollution caused by private vehicles. According to the International Energy Agency (2017), each country must establish Nationally Determined Contributions (NDC) and promote the use of low-emission vehicles in order to meet a 2°C scenario (2DS). For human health, the World Health Organization revealed air quality guidelines for PM_{2.5} suggesting that the average annual concentrations of PM_{2.5} should be less than 10µg/m³ and the average concentration every 24 hours should be less than 50µg/m³. To reduce overall emissions from private vehicles, some studies have indicated that traditional energy must be replaced by alternative energy. For example, Patterson et al. (2014) mention that, for low-emissions vehicles, using alternative energy produced by hydrogen rather than coal-fired energy can reduce large amounts of GHG emissions; Quek et al. (2018) indicate that coal-fired energy has the highest GWP and solar energy has the lowest GWP. This study suggests using alternative energy to replace traditional energy. Regarding PM_{2.5} and external environmental health costs, the highest emissions of PM_{2.5} cause health risks. For example, Gao et al. (2018) mention that the high concentration of PM_{2.5} in the electricity sector cause high external environmental health costs. Decreasing the PM_{2.5} concentration in the electricity sector will reduce the years of life lost in China and India.

According to Taipower (2020), in 2018 coal-fired energy was still the main electricity source at about 82.2%, followed by nuclear power at about 11.44%, and alternative energy at only 4.9%. For private vehicle emissions in all transportation sectors, private vehicles emit about 75% of greenhouses gases emissions based on the Institute of Transportation, MOTC (2019). Thus, it is necessary to propose mitigation strategies to enhance the use of alternative energies and low-emissions vehicles.

Regarding the mitigation strategies for private vehicles in this study, the following are included: (1) an assumed market share of low-emission vehicles replacing gasoline vehicles from 2030 to 2050, and (2) an assumed electricity scenario of renewable energy and non-renewable energy to evaluate greenhouse gas and PM_{2.5} emissions. This study also estimates the external environmental health costs caused by PM_{2.5} emissions. The mitigation strategies are divided into two time periods. The 2030 strategy is based on the Intended Nationally Determined Contribution, and the goal is to reduce 80% of greenhouse gas emissions in 2030 compared to 2005. The 2050 strategy is based on the Greenhouse Gas Reduction and Management Act, and the target is to reduce 50% of greenhouse gas emissions in 2050 compared to 2005. Although neither of the policies

controls PM_{2.5} emissions, this study uses two regulations to evaluate PM_{2.5}. Lastly, after targeting the standards of the Intended Nationally Determined Contribution and the Greenhouse Gas Reduction and Management Act as the reduction goals, the improvements of the external environmental health costs are determined (based on DALY).

Materials and Methods

This study applies a life cycle assessment to evaluate the carbon footprint of alternative and traditional energies. Moreover, this study also uses fuel consumption as data activities from the annual sales of gasoline at petrol stations to calculate private vehicle greenhouse gases and PM_{2.5} emissions in 2030 and 2050. At last, PM_{2.5} emissions are quantified into external environmental health costs to evaluate the improvement of health quality based on DALY. The methodology and relevant information referred to Simapro 9.0, GREET2019, Zeng (2005), Schleisner (2000), Atilgan and Azapagic (2016), Hondo (2005), Odeh et al. (2008), Wu (2010), Agrawal et al. (2013), Ghandehariun and Kumar (2016), and Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs.

Result and Discussion

The results show that among alternative energy, wind power has the lowest GHG emissions, followed by hydropower, hydrogen, and solar energy. Among traditional energy, coal-fired energy has the highest GHG emissions, followed by natural gas energy and gasoline.

According to the scenario analyses, the mitigation strategies in 2030 are the following: low-emission vehicles replace 30% of gasoline vehicles, and using 35% of alternative energies and 65% of traditional energies, which can cause a 21% and 28% reduction for GHG and PM_{2.5} compared to 2005. The 2050 strategies are the following: low-emissions vehicles replace 60% of gasoline vehicles, 86% of traditional energy will replace alternative energy, which can cause a 61% and 59% reduction for GHG and PM_{2.5} compared to 2005.

Lastly, this study applies the PM_{2.5} external environmental health costs (based on DALY) to evaluate the health impact of private vehicles under the mitigation strategies. The results show that compared to BAU2030 and BAU2050, the external environmental health costs can improve 22% and 55%, respectively.

CONCLUSION

Private vehicles cause large amounts of greenhouse gas and PM_{2.5} emissions in Taiwan, so more attention must be paid to global warming, air pollution, and health. This current study explores the life cycle carbon footprint of private vehicle energies (gasoline, electricity, and hydrogen), develops mitigation strategies for greenhouse gas and PM_{2.5} emissions and external environmental health costs, and achieves the goals of the INDC and GGRMA under the regulations of 2030 and 2050.

To conclude, if Taiwan applies these research emission reduction strategies to private vehicles, it will not only greatly reduce emissions but also improve external environmental health costs and provide a clean and healthy environment for Taiwan.



致謝

完成論文的同時，也正式結束自己於成大六年的生活，碩士生活的兩年更是永生難忘。一開始的論文挫折，到後來越來越順利後，除了是相信自己外，也謝謝老師、家人及朋友的幫助下，陪我度過這艱難的兩年碩士時光。

特別感謝我的指導教授-張瀨之老師，在我還沒有進研究所前就不斷地照顧我，鼓勵我繼續讀碩士，成為老師的學生。老師像我在成大的媽媽一樣，總是關心我們的生活並且不藏私的告訴我們做人處事的道理；在論文指導上，無怨無悔教導我一步一步完成論文，讓我順利走完學生的最後一段路。謝謝老師給我出國參加研討會的機會，讓我開拓視野且培養上台報告的勇氣。謝謝老師這兩年來的照顧，我會永遠不會忘記您的。

謝謝 Lab204-1 的同學們，總是忍受我在 Lab 吵吵鬧鬧，然後還幫我買午餐跟晚餐，陪我度過開心的碩士生活，也在我論文不順的時候，不斷的鼓勵及安慰我；謝謝其他研究室的朋友們，帶我去探索台南並且陪我瘋陪我鬧，共同面對碩士生活的點點滴滴，在交管所的一切，因為大家讓我覺得一切很美好。謝謝產業永續發展中心，借我軟體以順利有資料能完成論文。最後謝謝我的爸爸、媽媽及哥哥，從小到大的付出，讓我能無憂無慮地當個快樂的學生，並且用心的參與我的人生大小事，總是當我最大的靠山。

短短的兩年碩士生涯，是我將來最會回味的時光，徹夜寫論文、堅信自己的能力，現在回首過來，都將載滿回憶繼續往前走我的人生旅程。

怡蓁 謹致

民國一零九年六月 於府城

目錄

摘要	I
目錄	VIII
第一章 緒論	1
1.1. 研究背景	1
1.2. 研究動機	6
1.3. 研究目的	10
1.4. 研究架構	10
1.5. 小結	11
第二章 文獻回顧	13
2.1 替代能源產氫之文獻回顧	13
2.2 替代能源產電之文獻回顧	15
2.3 應用生命週期法評估低排放車輛之碳足跡文獻回顧	18
2.4 外部環境成本評估之文獻回顧	20
2.5 小結	22
第三章 研究方法	29
3.1 碳足跡評估方法	29
3.1.1 生命週期評估法	29
3.1.2 碳足跡	31
3.1.3 碳足跡計算流程	31
3.1.4 碳足跡評估軟體	33
3.2 變數、參數以及模型設定	33
3.2.1 製成地圖及系統邊界	33
3.2.2 模型變數及排放係數說明	38
3.2.3 模型建立	39
3.3 小結	41
第四章 實證分析	42
4.1 各能源生命週期碳足跡之溫室氣體排放量	42
4.1.1 風力發電	42
4.1.2 水力發電	43
4.1.3 太陽能發電	44
4.1.4 火力燃煤發電	46
4.1.5 天然氣發電	47

4.1.6 氫能.....	48
4.1.7 汽油.....	49
4.1.8 綜合比較.....	50
4.2 臺灣私有運具溫室氣體減排策略.....	53
4.2.1 車型種類與市佔率說明	53
4.2.2 耗油量資料說明	54
4.2.3 假設情境說明	55
4.2.4 基礎情境下溫室氣體排放量.....	59
4.2.5 假設情境下溫室氣體排放量.....	60
4.3 臺灣私有運具之 PM _{2.5} 排放量與外部健康成本	63
4.3.1 各能源 PM _{2.5} 排放係數表.....	63
4.3.2 基礎情境下 PM _{2.5} 排放量.....	63
4.3.3 減排策略下 PM _{2.5} 排放量.....	64
4.3.4 外部環境健康成本	66
4.4 小結.....	67
第五章 結論與建議.....	69
5.1 結論.....	69
5.2 建議.....	70
5.3 研究限制.....	70
5.4 未來研究方向.....	71
參考文獻	72
中文文獻.....	72
英文文獻.....	72

圖目錄

圖 1.1 全球二氧化碳排放比例(Global CO2 emissions by sector,2016)	3
圖 1.2 運輸部門二氧化碳排放(Global transport CO2 emissions by sub-sector)	3
圖 1.3 歐盟電力部門碳強度 electricity generation CO2 emission intensity	5
圖 1.4 臺灣各部門二氧化碳占比(部門分攤電力消費).....	8
圖 1.5 臺灣運具別排放量.....	8
圖 1.6 107 年臺電系統發購電量結構.....	9
圖 1.7 107 年再生能源發購電量結構.....	9
圖 1.8 研究架構.....	11
圖 3.1 生命週期評估架構.....	30
圖 3.2 碳足跡計算流程.....	32
圖 3.3 汽油各階段生命週期製成地圖.....	34
圖 3.4 火力發電各階段生命週期製成地圖.....	35
圖 3.5 天然氣發電各階段生命週期製成地圖.....	35
圖 3.6 風力發電各階段生命週期製成地圖.....	36
圖 3.7 太陽能發電各階段生命週期製成地圖.....	36
圖 3.8 水力發電各階段生命週期製成地圖.....	37
圖 3.9 風力發電產氫各階段生命週期製成地圖.....	37
圖 4.1 各能源於各生命週期階段之比較.....	51
圖 4.2 私有運具預測耗油量(2020-2050).....	55
圖 4.3 各個情境下替代能源與傳統能源比例.....	56
圖 4.4 假設情境下私有運具排放量(2030-2050).....	62
圖 4.5 假設情境 4 下私有運具減排率.....	62
圖 4.6 減排策略下 PM _{2.5} 排放量.....	65
圖 4.7 減排策略下 PM _{2.5} 減排率.....	65

圖 4.8 基礎情境下台灣私有運具之 PM_{2.5} 外部環境健康成本.....66

圖 4.9 減排策略下台灣私有運具之 PM_{2.5} 外部環境健康成本.....67



表目錄

表 2.1 文獻整理-替代能源產氫	23
表 2.2 文獻整理-替代能源產電	24
表 2.3 文獻整理-應用生命週期法評估低碳排汽車之碳足跡	25
表 2.4 文獻整理-外部環境成本評估	27
表 3.1 變數說明.....	38
表 4.1 風力發電三階段溫室氣體排放.....	43
表 4.2 水力發電三階段溫室氣體排放.....	44
表 4.3 太陽能發電三階段溫室氣體排放.....	45
表 4.4 火力燃煤發電三階段溫室氣體排放.....	47
表 4.5 天然氣發電三階段溫室氣體排放.....	48
表 4.6 氫能三階段溫室氣體排放.....	49
表 4.7 汽油三階段溫室氣體排放.....	50
表 4.8 各能源於各生命週期階段之溫室氣體排放係數.....	52
表 4.9 臺灣私有運具數量統計.....	54
表 4.10 臺灣私有運具假設市佔率(2030-2050 年).....	54
表 4.11 假設情境 1 替代能源與傳統能源比例(2025-2050).....	57
表 4.12 假設情境 2 替代能源與傳統能源比例(2025-2050).....	57
表 4.13 假設情境 3 替代能源與傳統能源比例(2025-2050).....	58
表 4.14 假設情境 4 替代能源與傳統能源比例(2025-2050).....	58
表 4.15 基礎情境下私有運具溫室氣體排放量.....	59
表 4.16 假設情境下私有運具排放量(2030-2050).....	61
表 4.17 各能源 PM _{2.5} 排放係數表.....	63
表 4.18 私有運具 PM _{2.5} 排放量.....	64

第一章 緒論

本章節首先介紹研究背景，並闡述本研究之研究動機與目的，接著說明本文之研究架構與流程，最後為本章節之小結。

1.1. 研究背景

全球暖化造成氣候變遷已然成為事實，造成全球暖化的主要因素為溫室效應所引起的，因此減少溫室氣體的排放將成為全球共同目標。根據政府間氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change, 簡稱 IPCC) 在 2014 的第五次評估報告(Fifth Assessment Report 2013, 簡稱 AR5)指出，人類活動極可能導致二十世紀五零年代以來的大部分全球地表平均氣溫升高。世界氣象組織(World Meteorological Organization, 簡稱 WMO,2018) 指出，隨著全球二氧化碳的排放持續上升，從 1994 年 357 ppm 上升至 2017 年 405.5 ppm，未來不減反增，造成全球暖化使得海平面上升、熱浪、冰川退縮等極端氣候出現。此外，2018 年為 2015 年以來最暖的一年，2018 年全球平均地表溫度比工業化前基線高約 1°C。國際能源總署(International Energy Agency, 簡稱 IEA)(2018)報告亦指出，將全球溫升限制在 1.5°C 將需要在土地，能源，工業，建築，交通和城市等方面轉型，且全球人為排放的二氧化碳排放量需在 2030 年比 2010 年減少約 45%，2050 年排放量須為零。根據 IEA(2019)出版<Key World Energy Statistics,2019>指出，全球在 2017 年二氧化碳排放量為 32,840 百萬公噸，平均每人每年二氧化碳排放為 4.53 噸，全球平均每人每年二氧化碳排放量將會持續上升。

為了落實溫室氣體排放管制，聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, 簡稱 UNFCCC)於 1997 提出具有約束效力的京都議定書(Kyoto Protocol)，主要規範已開發國家的溫室氣體減量排放責任，並將溫室氣體換算成二氧化碳當量，目標以 1990 為基

準，2008 年至 2012 年平均溫室氣體排放量需減少 5.2%。然而，京都議定書並未限制開發中國家(中國、印度、巴西等)的溫室氣體排放量，導致世界上溫室氣體減排效果不彰，且各國並未達到所訂定之減排目標，京都議定書約束也隨著期限到期跟著落幕。

針對全球暖化以及氣候變遷相關議題，聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)與全球 195 個國家為了對抗全球暖化，每年皆舉辦會議探討溫室氣體排放，但皆無明確規範，直到 2015 所簽訂的巴黎協定(Paris agreement)對於溫室氣體排放議題有較明確規範且更具法律約束性，此協定之主要目標為將全球平均氣溫升幅控制在工業化前水平低於 2°C 內，並努力將溫度升幅控制在 1.5°C 內。與京都議定書最大不同是，開發中國家也納入溫室氣體減排行列，並且已發國家需提供資金供開發中國家達到減排目標。巴黎協定最具代表的為要求各國提出自主減量貢獻目標(Intended Nationally Determined Contributions, 簡稱 INDCs)，每五年提出國家自訂貢獻(Nationally Determined Contributions, 簡稱 NDC)，進行一次全球盤點，已落實各國 NDC 減碳承諾。根據氣候追蹤者(Climate Action Tracker, CAT)由四個歐洲國家組成的研究機構，包含 Climate Analytics, Ecofys, New Climate Institute, Potsdam Institute for Climate Impact Research，指出 INDC 的無條件排放減量可防止於 2100 年前全球平均溫度較工業革命前的溫度上升 2.7°C。因此，隨著巴黎協定的持續推動，將能夠為全球暖化帶來正面的影響。

根據 IEA(2018)出版的< CO₂ Emissions from Fuel Combustion >指出，全球在 2016 年二氧化碳排放最高類別為電力排放，其次為運輸部門；又將電力排放細分，工業部門占最高，其次為運輸部門，如圖 1.1 所示，運輸部門對全球二氧化碳排放有極大貢獻。運輸部門中，與 1990 年相比，陸運增加 2%二氧化碳排放，海運(10%)跟空運(12%)維持一樣的比例，如圖 1.2

所示，陸運二氧化碳排放佔比最高也持續增加排放。

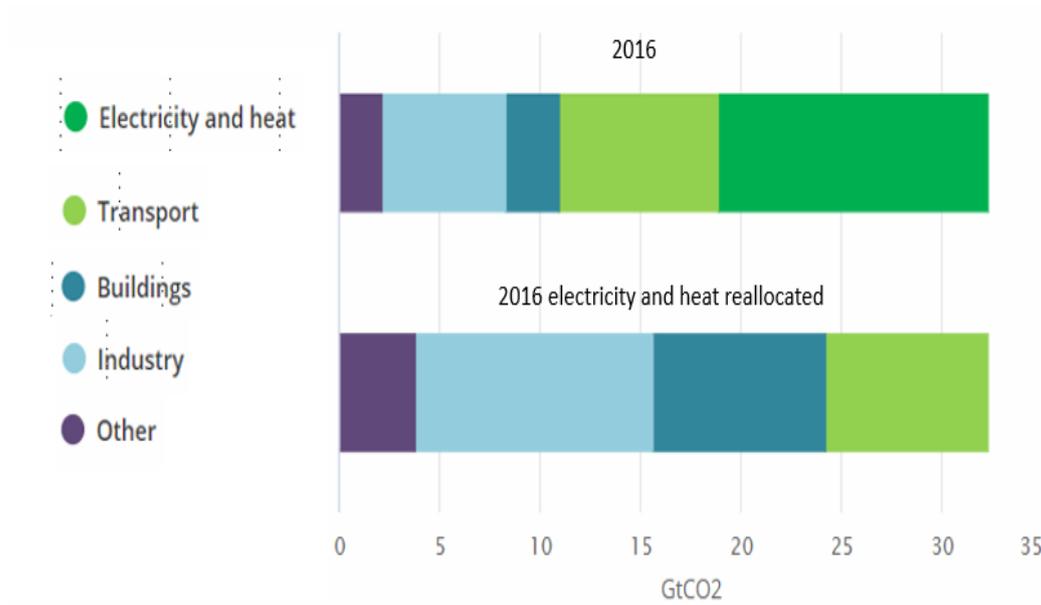


圖 1.1 全球二氧化碳排放比例(Global CO2 emissions by sector,2016)

資料來源：IEA(2018)

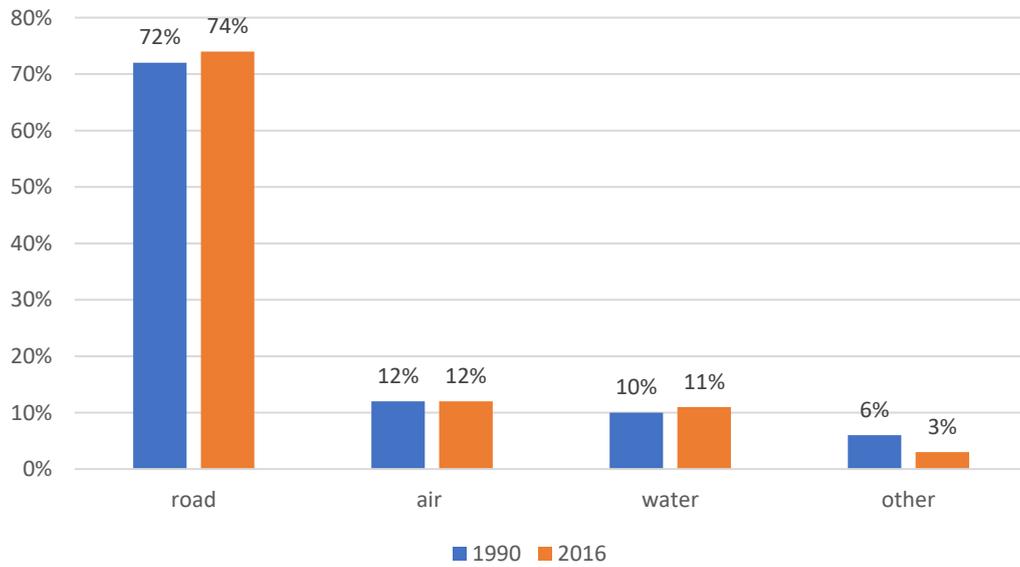


圖 1.2 運輸部門二氧化碳排放(Global transport CO2 emissions by sub-sector)

資料來源 IEA(2018)

進一步討論國際組織對於運輸部門的溫室氣體減排策略。IEA(2017)出版< Energy Technology Perspectives>針對運輸部門溫室氣體減排計畫提出每個國家必須遵守所訂定的國家自訂貢獻(Nationally Determined Contributions, NDC)，並且提升使用低排放運具比例，像是以電動汽車取代汽油汽車，減少運輸部門二氧化碳排放，以符合全球溫升目標在 2°C內情境(2DS)。IPCC(2014a)第五次氣候變遷報告之減緩氣候變遷報告< AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change>，對於運輸部門溫室氣體減排方法為：(1)避免旅次產生，減少多餘的旅次產生，例如採購本地產品、線上購物、利用先進資通訊系統管控物流等。(2)轉向低碳運具，增加對大眾運輸、基礎設施等投資，提升大眾運輸使用率。(3)減少能源使用率，提升車輛輕量化技術以及使用電動汽車。(4)降低燃料碳強度，使用替代能源取代汽油，像是天然氣、再生能源等生產電及氫氣。

歐盟電力部門近年來致力於替代能源發電，根據歐洲環保署(European Environmental Agency, 簡稱 EEA)(EEA,2018)指出，歐盟在 2016 年替代能源佔比為 17%，與 2009(9%)相比，提升將近 2 倍，且目標在 2020 年須將替代能源提升至 20%，在 2030 年提升至 32%。歐盟 2016 年電力部門碳強度自 1990 年以來逐年下降，如圖 1.3 所示，從 1990 年 523.6 gCO₂/kwh，下降至 2016 年 295.8 gCO₂/kwh。因此，替代能源發電能大幅減少電力部門的碳強度，各國應至致力與此。此外根據 IEA(2018)出版< Renewables 2018>分析及預測 2018 至 2023 年替代能源的技術與對環境的影響，指出在產電部分，以替代能源產電會從 2017 年 24%提升至 2023 年 30%，並且在 2023 年以水力發電為主，佔 16%，其次為風能(6%)、太陽能(4%)及生物質能(3%)。隨著中國使用太陽能比例增長，太陽能將在 2023 年成為主導全球替代能源成長的主要能源，進而減少太陽能發電的成本。

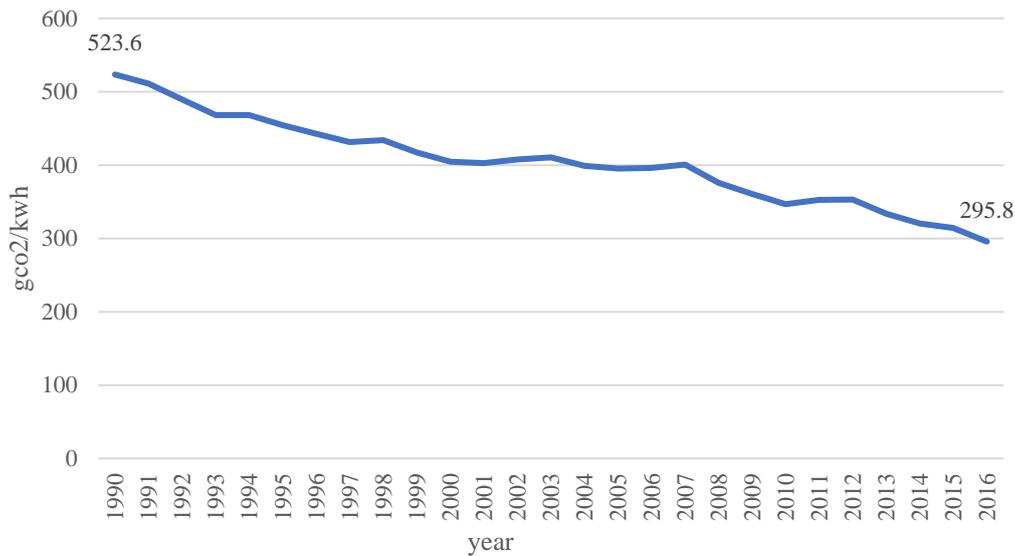


圖 1.3 歐盟電力部門碳強度 electricity generation CO2 emission intensity

資料來源：EEA(2018)

隨著各國越來越重視替代能源對溫室氣體的減少，進而可以評估其他替代能源的環境效益。本研究欲探討細懸浮微粒(Particulate Matter, PM_{2.5})對人體健康損害程度，並評估何種替代能源對臺灣私有運具有最低的外部環境健康成本。因此，根據世界衛生組織(World Health Organization, WHO)(WHO, 2018)報告指出，空氣汙染與細懸浮微粒有關，並且直接損害人體健康；WHO (2018)指出在 2016 年，全世界 90%的城市都居住在超過符合 WHO 所訂定的空氣質量準則值(PM_{2.5} 濃度為 10 μ g/m³)的環境下。根據歐盟環保署(European Environment Agency, EEA)(EEA, 2019)空氣品質評估報告指出，空氣汙染物質(PM_{2.5}、NO₂、O₃)會影響呼吸系統及心血管疾病的發病率及死亡率。其中 PM_{2.5} 影響最劇，在 2016 年歐洲地區因為過度暴露在 PM_{2.5} 濃度下，導致早逝(Premature deaths)人數約為 412,000 人，因早逝所損失的壽命年(Years of life lost, YLLs)約為 4,223,000 年。

為防止世界各國因為 PM_{2.5} 所造成的空氣汙染導致損害人體健康，世界衛生組織(WHO, 2005)出版的《關於顆粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空氣品質準則》(Air quality guidelines)針對 PM_{2.5} 濃度進行規範，年平均濃度必須小於 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，每 24 小時平均濃度必須要小於 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

綜合以上，陸運若要減少溫室氣體及細懸浮微粒，應使用低排放車輛(電動車、氫能車)，以及替代能源發電、產氫，達到環境保護效益，減少全球溫室氣體含量及 PM_{2.5} 濃度。

1.2. 研究動機

臺灣 2016 年二氧化碳排放量為 257.8 百萬公噸，平均每人每年二氧化碳排放為 10.98 噸，遠高於全球人均排放量(4.53 噸)約 2.5 倍。根據行政院環保署〈溫室氣體排放統計〉(行政院環保署, 2019), 統計出來臺灣各部門在二氧化碳排放量，部門以分攤電力消費加以計算，2017 年能源部門 CO₂ 排放約占燃料燃燒總排放的 12.72%，工業占 49.78%，運輸占 13.82%，服務業占 11.30%，住宅占 11.39%，農業占 1%。如圖 1.4 所示，運輸部門是臺灣第二大二氧化碳排放部門，尤其是公路排放約佔 95.05%。其中根據交通部運輸研究所〈運輸部門運具別排放清冊〉(交通部運輸研究所，2019)，私有運具(自用小客車、自用小貨車、機車)排放約佔 75%，因此本研究將以私有運具為研究之主要標的，如圖 1.5 所示。

由於近年環保意識抬頭，低排放車輛也陸續增加，其類型有混合動力電動汽車，插電式混合動力汽車，全電池電動車(電動汽機車)，氫燃料電池車(汽機車)。在此本研究的私有運具僅探討全電池電動車(BEV)及氫燃料電池車(FCEV)。臺灣目前為減少運輸部門排放，財政部訂定〈電動汽車免

徵牌照稅>(財政部賦稅署全球資訊網, 2017), 授權直轄市及縣(市)政府得免徵完全以電能為動力之電動汽車使用牌照稅, 電動汽車免徵期限延長至 110 年 12 月 31 日, 以提升電動汽車使用率, 進而減少引擎車(汽油車)使用率。

進一步探討低排放車輛所耗的能源, 即使行駛過程無排放, 但能源來源是產生排放最大部分, 因此本研究採用生命週期研究方法並跟據 ISO14067:2018 碳足跡標準分析能源之碳足跡溫室氣體排放。若從能源來源, 也就是國家電網著手減少碳排放, 提升替代能源使用比例, 減少臺灣火力發電比例。根據台灣電力公司(2019)<再生能源發電概況>, 2018 年臺電系統發電結構顯示, 臺灣目前仍以火力發電(82.2%)為主, 其次是核能(11.44%), 再生能源僅占(4.9%), 如圖 1.6 所示, 火力發電比例與再生能源比例有極大的懸殊。再生能源中, 在 2018 年以水力發電(38.9%)為主, 其次為太陽能發電及垃圾沼氣(23.3%), 風力發電(14.4%)及生質能發電(0.1%)較低, 如圖 1.7 所示, 水力發電目前仍為臺灣再生能源主力。

為減少臺灣溫室氣體排放量, 有訂定相關法規。根據行政院訂定臺灣《溫室氣體減量及管理法》(行政院環境保護署 溫室氣體減量法規資訊網, 2018)指出為落實環境正義, 善盡共同保護地球環境之責任, 並確保國家永續發展, 需降低溫室氣體排放量, 並明訂國家溫室氣體長期減量目標為在 2050 年溫室氣體排放量降為 2005 年溫室氣體排放量 50%以下。

因此, 本研究首先運用碳足跡模型, 探討臺灣傳統能源(汽油、燃煤火力發電、天然氣發電)及替代能源(太陽能、風能、水力與氫能)的生命週期碳足跡溫室氣體排放量, 並隨著替代能源取代傳統能源比例調升下, 依此訂定出減排策略, 並評估若臺灣實施本研究之減排策略, 與基礎情境相比較之下, 對 2030 年以及 2050 年溫室氣體及細懸浮微粒排放量之改善幅度,

並利用失能調整生命年(Disability Adjusted Life Years, DALY)評估外部環境成本之改善程度。藉此瞭解不同替代能源對私有運具之影響，以降低臺灣運輸、能源部門溫室氣體、PM_{2.5}排放量及提升臺灣國人之健康品質。

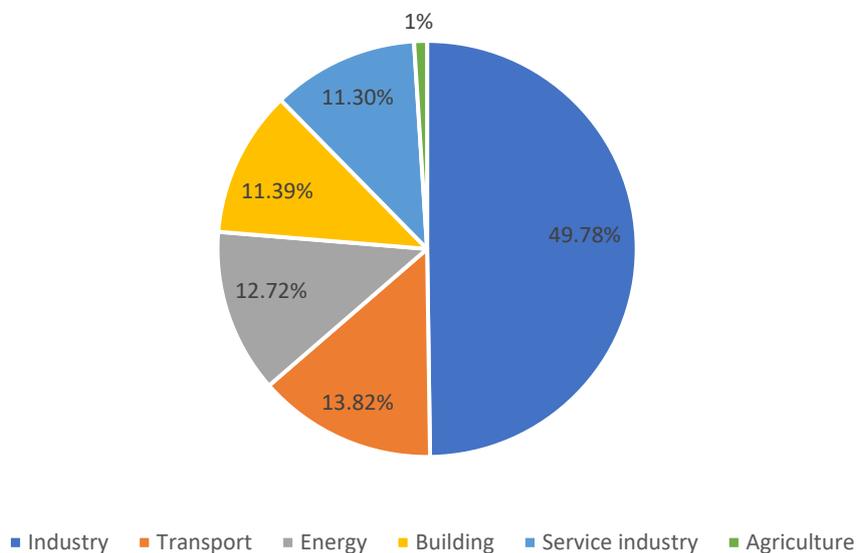


圖 1.4 臺灣各部門二氧化碳占比(部門分攤電力消費)

資料來源：臺灣行政院環境保護署(2019)

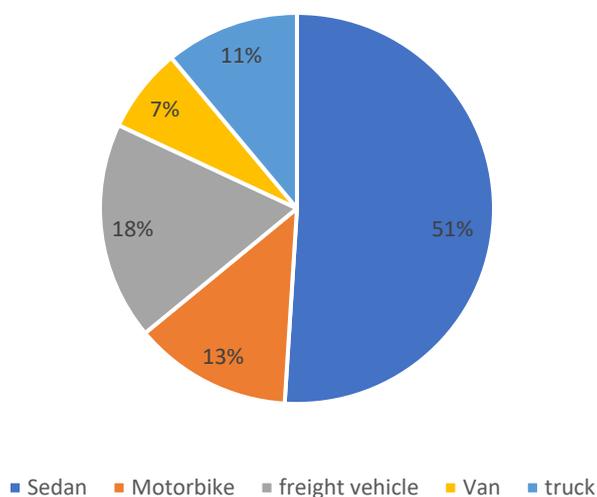
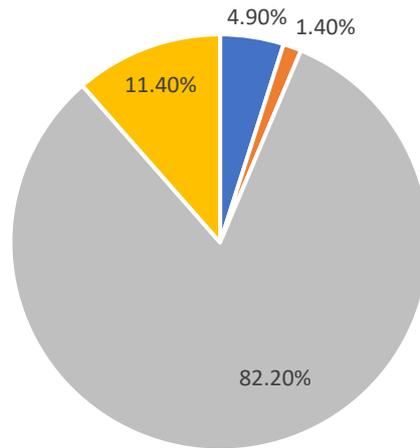


圖 1.5 臺灣運具別排放量

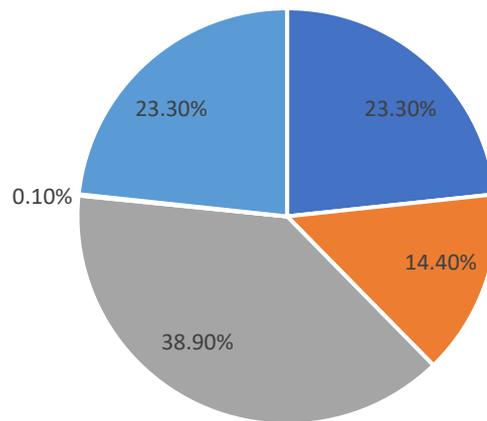
資料來源：交通部運輸研究所(2019)



■ Renewable energy ■ Pumping storage ■ Thermal power ■ Nuclear power

圖 1.6 107 年臺電系統發購電量結構

資料來源：台灣電力公司(2019)



■ Solar energy ■ Wind power ■ Hydro power ■ Biomass energy ■ landfill biogas

圖 1.7 107 年再生能源發購電量結構

資料來源：台灣電力公司(2019)

1.3. 研究目的

基於上述章節提及研究背景與研究動機，本研究之研究目的為：

1. 運用 ISO14040、ISO14067:2018 及 PAS2050:2011 探討替代能源之生命週期碳足跡。分析比較傳統能源(汽油、燃煤火力發電、天然氣發電)、替代能源(太陽能、水力發電、風能及氫能)，何種能源對私有運具最具環保效益，並以此提出減排策略。
2. 評估若臺灣採用本研究之減排策略，是否能落實《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範，並探討相對於基礎情境下 2030 年與 2050 年溫室氣體及細懸浮微粒排放量，對於臺灣全球暖化及空氣汙染改善幅度。
3. 運用失能調整生命年(Disability Adjusted Life Year)為換算外部環境健康成本單位基礎，藉以了解若臺灣採用本研究之減排策略，對外部環境健康成本改善幅度。

1.4. 研究架構

圖 1.7 為本文研究架構，首先第一章之緒論中說明本文之研究背景、研究動機及研究目的並建立研究之架構及流程；第二章為文獻回顧，依序為替代能源產氫之文獻回顧、替代能源產電之文獻回顧、應用生命週期法評估低排放車輛之碳足跡文獻回顧與外部環境成本之評估；第三章為研究方法之介紹，運用生命週期法評估碳足跡計算方法之介紹及基本模型之建立；第四章為本研究之實證結果及分析。最後在第五章提出本研究之結論及相關建議。

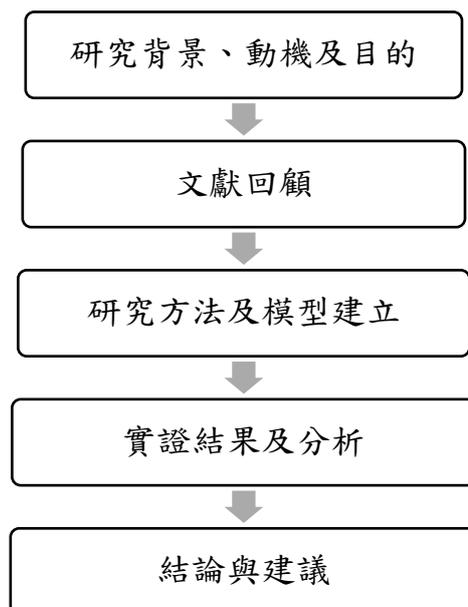


圖 1.8 研究架構

1.5. 小結

第一章緒論中說明研究背景、研究動機、研究目的，以及建構本文之研究架構及流程。研究背景為因為人類活動，導致全球溫室氣體增加，進而造成全球暖化。人類活動中，運輸部門及能源部門為溫室氣體排放主要來源，因此世界各國國際環保組織致力於提出減少溫室氣體排放策略。針對運輸部門世界各國共同策略之一為：「改善運輸系統能源使用效率，推廣低碳排車輛」；能源部門為：「減少不可再生能源使用比例，提高替代能源之使用」。臺灣身為全球一份子，針對臺灣運輸部門之減碳目標為提高使用低排放車輛比率，並且在能源改善方面，擴大使用替代能源。因此，本研究欲探討臺灣替代能源(水力發電、太陽能發電、風能發電及氫能)生命週期碳足跡，並運用於私有運具，以生命週期觀點分析不同替代能源在原料與製造、營運與維護及退役各階段對於環境面之影響，並以此為本研究之減排策略，了解與基礎情境相對下，2030 年及 2050 年私有運具溫室氣體及細懸浮微粒排放改善程度，並評估是否能落實《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範。最後探討隨著替代能源比例提升，運

用失能調整生命年(Disability Adjusted Life Year)為換算外部環境健康成本單位基礎，藉以判斷因細懸浮微粒(Particulate Matter, PM_{2.5})所造成的失能調整生命年，以瞭解私有運具外部環境健康成本改善幅度。



第二章 文獻回顧

本文之文獻回顧共分為五個部分，第一部分為替代能源產氫之文獻回顧；第二部分為替代能源產電之文獻回顧；第三部分為應用生命週期法評估低碳排汽車之碳足跡之文獻回顧；第四部份為對於外部環境成本評估之文獻回顧；最後對於本文之文獻回顧進行小結。

2.1 替代能源產氫之文獻回顧

Patterson et al. (2014)以生命週期法(life cycle assessment)分析英國使用替代能源(風能和太陽能)產氫、傳統能源(火力發電)產氫與電動汽車的環境效益，作者著重於生命週期中之製造階段。研究結果顯示，溫室氣體排放量以替代能源電解法產氫為最低，目前所使用之電動汽車次之，傳統能源電解法產氫最高。若能實現在 2030 年以替代能源替代火力發電，溫室氣體排放量可望有效減少，若將其運用於電動汽車，則對環境效益將明顯改善。作者建議，電動汽車與氫燃料電池汽車的組合將能夠減少溫室氣體排放，有效對抗地球暖化所帶來的衝擊。

Posso & Zambrano (2014)分析委內瑞拉使用替代能源產氫的潛力，並比較太陽能、風能以及小型水力發電產氫的產量，以解決農村電能不足的問題以及減少化石燃料產氫對環境的影響。研究結果顯示，三種替代能源產氫總量為 2.073×10^{10} kWh/year，其中太陽能發電產氫 1.968×10^{10} kWh/year 較高，約占 95%；其次是小型水力發電產氫 7.134×10^8 ，約占 3.4%；風能發電產氫 3.303×10^8 kWh/year 較低，約占 1.6%。因此，作者建議委內瑞拉政府應優先考量太陽能發電產氫，並利用地理優勢，將太陽能發電位置遍佈在全國，以滿足農村電力需求，藉此減少化石燃料產氫的比例。

Ghandehariun & Kumar (2016)以生命週期法之製造階段評估風力發電產氫的溫室氣體排放量。探討製造四程序包含(1)風力提供電能、(2)風能產氫、(3)氫氣壓縮及(4)氫氣運輸，分析其在各程序的溫室氣體排放量差異，並與傳統化石燃料產氫方法進行比較。研究結果顯示，製造評估階段中，風力提供電能程序具有最高的溫室氣體排放量(65%)，其次為氫氣壓縮(22%)和氫氣運輸(6%)。此外，研究結果亦指出風能產氫的溫室氣體排放量為 0.68 ± 0.05 kg CO₂ eq./kg，低於傳統化石燃料產氫方法約 94%。因此，建議政府注重氫氣製造階段建造材料的製成與能源投入的來源，並鼓勵推廣綠色製造技術，以減少對環境的影響。

Abdin & Mérida (2019)利用最佳化探討全球五個地區(加拿大斯闊米甚、美國洛杉磯、戈爾登、澳大利亞布里斯本、阿德萊德)使用替代能源系統(太陽能、風能、太陽能結合風能)發電及產氫的能源成本(有燃料電池但沒有電池組能源系統、具有燃料電池跟電池組能源系統、有電池但沒有燃料電池能源系統)。研究結果顯示，五大地區的太陽能結合風能較其他兩種能源有較低的能源成本，因此建議使用替代能源組合；研究結果亦顯示，五大地區氫能源系統以有電池但沒有燃料電池能源系統有較低的能源成本，因此建議未來提升產氫技術效率，減少能源成本，使氫能成為長期能源供應來源。

Ayodele et al. (2019)分析奈及利亞西南部地區使用沼氣發電產氫對環境的影響，運用廚餘當作沼氣發電來源，以提高奈及利亞能源使用率與電能不足問題，並比較使用氫燃料電池電動汽車與柴油汽車，計算其溫室氣體減排效果。研究結果顯示，奈及利亞西南部地區沼氣發電的產氫量約為 41.11 萬噸，為該地區提供每年約 1,946 萬 kWh 的電力。研究結果亦顯示，使用氫燃料電池電動汽車，可節省每年約 7,446,000 升柴油消耗與 14.89 億奈拉(約 41,075,587 美元)；溫室氣體減排方面，約可減少 16,031,000 千克

CO₂ 與 45,477,000 千克 CO。因此，作者建議奈及利亞使用廚餘當沼氣發電來源產氫，以達到環境效益與經濟效益，並且解決當前奈及利亞電力不足的問題。

2.2 替代能源產電之文獻回顧

Quek et al. (2018)分析新加坡利用煤、汽油、天然氣、焚燒垃圾、太陽能及沼氣發電對環境的影響。運用生命週期法分析六種發電來源從原料提取、製造、產電、電力傳輸與消耗四階段，評估指標包含全球暖化潛勢值 (GWP)，酸化潛力 (AP)，富營養化潛力 (EP) 和人類毒性潛力 (HTP)。研究結果指出，煤有最高的 GWP，其次為汽油及焚燒垃圾，太陽能及沼氣的 GWP 相對低。AP 方面，沼氣最高，其次為汽油及煤；HTP 方面煤最高，其次為煤及太陽能；EP 方面，汽油最高，其次為煤及沼氣。因此作者建議，新加坡應提升太陽能及沼氣發電資源使用效率技術，減少對環境總體的影響，實現真正環境永續性。

Wakiyama & Kuriyama (2018)基於日本國家自訂貢獻 (nationally determined contribution) 以及 2°C 的溫升限制目標 (2 °C scenario, 2DS) 評估日本各地區使用替代能源產電的潛力，並比較替代能源、核能以及化石燃料產電的碳排放，以達到 2030 減排目標。研究結果顯示，以化石燃料產電碳排放 0.55 kgCO₂ / kWh 較高，其次為 NDC (nationally determined contribution) 中替代能源 0.41 kgCO₂ / kWh，2DS (2 °C scenario) 替代能源結合核能 0.17 kgCO₂ / kWh 較低。研究結果亦顯示，替代能源與核能相比，產生的電能無法滿足日本電力需求，因此核能發電為替代化石燃料發電第一優先考量，但考慮核能發電不確定因素 (安全因素與成本因素等)，因此應減少核能發電比例，提升替代能源發電比例。作者建議若要達到電網僅靠替代能源，日本政府必須減少國家總體電力需求，並制定政策及編列預

算，以提升替代能源技術與投資，以可再生產電系統取代化石燃料發電，滿足減排目標。

Danthurebandara & Rajapaksha (2019)分析斯里蘭卡利用水力、煤、汽油、太陽能及風能發電對環境的影響，並提出 2050 年五種混合發電策略 (1) 25%水庫發電，7%川流發電，35%煤，31%汽油，0.3%太陽能和 1.7%風能(2) 100%太陽能(3) 100%風能(4) 50%太陽能和 50%風能(5) 25%水庫發電，7%川流發電，34%太陽能和 34%風電，以滿足斯里蘭卡總電力需求。作者首先以生命週期法評估五種發電來源在建設、營運及除役三階段的全球暖化潛勢 (Global Warming Potential)，據此比較 2050 年五種混合發電策略的 18 項環境評估指標，環境評估指標包含氣候變遷 (Climate change)、臭氧消耗 (Ozone depletion)、海洋富營養化 (Marine eutrophication)、陸地生態毒性 (Terrestrial ecotoxicity) 與人體毒性 (Human Toxicity) 等。研究結果顯示，以氣候變遷為例，五種策略中以策略(1) $2.08E+11$ kg CO₂eq 危害最大，其次為策略(2)，以策略(5) $3.32E+09$ kg CO₂eq 對環境最友善。因此，建議斯里蘭卡在 2050 年全面使用替代能源為發電來源，並制定政策將替代能源除了在營運階段外，建設及除役階段亦納入環境影響的考量，減少替代能源在建設及除役階段中對環境的影響，以改善全球能源消耗。

Govender et al. (2019)評估南非沼氣發電的財務與經濟可行性，比較三種策略(1)僅由石化公司投入產出(2)制定南傳統能源獨立電力生產商採購計劃 (REIPPPP) 與碳稅法案(3)參照德國沼氣技術。研究結果顯示，策略(1)較不具財務可行性，策略(3)有較高財務可行性，因其參照德國沼氣技術制定電價。因此作者建議，南非沼氣發電以多元組合產電將可增加經濟效益，且提高報酬率，降低投資南非沼氣發電的風險，若能結合策略(2)，將可增加熱能銷售，以提升整體經濟效益。

Orfanos et al. (2019)分析及預測希臘產電對環境的影響，並比較 2016 至 2030 年火力發電與替代能源(太陽能、風能、水力、沼氣)產電比例，以達到減排目標。運用生命週期法評估火力發電與替代能源產電的製造、營運及輸電三階段，並利用 CML 2 baseline 2000 以及 Eco-indicator 95 估計 GWP100 及 PER(Primary Energy Requirement)。研究結果顯示，在 GWP 方面，2016 年希臘每一千瓦產生約 685 gr-CO₂eq/ kWh，以營運階段為主，其中火力發電佔 99%，替代能源產電僅佔 1%。預估 2020 年希臘每一千瓦產生約 571 gr-CO₂eq/kWh，2030 年約 433 gr-CO₂eq/kWh 分別較 2016 年減少 17%及 37%，因替代能源產電比例從 2016 年 21%，提升到 2020 年 30%，2030 年 49%，大量取代火力發電；在 PER 方面，2016 年希臘產生約 529,000 TJ LHV，以火力發電中的褐煤發電廠 471000 TJ LHV 較高，其次是天然氣發電廠 140000 TJ LHV，替代能源中的沼氣發電 141 TJ LHV 較低。預估 2020 年產生約 381000 TJ LHV，2030 年約 406000 TJ LHV，分別較 2016 年減少 28%及 23%，其中 2030 年隨著替代能源比例提升，在製造階段會需要較高的能源投入，因此 PER 較 2020 年高。作者建議希臘藉由研究結果，實際制訂政策，以替代能源產電取代現有火力發電及提升能源使用效率，以達成減排目標。

Li et al. (2020) 分析風力發電對中國的減碳效益，以生命週期法評估風力發電生產、運輸、建造、營運及退役與回收階段，各階段之碳排放量，並依據削減率及回收率高低，提出假設情境，評估最佳減碳效益策略。研究結果顯示，生產階段碳排放最高(70.61%)，其次是建造階段(13.85%)，營運階段最低(1.75%)。研究結果亦顯示，假設情境下，低風力發電削減率且高回收率，最具減碳效益，因此建議政府發展風力發電，並積極回收風力發電之材料，能有效減少中國碳排放量。

2.3 應用生命週期法評估低排放車輛之碳足跡文獻回顧

Burchart-Korol et al. (2018)分析以及預測波蘭與捷克 2015 年到 2050 年電動汽車對環境的影響，並與使用汽油汽車進行比較。運用生命週期法分析電動汽車與汽油汽車的製造、營運及除役三階段之碳足跡。研究結果顯示，2015 年波蘭與捷克使用電動汽車與傳統使用汽油汽車相比，能減少溫室氣體排放，波蘭從 42,614kg CO₂ eq 減少至 41,453 CO₂ eq，約減少 2.7%；捷克從 42,614kg CO₂ eq 減少至 32,100 CO₂ eq，約減少 24.6%；研究亦顯示，兩國在 2050 年使用替代能源為電池充電來源，將能夠大規模減少溫室氣體排放，預測波蘭可減少至 25,837 CO₂ eq；捷克可減少至 21,988 CO₂ eq，較 2015 年分別各減少 60.5%，31.5%。因此，建議兩國在未來以電動汽車取代汽油汽車，並加以注重電動汽車整個生命週期，有效提升資源使用效率，達成 2050 年兩國減排目標。

Raugei, Hutchinson, & Morrey (2018)分析英國使用電動汽車以減少傳統能源的使用比例，並與使用汽油汽車進行比較，運用生命週期法評估電動汽車採購原料、製造、使用與回收等四階段的傳統能源總需求 (non-renewable cumulative energy demand, nr-CED)，並比較電動汽車使用階段三種供電情境(1)預期 2035 年英國電網發電(減少煤炭及天然氣發電) (2)天然氣發電(3)替代能源發電。研究結果顯示，以情境(2)天然氣發電的傳統能源總需求 7.9 MJ (nr-PE) /kWh (electricity) 較高，其次為情境(1)預期 2035 年英國電網發電 5.0 MJ (nr-PE) /kWh (electricity)，情境(3)替代能源發電 0.2 MJ (nr-PE) /kWh (electricity) 較低。研究結果亦顯示，即使情境(2)天然氣發電的傳統能源總需求較其他兩種情境高，但與汽油汽車相比，傳統能源總需求可減少約 32%，因此作者建議英國若要達到 2035 年 2°C 的溫升限制目標，應優先考量以再可生能源發電的電動汽車，並且制定政策使

替代能源為未來主要供電來源，減少傳統能源總需求。

Lee et al. (2018)分析美國中型和重型卡車使用氫燃料電池電動卡車 (hydrogen fuel cell electric truck, FECTs)對環境的影響，並與柴油卡車進行比較。運用生命週期法評估氫燃料電池電動卡車的開採氫能原料、產氫、壓縮氫氣(分為氣態氫氣、液態氫氣)及運送氫氣等四個部分的溫室氣體排放及空氣汙染物。研究結果顯示，以壓縮氫氣中的氣態氫氣為例，使用氫燃料電池電動卡車相對傳統使用柴油卡車，可減少溫室氣體排放量約 19-45%、VOC 約 37-65%；CO 約 49-77%；NO_x 約 62-83%；PM₁₀ 約 19-43%；PM_{2.5} 約 27-44%。因此作者建議，中型和重型卡車作為美國運輸部門第二大排放量，應優先考量使用氫燃料電池電動卡車，並且使用替代能源產氫，具環境效益，可達到美國減碳目標。

Ahmadi (2019)以車輛與燃料生命週期排放(Lifecycle emissions)(Lifecycle cost)比較美國混合動力電動汽車(HEV)、插電式混合動力汽車(PHEV)、全電池電動汽車(BEV)、氫燃料電池電動汽車(FCEV)與汽油車(ICE)的溫室氣體排放與空氣汙染物排放，據此比較五種車輛的生命週期成本(Lifecycle cost)。研究結果指出，溫室氣體排放量以汽油車最高，其次為混合動力電動汽車，以氫燃料電池電動汽車最低；空氣汙染物排放量以汽油車最高，全電池電動汽車與氫燃料電池電動汽車最低，低於汽油車約 84%排放量；車輛生命週期成本以氫燃料電池汽車最高，混合動力電動汽車最低。研究結果亦顯示，當碳損害成本增加，全電池電動汽車取代混合動力電動汽車最佳考量。最後建議美國運輸部門，未來將以電動汽車為替代汽油車之運具，達到減碳目標，並且對環境友善的車輛進行補貼，對環境不友善的車輛課碳稅，以利將來推動全電池電動汽車。

Shen et al.(2019) 運用能源的生命週期(well-to-wheel, WTW)比較及預估中國在 2015 年和 2030 年插電式混合動力汽車(PEV)、全電池電動汽車(BEV)、傳統汽油車(ICEV)及混合動力電動汽車(HEV)的溫室氣體排放量，據此提升中國電網在 2030 年的替代能源比例，以達成中國減排目標。研究結果顯示，隨著替代能源比例的提升，以插電式混合動力汽車(PEV)為例，溫室氣體排放量在 2030 年與傳統汽油車(ICEV)及混合動力電動汽車(HEV)相比，分別能減少約 50%-60%、10%-25%；與全電池電動汽車(BEV)相比，則是增加約 6%-37%。因此，作者建議中國在 2030 年應提升替代能源的比例，並且將全電池電動汽車(BEV)做為未來主要交通運具，以減少中國在運輸部門的溫室氣體排放量。

2.4 外部環境成本評估之文獻回顧

Galetovic & Muñoz, (2013) 利用均值成本(Levelized Cost)計算智利燃煤發電廠每度電所需的成本，並提出有無減排政策對空氣污染物質的外部健康成本及邊際收入損害成本。研究結果指出，在無減排政策情況下，PM_{2.5}的排放係數為 6.1kg/ton，造成智利人口早逝率提升，影響國家收入損害邊際成本平均約為 20,714 USD/ton；有減排政策下 PM_{2.5}的排放係數則可降為 0.2 kg/ton。因此政府應提出減排政策以有效改善發電廠的外部成本。

Tang et al. (2015)利用化學轉換模型(Chemical Transport Model, CTM)計算全球十個不同地區的人口，因為 PM_{2.5}所產生的人體健康損害係數(Human Health Damage Factors, DFs)，損害係數由失能調整生命年(Disability Adjusted Life Years, DALY)為單位表示，其中造成 PM_{2.5}主要分為三種物質，分別為黑炭及有機碳(Black Carbon and Organic Carbon, BCOC)、氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)及二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)。研究結果顯示，影響 PM_{2.5}最主要物質為黑炭及有機碳(Black Carbon and Organic Carbon, BCOC)，其損害係數為 $7.8 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ (DALY/kg)之間並隨著不同地

區人口密度而改變；氮氧化物及二氧化硫損害係數分別為 $1.2 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ (DALY/kg)、 $2.7 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$ (DALY/kg)。

Bachmann & van der Kamp (2017)以失能調整生命年(Disability Adjusted Life Years, DALY)評估空氣汙染物質(懸浮顆粒、臭氧物質)與人體健康的關聯性。其中在懸浮顆粒(PM_{2.5}、PM₁₀)研究結果，以法國發電廠為例，模擬法國電網在 2030 年提升替代能源發電量，改善傳統能源造成的空氣汙染量，並比較夏季(將太陽能發電提升至 2300MW)與冬季(降低 18:00-20:00 高峰時段電力需求)的失能調整生命年。研究結果顯示，在夏季的失能調整生命年可以減少為 0.00040 DALY，等同於減少 3.5 小時歐洲人口平均壽命；冬季為減少 0.00074 DALY，等同於減少 6.5 小時歐洲人口平均壽命。因此，提升電網替代能源發電量將有助於改善人體健康損害程度。

Gao et al. (2018)利用大氣化學研究模型(Weather Research Forecasting model coupled with Chemistry, WRF-Chem)評估中國及印度電力部門排放的空氣汙染物質與人體健康的關聯性，主要探討細懸浮微粒(PM_{2.5})對人體健康的損害程度，並計算如果降低兩國電廠的空氣汙染排放量，能夠減少的生命損失年(Year of lost, YLLs)。研究結果指出，2013 年中國及印度每年因暴露在高濃度的 PM_{2.5} 下而造成的死亡人數分別約為 130 萬人、50 萬人，其中因電廠排放而死亡人數分別約為 50 萬人、30 萬人，約佔整體死亡人數分別為 39%、33%。因此兩國皆制定空氣汙染防制相關政策，致力於改善電力部門的 PM_{2.5} 濃度。研究亦指出，如果成功降低電力部門 PM_{2.5} 濃度，將可以減少中國及印度生命損失年分別為 1500 萬年、1100 萬年。

Li et al. (2018) 假設分析比較三種情境在 2020、2025、2030 年的 PM_{2.5} 濃度、PM_{2.5} 健康及經濟損失成本。情境分別為：(1)以 2015 年為基準年不做任何減排措施；(2)減排情境，以替代能源取代煤炭，碳強度每年減少 4%；

(3)強化減排，提高替代能源比例，碳強度每年減少 5%。研究結果指出，只有情境(3)PM_{2.5} 排放濃度能下降，從 2020 年 27.51 μg/m³ 下降至 2030 年 26.5 μg/m³，且情境(1)不做任何減排措施下，在 2030 年因 PM_{2.5} 造成健康成本最高為 4049 人，死於內科疾病；經濟損失成本則為 15,513 萬人民幣。因此，作者建議北京政府應持續控制燃煤量，並且減少第二級產業比例，以利減少 PM_{2.5} 排放濃度。

2.5 小結

由文獻可以得知，近年來世界各國致力於提升電網中的替代能源使用比例，並且利用替代能源產氫，若成功達到各國制定的目標，將可以減少溫室氣體排放量；提升電網中的替代能源比例，能夠在未來使電動車、氫能車取代內燃汽車(使用傳統能源汽車)，達到真正的環境效益。

本章節整理各文獻中利用生命週期評估能源的原料開採、製造、營運與維護及退役階段，分析比較傳統能源(汽油、火力發電)、替代能源(太陽能、水力發電、風能、沼氣發電)以及氫能，評估何種替代能源有最少的碳足跡，以對交通運具最具環保效益。此外，從文獻可以得知，電力部門會排放細懸浮微粒，進而造成人體健康損害，因此評估臺灣各替代能源的細懸浮微粒排放量，分析何種替代能源有較低的外部環境健康成本。最後，本研究將回顧之文獻統整於表 2.1 至表 2.4。

表 2.1 文獻整理-替代能源產氫

作者(年份)	研究內容	研究結果
Patterson et al. (2014)	以生命週期法(life cycle assessment)分析英國使用替代能源(風能和太陽能)產氫、傳統能源(火力發電)產氫與電動汽車的環境效益。	溫室氣體排放量以替代能源產氫為最低，目前所使用之電動汽車次之，傳統能源電解法產氫最高。
Posso & Zambrano (2014)	分析委內瑞拉使用替代能源產氫的潛力，並比較太陽能、風能以及小型水力發電產氫的產量，以解決農村電能不足的問題以及減少化石燃料產氫對環境的影響。	太陽能發電產氫 1.968×10^{10} kWh/year 較高，約占 95%；其次是小型水力發電產氫 7.134×10^8 ，約占 3.4%；風能發電產氫 3.303×10^8 kWh/year 較低，約占 1.6%。
Ghandehariun & Kumar (2016)	以生命週期法之製造階段評估風力發電產氫的溫室氣體排放量並與傳統化石燃料產氫方法進行比較。探討製造四程序包含(1)風力提供電能、(2)風能產氫、(3)氫氣壓縮及(4)氫氣運輸。	風力提供電能具有最高的溫室氣體排放量(65%)，其次為氫氣壓縮(22%)和氫氣運輸(6%)；風能產氫的溫室氣體排放量低於傳統化石燃料產氫方法約 94%。
Abdin & Mérida (2019)	利用最佳化探討全球五個地區(加拿大斯闊米甚、美國洛杉磯、戈爾登、澳大利亞布里斯本、阿德萊德)使用替代能源系統(太陽能、風能、太陽能結合風能)發電及產氫的能源成本。	五大地區的太陽能結合風能較其他兩種能源有較低的發電及產氫能源成本，因此建議使用替代能源組合。
Ayodele et al. (2019)	分析奈及利亞西南部地區使用沼氣發電產氫對環境的影響，運用廚餘當作沼氣發電來源，以提高奈及利亞能源使用率與電能不足	沼氣發電的產氫量約為 41.11 萬噸，為該地區提供每年約 1,946 萬 kWh 的電力；使用氫燃料電池電動汽車，可節省每年約 7,446,000 升

問題，並比較使用氫燃料電池電動汽車與柴油汽車，計算其溫室氣體減排效果。

柴油消耗與 41,075,587 美元；溫室氣體減排方面，約可減少 16,031,000 千克 CO₂。

表 2.2 文獻整理-替代能源產電

作者(年份)	研究內容	研究結果
Quek et al. (2018)	分析新加坡利用煤、石油、天然氣、焚燒垃圾、太陽能及沼氣發電的全球暖化潛勢值(GWP)。	研究結果指出，煤有最高的全球暖化潛勢值(GWP)，其次為石油及焚燒垃圾，太陽能及沼氣的 GWP 相對低
Wakiyama & Kuriyama (2018)	基於日本國家自訂貢獻(nationally determined contribution)以及 2°C 的溫升限制目標(2°C scenario, 2DS) 評估日本各地區使用替代能源產電的潛力，並比較替代能源、核能以及化石燃料產電的碳排放。	化石燃料產電碳排放 0.55 kgCO ₂ / kWh 較高，其次為 NDC (nationally determined contribution)中替代能源 0.41 kgCO ₂ / kWh，2DS (2°C scenario)替代能源結合核能 0.17 kgCO ₂ / kWh 較低。
Danthurebandara & Rajapaksha (2019)	分析斯里蘭卡利用水力、煤、石油、太陽能及風能發電對環境的影響，並提出 2050 年五種混合發電策略(1) 25%水庫發電，7%川流發電，35%煤，31%石油，0.3%太陽能和 1.7%風能(2) 100%太陽能(3) 100%風能(4) 50%太陽能和 50%風能(5) 25%水庫發電，7%川流發電，34%太陽能和 34%風電。	五種策略中以策略(1) 2,08E+11 kg CO ₂ eq 危害最大，其次為策略(2)，以策略(5) 3,32E+09 kg CO ₂ eq 對環境最友善。
Govender et al. (2019)	評估南非沼氣發電的財務與經濟可行性，比較三種策略(1)僅由石化公司投入產出(2)制定	策略(1)較不具財務可行性，策略(3)有較高財務可行性，因其參照德國沼氣技術制定電價。

南非替代能源獨立電力生產商採購計劃 (REIPPPP)與碳稅法案(3)參照德國沼氣技術		
Orfanos, Mitzelos, Sagani, & Dedoussis (2019)	分析及預測希臘產電對環境的影響，並比較 2016 至 2030 年火力發電與替代能源(太陽能、風能、水力、沼氣)產電比例	2016 年希臘全球暖化潛勢(GWP)為每一千瓦產生約 685 gr-CO ₂ eq/ kWh，預估 2020 年希臘每一千瓦產生約 571 gr-CO ₂ eq/ kWh，2030 年約 433 gr-CO ₂ eq/ kWh 分別較 2016 年減少 17%及 37%，因替代能源產電比例從 2016 年 21%，提升到 2020 年 30%，2030 年 49%，大量取代火力發電。
Li. et al (2020)	運用生命週期法及假設情境，分析中國風力發電減碳效益	生產階段碳排放最高(70.61%)，其次是建造階段(13.85%)，營運階段最低(1.75%)，且假設情境下，低風力發電削減率且高回收率，最具減碳效益

表 2.3 文獻整理-應用生命週期法評估低碳排汽車之碳足跡

作者(年份)	研究內容	研究結果
Burchart-Korol et al. (2018)	分析以及預測波蘭與捷克 2015 年到 2050 年電動汽車對環境的影響，並與使用汽油汽車進行比較。運用生命週期法分析電動汽車與汽油汽車的製造、營運及除役三階段之碳足跡	2050 年使用替代能源為電池充電來源，將能夠大規模減少溫室氣體排放，預測波蘭可減少至 25,837 CO ₂ eq；捷克可減少至 21,988 CO ₂ eq，較 2015 年分別各減少 60.5%，31.5%
Raugei, Hutchinson, & Morrey (2018)	運用生命週期法評估電動汽車採購原料、製造、使用與回收等四階段的傳統能源總需求	以情境(2)天然氣發電的傳統能源總需求 7.9 MJ (nr-PE) / kWh (electricity) 較高，其次

	(non-renewable cumulative energy demand, nr-CED)，並比較電動汽車使用階段三種供電情境(1)預期 2035 年英國電網發電(減少煤炭及天然氣發電)(2)天然氣發電(3)替代能源發電	為情境(1)預期 2035 年英國電網發電 5.0 MJ (nr-PE) / kWh (electricity)，情境(3)替代能源發電 0.2 MJ (nr-PE) / kWh (electricity) 較低。
Lee et al. (2018)	運用生命週期法評估氫燃料電池電動卡車的開採氫能原料、產氫、壓縮氫氣(分為氣態氫氣、液態氫氣)及運送氫氣等四個部分的溫室氣體排放及空氣汙染物。	壓縮氫氣中的氣態氫氣為例，使用氫燃料電池電動卡車相對傳統使用柴油卡車，可減少溫室氣體排放量約 19-45%、VOC 約 37-65%；CO 約 49-77%；NO _x 約 62-83%；PM ₁₀ 約 19-43%；PM _{2.5} 約 27-44%。
Ahmadi (2019)	車輛與燃料生命週期排放(Lifecycle emissions)(Lifecycle cost)比較美國混合動力電動汽車(HEV)、插電式混合動力汽車(PHEV)、全電池電動汽車(BEV)、氫燃料電池電動汽車(FCEV)與汽油車(ICE)的溫室氣體排放與空氣汙染物排放。	研究結果指出，溫室氣體排放量以汽油車最高，其次為混合動力電動汽車，以氫燃料電池電動汽車最低；空氣汙染物排放量以汽油車最高，全電池電動汽車與氫燃料電池電動汽車最低，低於汽油車約 84%排放量；
Shen et al. (2019)	運用能源的生命週期(well-to-wheel, WTW)比較及預估中國在 2015 年和 2030 年插電式混合動力汽車(PEV)、全電池電動汽車(BEV)、傳統汽油車(ICEV)及混合動力電動汽車(HEV)的溫室氣體排放量。	隨著替代能源比例的提升，以插電式混合動力汽車(PEV)為例，溫室氣體排放量在 2030 年與傳統汽油車(ICEV)及混合動力電動汽車(HEV)相比，分別能減少約 50%-60%、10%-25%；與全電池電動汽車(BEV)相比，則是增加約 6%-37%。

表 2.4 文獻整理-外部環境成本評估

作者(年份)	研究內容	研究結果
Tang et al. (2015)	化學轉換模型(Cheical Transport Model, CTM)計算 PM _{2.5} 所產生的人體健康損害係數 (Human Health Damage Factors, DFs)，損害係數由失能調整生命年(Disability Adjusted Life Years, DALY)為單位表示。	影響 PM _{2.5} 最主要物質為黑炭及有機碳(Black Carbon and Organic Carbon, BCOC)，其損害係數為 $7.8 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-3}$ (DALY/kg) 之間並隨著不同地區人口密度而改變。
Bachmann & van der Kamp (2017)	以失能調整生命年(Disability Adjusted Life Years, DALY)模擬法國電網在 2030 年提升替代能源發電量，改善傳統能源造成的空氣汙染量，並比較夏季(將太陽能發電提升至 2300MW)與冬季(降低 18:00-20:00 高峰時段電力需求)的失能調整生命年。	夏季的失能調整生命年可以減少為 0.00040 DALY，等同於減少 3.5 小時歐洲人口平均壽命；冬季為減少 0.00074DALY，等同於減少 6.5 小時歐洲人口平均壽命
Gao et al. (2018)	以大氣化學研究模型(Weather Research Forecasting model coupled with Chemistry, WRF-Chem)評估中國及印度電力部門排放的空氣汙染物質與人體健康的關聯性。	2013 年中國及印度每年因暴露在高濃度的 PM _{2.5} 下排放而死亡人數分別約為 50 萬人、30 萬人，約佔整體死亡人數分別為 39%、33%。若成功降低電力部門 PM _{2.5} 濃度，將可以減少中國及印度生命損失年分別為 1500 萬年、1100 萬年。
Galetovic & Muñoz, (2013)	智利燃煤發電廠排出的空氣汙染物質之外部健康成本及邊際收入損害成本。	PM _{2.5} 的排放係數為 6.1kg/ton，造成智利人口早逝率提升，影響國家收入損害邊際成本平均約為 20,714 USD/ton。

Li et al., (2018)	假設分析比較三種情境在 2020、2025、2030 年的 PM _{2.5} 濃度、PM _{2.5} 健康及經濟損失成本。情境為(1)2015 年為基準年不做任何減排措施(2)減排情境，以替代能源取代煤炭，碳強度每年減少 4%(3)強化減排，提高替代能源比例，碳強度每年減少 5%	只有情境(3)PM _{2.5} 排放濃度能從 2020 年 27.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 2030 年 26.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；情境(1)不做任何減排措施下，在 2030 年因 PM _{2.5} 造成健康成本最高為 4049 人，死於內科疾病；經濟損失成本則為 15,513 萬元。
-------------------	--	--



第三章 研究方法

本章節研究方法共有三小節，第一節為介紹碳足跡評估方法；第二節為變數、參數以及模型設定並繪製製成地圖；第三節為本章之小結。

3.1 碳足跡評估方法

根據國際標準學會(International Organization for Standardization, ISO)所發布 ISO14040 系列為生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)之相關規範，制訂 LCA 應用在環境管理上的標準評估架構及步驟；ISO14060 系列用於量化，監視，報告和驗證溫室氣體排放量，以達到低碳經濟，其中 ISO14067:2018<溫室氣體-產品的碳足跡-量化要求和準則>取代技術規範 ISO/TS 14067:2013，量化產品的碳足跡和報告，並公布全球準則，為各組織提供一種計算其產品碳足跡的方法，以更好了解其減少碳足跡的方式。此外，關於碳足跡詳細計算流程將依據英國標準協會(British Standards Institution)發布 PAS 2050:2011<產品與服務生命週期階段之溫室氣體評估標準> 檢視由原料取得、製造、運輸、銷售、使用以及廢棄階段過程所直接與間接產生的溫室氣體排放量。因此，本研究之碳足跡評估方法，將以 ISO 標準系列之生命週期評估架構(ISO14040、ISO14067:2018) 為主軸，部分內容輔以 PAS2050:2011，依序介紹生命週期評估法、碳足跡、碳足跡計算流程及碳足跡評估軟體。

3.1.1 生命週期評估法

生命週期評估法(Life Cycle Assessment, LCA)為產品或服務從原料取得、製造、配送銷售、使用到廢棄處理回收等生命週期過程中，各項投入與產出對環境的潛在衝擊的最普遍工具之一。根據國際標準學會(International Organization for Standardization, ISO)所發布的 ISO 14040 系列

《環境管理-生命週期評估-原則與架構》(ISO,2006)，生命週期評估架構包含了四個步驟，分別為目的與範疇界定(goal and scope definition)、生命週期盤查分析(Life cycle Impact inventory analysis)、生命週期衝擊(Life cycle Impact Assessment)分析及生命週期闡釋(Life cycle Interpretation)，其詳細步驟及架構圖如下：

1. 目的與範疇界定：包括系統邊界和詳細程度，主要為明確定義產品或服務的邊界範圍。
2. 生命週期盤查分析：將產品系統的生命週期所有的投入與產出進行量化計算。
3. 生命週期衝擊分析：利用盤查分析結果，評估整個產品系統對潛在環境衝擊規模及顯著性。
4. 生命週期闡釋：將盤查分析或衝擊分析或者二者和一，依據所訂定之目標和範疇界定進行評估整合一致性，以得出結論和建議。

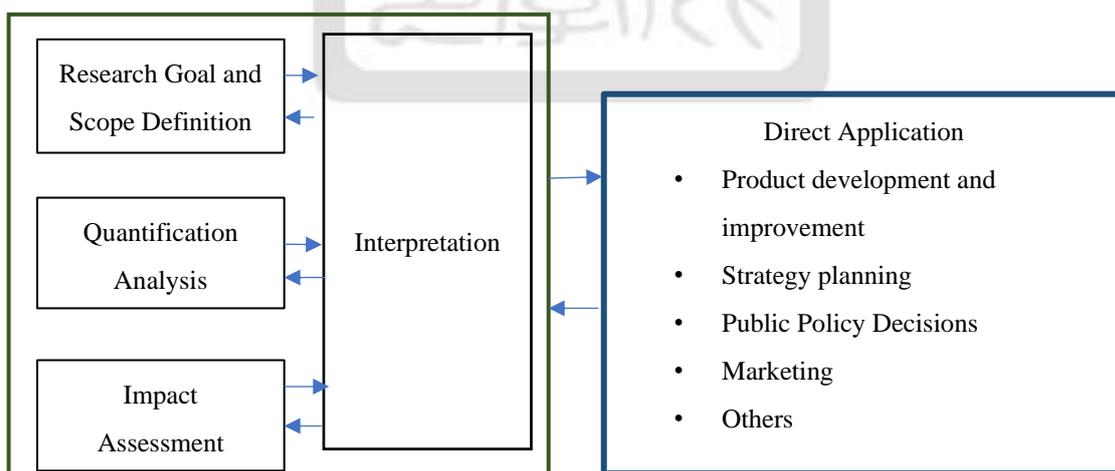


圖 3.1 生命週期評估架構

資料來源：ISO(2006)

3.1.2 碳足跡

碳足跡(Carbon Footprint)可被定義為與一項活動(Activity)或產品的整個生命週期過程所直接與間接產生的溫室氣體排放量。相較於一般大家瞭解的溫室氣體排放量，碳足跡的差異之處在於從消費者端出發，企業及產業溫室氣體的排放，一般是指製造部分相關的排放，但產品碳足跡排放尚須包含產品原物料的開採與製造、組裝、運輸，一直到使用及廢棄處理或回收時所產生的溫室氣體排放量。面對全球暖化的問題，若僅著眼於自己國家碳排放的削減，並不足以因應當前的狀況。採用碳足跡的概念，將產品、個人或企業活動的相關溫室氣體排放量納入考量時，才能達到低碳生活以及減量計畫，否則可能僅導致污染源轉移，實質上並未減量的假象。因此碳足跡已成為全球達到溫室氣體減量目標的工具之一。(行政院環境保護署，2019)

根據國際標準學會(International Organization for Standardization, ISO)為產品碳足跡的量化和報告訂定 ISO 14067:2018 《溫室氣體-產品的碳足跡-量化要求和準則》(ISO,2018)，其為 ISO 14060 標準系列的一部分，用於量化、監測、報告和查證溫室氣體排放，以達到低碳經濟的目標。此外根據 ISO 14067:2018 之規範，其亦針對電力排放係數，量化使用替代能源的溫室氣體排放碳足跡，也進行分析及查證。因此本研究依循 ISO 14067:2018 之規範探討相關替代能源之碳足跡。

3.1.3 碳足跡計算流程

依據 PAS2050:2011<產品與服務生命週期階段之溫室氣體評估標準>，檢視原料取得、製造、運輸、銷售、使用以及廢棄階段過程所直接與間接產生的溫室氣體排放量。PAS2050:2011 依據 ISO 14040 提供計算碳足跡五大步驟，流程步驟如下說明，流程圖如圖 3.2 所示：

1. 繪製製成地圖：繪製產品生命週期，從原料到回收，包含所有材料流、能源流及廢棄物流。
2. 確定邊界：確定生命週期邊界與盤查優先順序
3. 收集數據：收集已鑑別生命週期邊界溫室氣體數據，包含一級數據或從生命週期資料庫獲得的二級數據。
4. 計算碳足跡：將蒐集的數據帶入碳足跡模型中，加總計算並得到產品碳足跡。
5. 不確定性分析：透過不確定性分析，評估碳足跡分析的正確性。

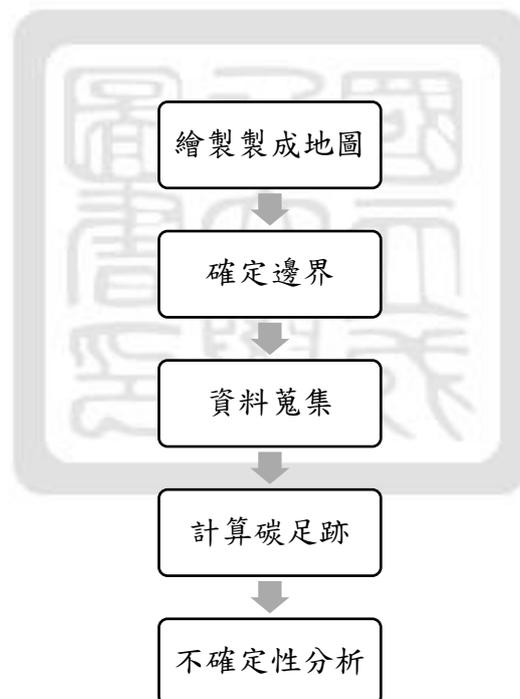


圖 3.2 碳足跡計算流程

資料來源：BSI (2008)

3.1.4 碳足跡評估軟體

本研究排放係數使用 SimaPro9.0 生命週期評估工具，該軟體為生命週期評估重要的資料庫，在 80 個國家的工業界及學術界已享有 25 年的使用。SimaPro 是收集、分析和盤查公司產品或服務的永續性數據的專業軟體。該軟體可用於多種應用，例如永續性報告，碳和水足跡，產品設計，生成環境產品聲明並確定關鍵性能指標。以系統和透明的方式輕鬆建模及分析複雜的生命週期。在所有生命週期階段衡量產品或服務對環境的影響。並確定各個環節中，從原材料提取到製造，運輸，使用及回收的環境效益。(Simapro)

Simapro 最大特色是整合不同單位的資料庫，將不同來源資料分析及儲存，且來源清楚，對環境衝擊評估可利用不同的特徵化、標準化及權重的方法，使用者不須花過多時間了解生命週期評估過程，便能以生命週期的觀念來設計產品。

3.2 變數、參數以及模型設定

3.2.1 製成地圖及系統邊界

本論文欲探討七種不同能源之製成地圖如圖 3.3-圖 3.9。本論文探討七種能源完整生命週期之碳足跡，其生命週期邊界為搖籃到墳墓(Cradle to Crave)。生命週期階段包含原料與製造階段、營運與維護階段、退役階段。在原物料取得階段主要是包含製造階段所需要的原物料；營運與維護階段包含電力使用及器材的維護及保養；最後退役階段包含設備和零組件的回收再利用。

(1)汽油

本研究汽油生命週期製成地圖根據 Restianti and Gheewala (2012)； de Souza et al. (2018)，如圖 3.3 所示。在原物料開採階段為提煉汽油的設備所需的原物料，包含原油、燃油、煉油氣、混合氣及水；在製造階段為提煉氣油系統及儲存汽油系統；在營運及維護階段，由於材料消耗難以蒐集，因此只包含汽油使用；在退役階段包含汽油的設備和零組件回收再利用。

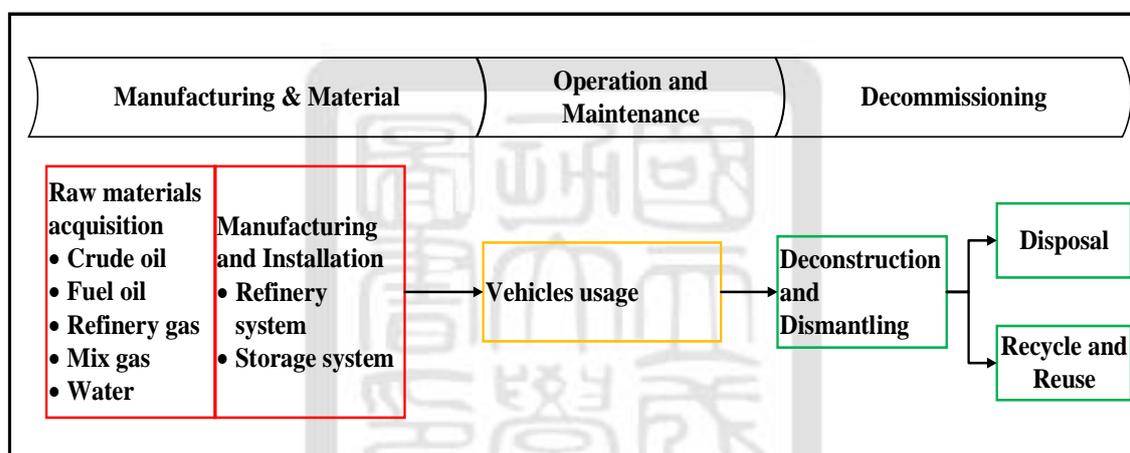


圖 3.3 汽油各階段生命週期製成地圖

(2)火力燃煤發電

本研究火力燃煤發電生命週期製成地圖根據 Liang et al. (2013); Odeh & Cockerill (2008a, 2008b)，如圖 3.4 所示。在原物料開採階段為製造火力發電的設備所需的原物料，包含煤、鋼、水泥、鋁、水及以鐵；在製造階段為製造及裝設燃料裝置、蒸氣系統、冷卻系統、電力製造系統；在營運及維護階段，由於材料消耗難以蒐集，因此只包含電力使用；在退役階段包含火力發電的設備和零組件回收再利用。

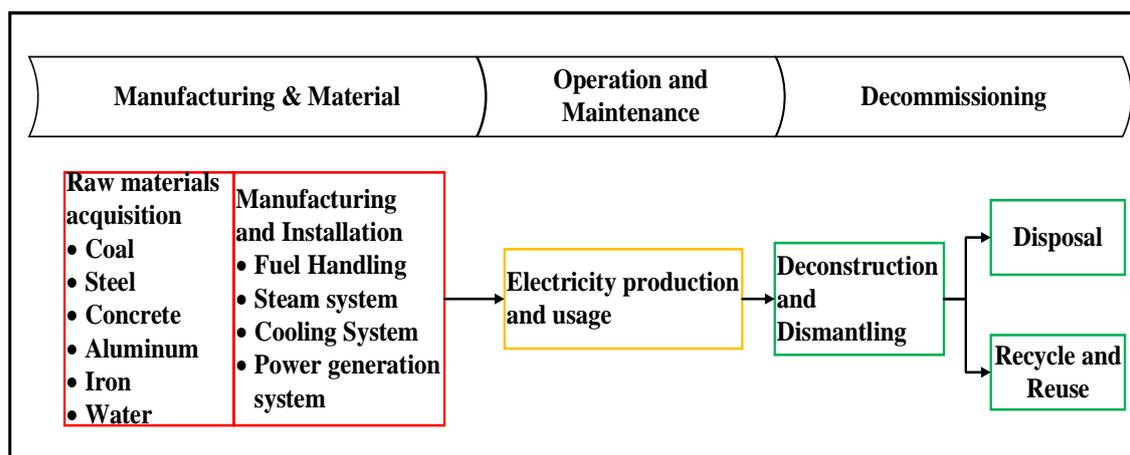


圖 3.4 火力發電各階段生命週期製成地圖

(3)天然氣發電

本研究天然氣發電生命週期製成地圖根據 Agrawal et al. (2013)、Ruether et al.(2004)、National Energy Technology Laboratory(2010)，如圖 3.5 所示。

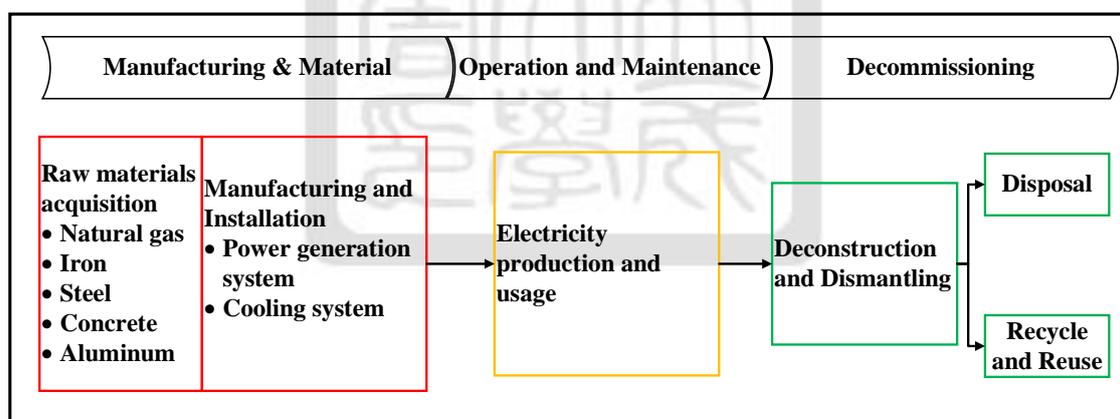


圖 3.5 天然氣發電各階段生命週期製成地圖

(4)風力發電

本研究風力發電生命週期製成地圖根據 C.-k. Gao et al.(2019); Wang et al.(2019)，如圖 3.6 所示。

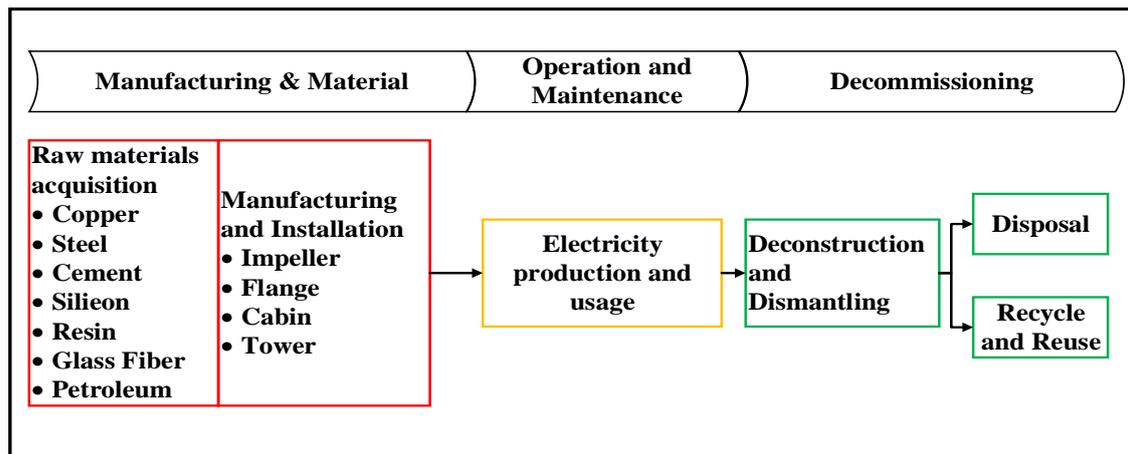


圖 3.6 風力發電各階段生命週期製成地圖

(5) 太陽能發電

本研究太陽能發電生命週期製成地圖根據 Wu et al. (2017) ; Stoppato, (2008) , 如圖 3.6 所示。

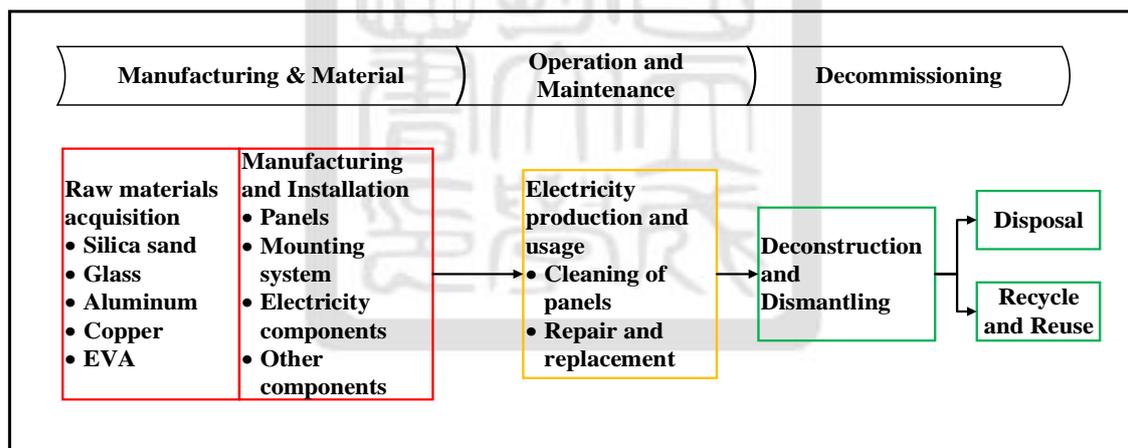


圖 3.7 太陽能發電各階段生命週期製成地圖

(6) 水力發電

本研究水力發電生命週期製成地圖根據 Verán-Leigh & Vázquez-Rowe, (2019); Wang et al.(2019) , 如圖 3.7 所示。

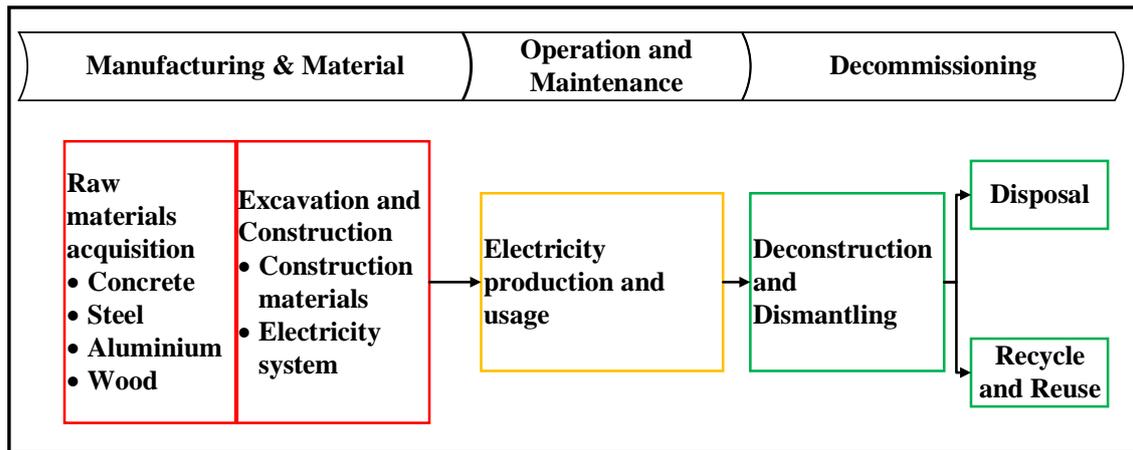


圖 3.8 水力發電各階段生命週期製成地圖

(7) 氫能

本研究產氫生命週期製成地圖根據 Ghandehariun (2016)，基於風力發電產生氫能，如圖 3.9 所示。

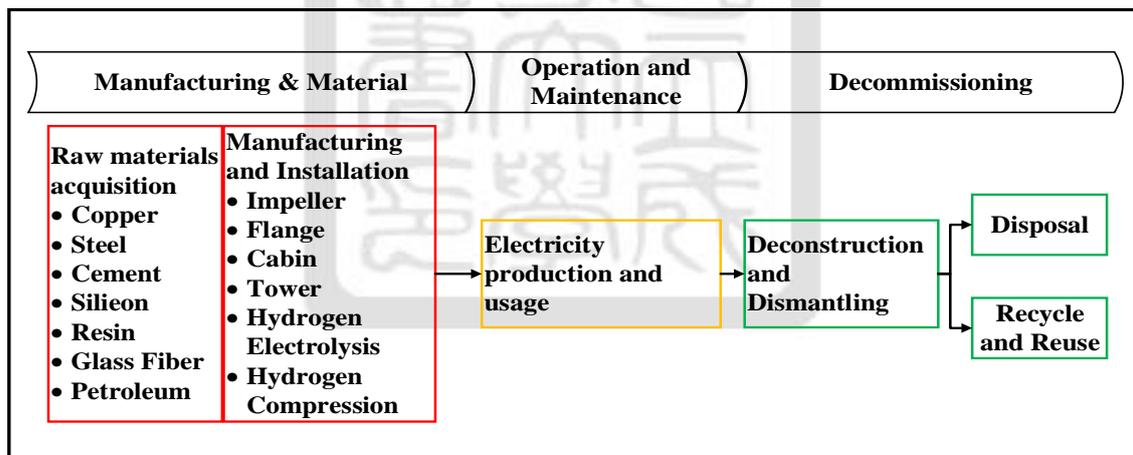


圖 3.9 風力發電產氫各階段生命週期製成地圖

3.2.2 模型變數及排放係數說明

表 3.1 變數說明

Index	Description	Unit
i	能源類別, $i = 1 \sim 7$, $i = 1$ 為風力發電, $i = 2$ 為水力發電, $i = 3$ 為太陽能發電, $i = 4$ 為火力發電, $i = 5$ 為天然氣發電, $i = 6$ 為氫能, $i = 7$ 為汽油	
j	能源生命週期階段, $j = 1, 2, 3$, $j = 1$ 為原料與製造階段, $j = 2$ 為營運與維護階段, $j = 3$ 為退役階段	
Parameters	Description	Unit
GEF_{ij}	Green house gas Emission Factor 第 i 能源 j 階段溫室氣體排放係數	g/MJ
$TGEF_i$	Total Green house gas Emission Factor 第 i 能源總溫室氣體排放係數	g/MJ
GWP	Global Warming Potential 全球暖化潛勢係數	
PEF_{ij}	$PM_{2.5}$ Emission Factor 第 i 能源 j 階段細懸浮微粒排放係數	g/MJ
$TPEF_i$	Total $PM_{2.5}$ Emission Factor 第 i 能源生命週期細懸浮微粒總排放係數	g/MJ
$Factor_H$	External Environmental Health Cost Factor 外部環境健康成本係數	DALY/kg
Variables	Description	Unit
AD_i	Activity Data 第 i 能源活動數據	每兆焦耳 MJ
CF_i	Carbon Footprint 第 i 能源碳足跡	二氧化碳當量 gCO ₂ e
GE	Global Warming Emission 私有運具溫室氣體排放量	萬公噸 (Ten thousand tons)
PE	$PM_{2.5}$ Emission 私有運具細懸浮微粒排放量	公噸 Ton
EHC	External Environmental Health Cost 私有運具外部環境健康成本	DALY

3.2.3 模型建立

本研究使用生命週期評估法，來計算私有運具中七種不同能源使用的環境成本效益，主要探討溫室氣體與細懸浮微粒之排放，並且分析台灣2030年《國家自定預期貢獻(INDC)》與2050年《溫室氣體減量管理法》達成度。

(1) 生命週期碳足跡溫室氣體排放計算模型

碳足跡計算納入京都議定書所規範之六種溫室氣體為二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、全氟碳化物(PFCs)、氫氟碳化物(HFCs)、六氟化硫(SF₆)。本研究計算單位為gCO₂e，其中非CO₂之其他溫室氣體，用全球暖化潛勢係數(Global Warming Potential, GWP)轉換為CO₂e計算之，研究中溫室氣體排放係數主要來源為Simapro9.0資料庫。計算模型如下：

$$TGEF_i = \sum_{j=1}^3 GEF_{ij}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, 7\} \quad (3.1)$$

$$CF_i = AD_i \times TGEF_i \times GWP \quad (3.2)$$

其中：

$TGEF_i$ ：第*i*能源總溫室氣體排放係數，以每兆焦耳產生多少公克(g/MJ)為單位

GEF_{ij} ：第*i*能源*j*階段溫室氣體排放係數，以每兆焦耳產生多少公克(g/MJ)為單位

CF_i ：第*i*能源碳足跡溫室氣體排放，以二氧化碳當量(gCO₂e)為單位

AD_i ：第*i*能源活動數據，以兆焦耳(MJ)為單位

GWP ：全球暖化潛勢係數

(2) 私有運具溫室氣體排放模型

本研究私有運具溫室氣體排放，首先以私有運具耗油量為基準，經由熱值轉換，得知臺灣私有運具所需能源(MJ)，再依據低排放車輛取代汽油車之比例以及相對應之能源比例為活動數據，與各能源總溫室氣體排放係數相乘即可得知私有運具溫室氣體排放，計算模型如下：

$$GE = AD_i \times TGEF_i, \quad \forall_i \in \{1,2 \dots 7\} \quad (3.3)$$

GE ：私有運具溫室氣體排放量，以萬公噸(Ten thousand tons)為單位

AD_i ：第*i*能源活動數據，以兆焦耳(MJ)為單位

$TGEF_i$ ：第*i*能源生命週期溫室氣體總排放係數，以每兆焦耳產生多少公克(g/MJ)為單位

(3) 私有運具細懸浮微粒排放模型

本研究私有運具細懸浮微粒排放，首先以私有運具耗油量為基準，經由熱值轉換，得知臺灣私有運具所需能源(MJ)，再依據低排放車輛取代汽油車之比例以及相對應之能源比例為活動數據，與各能源總細懸浮微粒排放係數相乘即可得知私有運具細懸浮微粒排放，計算模型如下：

$$TPEF_i = \sum_{j=1}^3 PEF_{ij}, \quad \forall_i \in \{1,2 \dots 7\} \quad (3.4)$$

$$PE = AD_i \times TPEF_i \quad (3.5)$$

其中：

$TPEF_i$ ：第*i*能源生命週期細懸浮微粒總排放係數，以每兆焦耳產生多少公克(g/MJ)為單位

PEF_{ij} ：第*i*能源*j*階段細懸浮微粒排放係數，以每兆焦耳產生多少公克(g/MJ)為單位

PE ：私有運具細懸浮微粒排放量，以公噸(ton)為單位

AD_i ：第*i*能源活動數據，以兆焦耳(MJ)為單位

(4) 私有運具外部環境健康成本模型

本研究之健康層面參考細懸浮微粒外部環境健康成本係數(External Environmental Health Cost Factor, $Factor_H$)並已失能調整生命年(Disability-Adjusted Life Year, DALY)為外部環境健康成本(External Environmental Health Cost, EHC)之單位。外部環境健康成本係數主要來源為 Simapr9.0 資料庫。評估模型如下：

$$EHC = PE \times Factor_H \quad (3.6)$$

其中：

EHC ：私有運具外部環境健康成本，以 DALY 為單位

PE ：私有運具細懸浮微粒排放量，以公噸(ton)為單位

$Factor_H$ ：外部環境健康成本係數，以 DALY/kg 為單位

3.3 小結

本章研究方法共有三小節，首先以碳足跡模型，研究比較七種能源之環境效益；再進一步透過《國家預期自訂貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範，評估私有運具使用替代能源是否能落實 2030 及 2050 溫室氣體排放規範，最後根據私有運具細懸浮微粒排放量，及利用失能調整生命年(Disability-Adjusted Life Year, DALY)評估私有運具的 PM_{2.5} 的外部環境健康成本。

第四章 實證分析

本章節研究方法共有四小節，第一節為介紹各能源之生命週期溫室氣體排放；第二節為臺灣私有運具溫室氣體減排策略，運用第一節之溫室氣體排放係數結果，探討私有運具溫室氣體排放量；第三節為 PM_{2.5} 排放量與外部健康成本，運用第二節之減排策略成果，探討私有運具之 PM_{2.5} 排放量及外部環境健康之成本；第四節為本章之小結。

4.1 各能源生命週期碳足跡之溫室氣體排放量

本研究欲探討臺灣私有運具的溫室氣體減排效果，以私有運具之能源(汽油、電能及氫能)為生命週期碳足跡之溫室氣體排放分析對象。研究範圍包含原料與製造階段、營運與維護階段及退役階段；功能單位為每兆焦耳產生的二氧化碳當量(gCO₂e/MJ)，並將活動數據設定為 1MJ，進行各能源溫室氣體排放分析。

4.1.1 風力發電

本研究根據曾詠恩(2005)、Schleisner (2000)及 Simapro9.0 為風力發電的資料來源。此研究選擇臺灣三座風力發電廠麥寮、中屯、春風作為研究標的。

在原料與製造階段，包含風力機、塔座及風力發電機組，三座電廠的風力機所需的原料為鋼鐵、鋁、銅、玻璃、塑膠、石油產品及其他；塔座所需的原料為鋼筋、混凝土；風力發電機組建造的原料為混凝土、鋼筋製品。此階段排放係數為每兆焦耳 0.98 g 二氧化碳當量(0.98 gCO₂e/MJ)。

在營運與維護階段，包含維修及保養，所需的原料為維修的潤滑油、漆料及維修機具，根據 Simapro9.0 數據庫的資料，此階段排放係數為每兆焦耳 0.02 g 二氧化碳當量(0.02 gCO₂e/MJ)。

在退役階段，風力發電材料約 94%可回收再利用，僅 6%材料需再處置，並根據 Schleisner (2000)，退役階段為製造及原料階段 2%。此階段排放係數為每兆焦耳 0.02 g 二氧化碳當量(0.02 gCO_{2e}/MJ)。

綜合以上，整理出風力發電的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出風力發電溫室氣體排放，如表 4.1。其中原料與製造階段佔整體生命週期 96%，因製造風力發電廠所需的原料產生較大的排放，因此未來若要降低風力發電之排放，應降低原料與製造階段的原料量。

表 4.1 風力發電三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO _{2e} /MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO _{2e})
Manufacturing & Material	0.98	1MJ	0.98
Operation & Maintenance	0.02		0.02
Decommissioning	0.02		0.02

資料來源：本研究整理

4.1.2 水力發電

本研究根據 Atilgan, Azapagic(2016)、Simapro9.0 及 ESU-services Ltd(2012)為水力發電的資料來源。本研究之水力發電為川流式發電。

在原料與製造階段，包含建造川流水力發電廠，所需的原料為水泥、鋼、碎石、混凝土及銅，川流式水力發電主要排放來自於建廠階段。此階段排放係數為每兆焦耳 1.1275g 二氧化碳當量(1.1275 gCO_{2e}/MJ)。

在營運與維護階段，因為水的儲存時間短，因此排放量極低，根據 Simapro9.0 數據庫的資料，此階段排放係數為每兆焦耳 0.0045g 二氧化碳當量(0.0045 gCO₂e/MJ)。

在退役階段，根據 ESU-services Ltd(2012)，僅有混凝土中的非鋼筋混凝土需要處置，其餘皆可以百分之百回收。此階段排放係數為每兆焦耳 0.01g 二氧化碳當量(0.01 gCO₂e/MJ)。

綜合以上，整理出水力發電的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出水力發電溫室氣體排放，如表 4.2。其中原料與製造階段佔整體生命週期 99%，因製造水力發電廠所需的原料產生較大的排放，因此未來若要降低水力發電之排放，應降低原料與製造階段的原料量。

表 4.2 水力發電三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	1.13	1MJ	1.13
Operation & Maintenance	0.0045		0.0045
Decommissioning	0.01		0.01

資料來源：本研究整理

4.1.3 太陽能發電

本研究根據 Hondo(2005)及 Simapro9.0 為太陽能發電的資料來源。此研究選擇多晶矽屋頂型太陽能光電板(3 Kw)作為研究標的。

在原料與製造階段，包含太陽能電板、鉛酸電池、支撐結構及電纜線，所需的原料為鋼、玻璃、鋁、EVA、鉛、氧化鉛、硫酸鉛、銅。此階段排放係數為每兆焦耳 11.42g 二氧化碳當量(11.42 gCO₂e/MJ)。

在營運與維護階段，主要為維護與維修兩部分，根據 Simapro9.0 數據庫的資料，此階段排放係數為每兆焦耳 0.00119g 二氧化碳當量(0.00119gCO₂e/MJ)。

在退役階段，由於太陽能發電系統回收會產生大量的廢棄物，因此根據 Hondo(2005)，此階段排放係數為每兆焦耳 0.45g 二氧化碳當量(0.45gCO₂e/MJ)。

綜合以上，整理出太陽能發電的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出太陽能發電溫室氣體排放，如表 4.3。其中原料與製造階段佔整體生命週期 96%，因製造太陽能發電所需的原料多，產生較大的排放，並且退役後不可回收物也多，因此在選擇太陽能發電的原料上需加以考量其環保性。

表 4.3 太陽能發電三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	11.42	1MJ	11.42
Operation & Maintenance	0		0
Decommissioning	0.45		0.45

資料來源：本研究整理

4.1.4 火力燃煤發電

本研究根據吳宗翰(2010)、Odeh et al.(2008)、GREET2019 及 Simapro9.0 為火力燃煤發電的資料來源。

在原料與製造階段，包含煤礦開採、火力燃煤發電廠建廠所需設備。在煤礦開採上，所需原料為進口煤礦，排放係數為每兆焦耳 5.79g 二氧化碳當量(5.79gCO₂e/MJ)；在火力燃煤發電廠建廠設備上，所需原料為鋼、水泥、鋁，排放係數為每兆焦耳 1.0 g 二氧化碳當量(1.0gCO₂e/MJ)。因此此階段總排放係數為每兆焦耳 6.79 g 二氧化碳當量(6.79gCO₂e/MJ)

在營運與維護階段，包含電廠運轉發電，所需原料為煙煤、亞煙煤、燃料油、柴油、天然氣及冷媒，使火力燃煤發電在運轉發電上產生大量溫室氣體。根據 Simapro9.0 數據庫的資料，此階段排放係數為每兆焦耳 265.07 g 二氧化碳(265.07gCO₂e/MJ)。

在退役階段，根據 Odeh et al.(2008)，退役階段為製造階段的 10%，此階段排放係數為每兆焦耳 0.1 g 二氧化碳當(0.1gCO₂e/MJ)。

綜合以上，整理出火力燃煤發電的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出火力燃煤發電溫室氣體排放，如表 4.4。其中營運與維護佔整體生命週期 97%，因火力燃煤發電廠運轉產電，能耗大，產生較大的排放，因此在營運火力燃煤發電廠需加以考量其環保性。

表 4.4 火力燃煤發電三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	6.79	1MJ	6.79
Operation & Maintenance	265.07		265.07
Decommissioning	0.1		0.1

資料來源：本研究整理

4.1.5 天然氣發電

本研究根據 Agrawal et al. (2013)、National Energy Technology Laboratory(2010)及 Simapro9.0 為天然氣發電的資料來源。此研究為天然氣複循環發電技術 (Nature Gas Combined Cycle, NGCC) 為研究標的，計算天然氣發電整個生命週期溫室氣體排放量。

在原料與製造階段，包含天然氣製造、天然氣建廠所需設備。在天然氣製造上，根據 Agrawal et al. (2013)所需原料為進口天然氣，排放係數為每兆焦耳 35.83g 二氧化碳當量(35.83gCO₂e/MJ)；在天然氣建廠設備上，根據 Ruether et al.(2004)，建廠約為營運與維護階段的 0.47%，排放係數為每兆焦耳 0.48 g 二氧化碳當量(0.48gCO₂e/MJ)。因此此階段總排放係數為每兆焦耳 36.31 g 二氧化碳當量(36.31gCO₂e/MJ)

在營運與維護階段，包含電廠運轉發電，根據 Simapro9.0 數據庫的資料，天然氣發電在運轉發電上產生大量溫室氣體，排放係數為每兆焦耳 101.30g 二氧化碳(101.30gCO₂e/MJ)。

在退役階段，根據 National Energy Technology Laboratory(2010)，退役階段為製造階段的 10%，此階段排放係數為每兆焦耳 0.048 g 二氧化碳當 (0.048gCO₂e/MJ)。

綜合以上，整理出天然氣發電的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出天然氣發電的溫室氣體排放，如表 4.5。其中營運與維護佔整體生命週期約 74%，因天然氣發電廠運轉產電，能耗大，產生較大的排放，因此在營運天然氣發電廠需加以考量其環保性。

表 4.5 天然氣發電三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	36.31	1MJ	36.31
Operation & Maintenance	101.30		101.30
Decommissioning	0.048		0.048

資料來源：本研究整理

4.1.6 氫能

本研究根據 Ghandehariun & Kumar (2016)及 4.1.1 小節的風力發電為氫能的資料來源。此研究選擇用風力發電產氫來當作研究標的。

在原料與製造階段，包含風力發電廠的原料、建造以及水電解產氫、壓縮氫氣。水電解產氫需要較高的耗電及耗水量；壓縮氫氣所需材料為鐵、潤滑油、鋁、銅及電力。此階段排放係數為每兆焦耳 2.37 g 二氧化碳當量 (2.37 gCO₂e/MJ)。營運與維護階段及退役階段如 4.1.1 小節的風力發電的排

放係數。

綜合以上，整理出氫能的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出氫能溫室氣體排放，如表 4.6。其中原料與製造階段佔整體生命週期 98%，因利用風力發電產氫所需的原料及步驟繁雜，產生較大的排放。

表 4.6 氫能三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	2.37	1MJ	2.37
Operation & Maintenance	0.02		0.02
Decommissioning	0.02		0.02

資料來源：本研究整理

4.1.7 汽油

本研究根據 GREET2019 及經濟部能源局(2019)為汽油的資料來源。本研究之汽油為混合汽油(Gasoline Blendstock)。

在原料與製造，包含原油的開採、原油運輸、原油提煉成汽油及汽油至加油站。在原油開採及運輸上，需鑽油井、開採原油以及處理原油，此階段排放係數為每兆焦耳 6.54g 二氧化碳當量(6.54gCO₂e/MJ)；在原油提煉成汽油及汽油至加油站上，需進行蒸餾處理，此階段排放係數為每兆焦耳 12.6 g 二氧化碳當量(12.6gCO₂e/MJ)。因此此階段總排放係數為每兆焦耳 19.14 g 二氧化碳當量(19.14gCO₂e/MJ)

在營運與維護階段為使用於車輛燃油的排放因子，根據經濟部能源局(2019)。此階段排放係數為每兆焦耳 69.3g 二氧化碳當量(69.3gCO₂e/MJ)。在退役階段，汽油無回收，因此不探討其排放。

綜合以上，整理出汽油的原料與製造、營運與維護及退役三階段的排放係數，並將活動數據假設為 1MJ，得出汽油溫室氣體排放，如表 4.7。其中因汽油產生的溫室氣體排放量大，因此營運與維護階段佔整體生命週期 78%。

表 4.7 汽油三階段溫室氣體排放

	Emission Factor (gCO ₂ e/MJ)	Activity Data	GHG Emissions (gCO ₂ e)
Manufacturing & Material	19.14	1MJ	19.14
Operation & Maintenance	69.3		69.2
Decommissioning	0		0

資料來源：本研究整理

4.1.8 綜合比較

總結各能源於各生命週期階段之比較，詳如圖 4.1 及表 4.8。研究結果顯示，替代能源主要溫室氣體排放來自於原料與製造階段；傳統能源主要溫室氣體排放來自於營運與維護階段。替代能源中又以風力發電溫室氣體排放最低(1.02 gCO₂e)，其次為川流式水力發電(1.14 gCO₂e)，太陽能發電為最高(11.86 gCO₂e)；傳統能源中以汽油最低(88.44gCO₂e)，其次為天然氣發電(137.66gCO₂e)，火力燃煤發電最高(271.96 gCO₂e)。

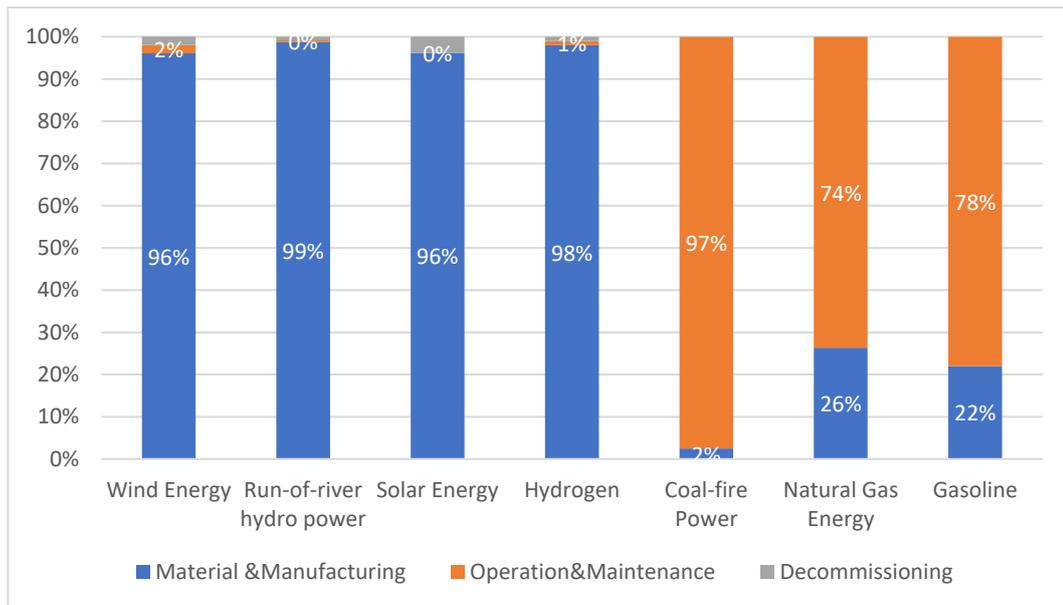


圖 4.1 各能源於各生命週期階段之比較



表 4.8 各能源於各生命週期階段之溫室氣體排放係數

		Manufacturing& Material	Operation& Maintenance	Decommissioning	Total
Wind Energy	gCO ₂ e/MJ	0.98	0.02	0.02	1.02
	Percentage	96%	2%	2%	100%
Run-of-river hydro power	gCO ₂ e/MJ	1.13	0.0045	0.01	1.14
	Percentage	99%	0%	1%	100%
Solar Energy	gCO ₂ e/MJ	11.42	0	0.45	11.87
	Percentage	96%	0%	4%	100%
Hydrogen	gCO ₂ e/MJ	2.37	0.02	0.02	2.41
	Percentage	98%	1%	1%	100%
Coal-fire Power	gCO ₂ e/MJ	6.79	265.07	0.1	271.96
	Percentage	2%	97%	0%	100%
Natural Gas Energy	gCO ₂ e/MJ	36.31	101.3	0.048	137.66
	Percentage	26%	74%	0%	100%
Gasoline	gCO ₂ e/MJ	19.14	69.30	0.00	88.44
	Percentage	22%	78%	0%	100%

4.2 臺灣私有運具溫室氣體減排策略

本研究的私有運具溫室氣體減排策略組合主要為(1)2030 至 2050 年低排放車輛取代汽油車之假設市佔率(2)替代能源與傳統能源之電力組合假設情境。藉以探討在減排策略下，與基礎情境相比，臺灣 2030 至 2050 年私有運具溫室氣體減排量，及是否達成 2030 年的《國家自定預期貢獻》(INDC)、2050 年的《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)之排放目標。

4.2.1 車型種類與市佔率說明

本研究主要探討私有運具(自用小客車、自用小貨車及機車)對溫室氣體排放的影響，其中根據交通部統計資料(2020)指出，私有運具中在 2012-2019 年之年平均使用柴油的比例約為 2%，因其所占的比例低，因此本研究探討的私有運具不考慮使用柴油。表 4.9 為交通部統計資料(2020)在 2012-2019 年之年私有運具中使用汽油的總數、自用小客車、自用小貨車及機車數量。

有關低排放車輛的市佔率從表 4.9 可以得知臺灣目前全電池電動車市佔率低且臺灣私有運具目前尚未使用氫燃料電池車，因此假設 2030 到 2050 年市佔率如表 4.10。其中 2030 年是根據<Global EV Outlook 2019>(IEA, 2019)，2030 年全球低排放車市佔率約為 30%；2050 年是根據行政院環保署規定 2040 年全面禁售汽油車。

表 4.9 臺灣私有運具數量統計

Year	Total	ICEV	Sedan	Truck	Motorbike	BEV	
						Car	Motorbike
2012		21,608,942	5,754,990	556,051	15,107,697	100	31,902
2013		20,776,335	5,860,317	565,304	14,156,680	115	38,373
2014		20,447,893	5,979,971	573,794	13,693,557	153	42,315
2015		20,503,827	6,104,493	580,636	13,609,692	240	52,010
2016		20,554,409	6,159,375	583,804	13,596,366	286	71,846
2017		20,672,767	6,220,636	586,777	13,641,569	779	114,013
2018		20,736,283	6,275,884	588,008	13,640,887	1152	194,633
2019		20,769,227	6,314,126	588,896	13,632,979	3597	359,934

表 4.10 臺灣私有運具假設市佔率(2030-2050 年)

	Low-emissions vehicle		Gasoline Vehicle
	BEV	FCEV	ICEV
2030	20%	10%	70%
2035	25%	12.50%	62.50%
2040	30%	15%	55%
2045	35%	17.50%	47.50%
2050	40%	20%	40%

4.2.2 耗油量資料說明

根據〈線源排放量推估技術手冊〉(行政院環保署空保處,2019)及經濟部能源局，由於汽油車中非私有運具(營業用小客車、小貨車)耗油比例平均約占 0.02%，本研究不予探討。因此假設加油站汽油年銷售量為私有運具年耗油量。此外本研究根據 Gorgess et al.,(2018)運用三指數平滑法(Triple Exponential Smooth)預測 2020 到 2050 年的私有運具耗油量，其 MAPE 為 2.6%，因其值小於 10%，具有高精準度，預測結果如圖 4.2。

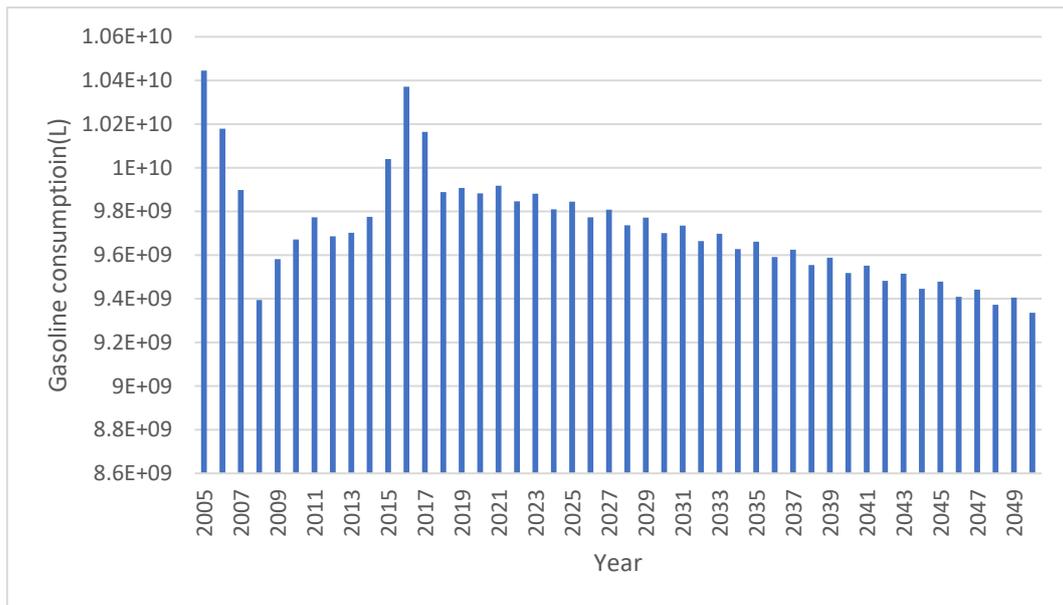


圖 4.2 私有運具預測耗油量(2020-2050)

4.2.3 假設情境說明

本研究欲探討替代能源與傳統能源在不同的電力組合情境下對臺灣私有運具減排策略的影響，因此將假設情境分為四個情境(Scenario1、Scenario2、Scenario3、Scenario4)。

假設情境一(Scenario1)比例如表 4.11，其根據經濟部能源局，2025 年的替代能源與傳統能源比例，且 2030 年有望將替代能源提升至 25%，擴大使用風力發電及太陽能發電，並在 2027 年淘汰 4 組燃煤發電機組，因此火力燃煤發電比例逐年下降，天然氣發電則維持在 50%；2050 年目前政府尚未有相關資訊，因此本研究假設替代能源以每五年平均成長 5%，傳統能源每五年減少 5%為目標下進行探討。

假設情境二(Scenario2)比例如表 4.12，假設替代能源每五年平均成長 10%，傳統能源每五年平均減少 10%為目標，且根據 4.1 節中，風力發電溫室氣體排放最低、火力燃煤發電排放最高，因此替代能源主要為提高風力發電使用率，傳統能源則是減少火力燃煤發電使用率(假設情境三、四亦如此假設)進行探討。

假設情境三(Scenario3)比例如表 4.13，其根據歐盟訂定 2030 年替代能源比例為 32%目標，在 2050 年替代能源比例為 80%，傳統能源比例為 20% 情境下進行探討。

假設情境四(Scenario4)比例如表 4.14，其假設 2025 至 2030 年替代能源成長 15%，傳統能源減少 15%為目標，並根據 <Global energy transformation: A roadmap to 2050 >(The International Renewable Energy Agency，2019)，在 2050 年替代能源比例為 86%，傳統能源比例為 14%之 情境下進行探討。

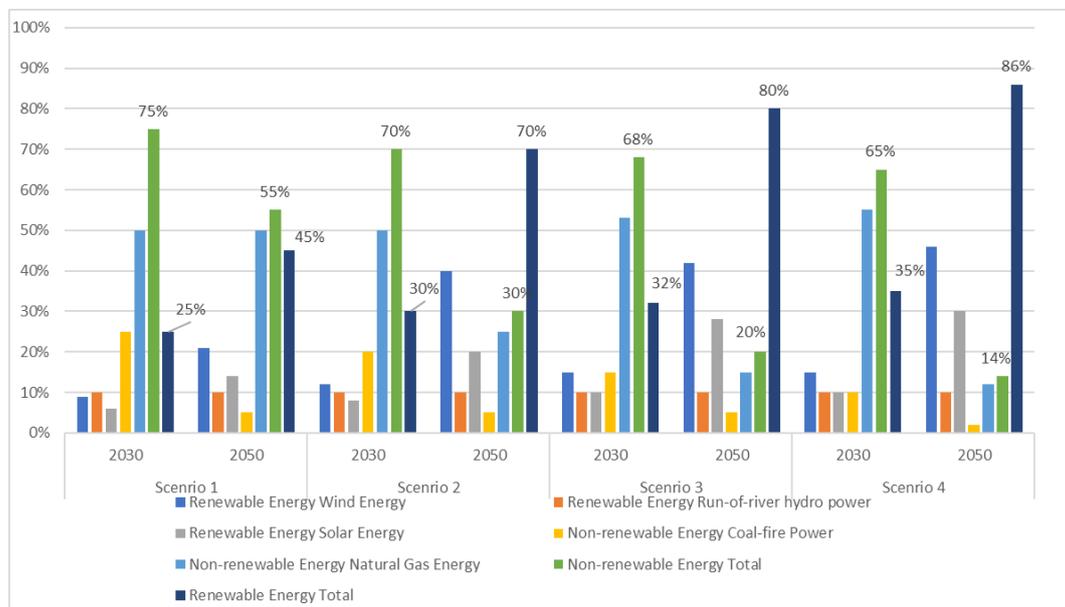


圖 4.3 各個情境下替代能源與傳統能源比例

表 4.11 假設情境 1 替代能源與傳統能源比例(2025-2050)

	Alternative Energy			Total	Traditional Energy		Total
	Wind Energy	Run-of-river hydro power	Solar Energy		Coal-fire Power	Natural Gas Energy	
2025	6%	10%	4%	20%	30%	50%	80%
2030	9%	10%	6%	25%	25%	50%	75%
2035	12%	10%	8%	30%	20%	50%	70%
2040	15%	10%	10%	35%	15%	50%	65%
2045	18%	10%	12%	40%	10%	50%	60%
2050	21%	10%	14%	45%	5%	50%	55%

表 4.12 假設情境 2 替代能源與傳統能源比例(2025-2050)

	Alternative Energy			Total	Traditional Energy		Total
	Wind Energy	Run-of-river hydro power	Solar Energy		Coal-fire Power	Natural Gas Energy	
2025	6%	10%	4%	20%	30%	50%	80%
2030	12%	10%	8%	30%	20%	50%	70%
2035	18%	10%	12%	40%	16%	44%	60%
2040	25%	10%	15%	50%	14%	36%	50%
2045	32%	10%	18%	60%	10%	30%	40%
2050	40%	10%	20%	70%	5%	25%	30%

表 4.13 假設情境 3 替代能源與傳統能源比例(2025-2050)

	Alternative Energy			Total	Traditional Energy		Total
	Wind Energy	Run-of-river hydro power	Solar Energy		Coal-fire Power	Natural Gas Energy	
2025	6%	10%	4%	20%	30%	50%	80%
2030	15%	10%	10%	32%	15%	53%	68%
2035	22%	10%	14%	44%	12%	44%	56%
2040	28%	10%	18%	56%	10%	34%	44%
2045	35%	10%	23%	68%	7%	25%	32%
2050	42%	10%	28%	80%	5%	15%	20%

表 4.14 假設情境 4 替代能源與傳統能源比例(2025-2050)

	Alternative Energy			Total	Traditional Energy		Total
	Wind Energy	Run-of-river hydro power	Solar Energy		Coal-fire Power	Natural Gas Energy	
2025	6%	10%	4%	20%	30%	50%	80%
2030	15%	10%	10%	35%	10%	55%	65%
2035	22%	10%	15%	47%	8%	45%	53%
2040	30%	10%	20%	60%	6%	34%	40%
2045	37%	10%	25%	72%	4%	24%	28%
2050	46%	10%	30%	86%	2%	12%	14%

4.2.4 基礎情境下溫室氣體排放量

本研究根據 4.1 節各能源之溫室氣體排放係數及 4.2.2 小節私有運具耗油量資料，計算臺灣私有運具的溫室氣體排放量。將基礎情境設定為 2030 年及 2050 年無《國家自定預期貢獻》(INDC)、《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)以及假設 2030 及 2050 年無低排放車，100%為汽油車，臺灣私有運具的溫室氣體排放量(BAU2030 與 BAU2050)。

根據表 4.15 指出，基礎情境下，溫室氣體排放量 2030 年及 2050 年分別為 2,743.99 萬公噸、2,640.51 萬公噸，相較於 2005 年排放 2,954.15 萬公噸，呈現下降趨勢，雖然比 2005 年排放量少，但汽油車排放量依然為臺灣主要的排放來源之一，仍需針對臺灣私有運具的溫室氣體排放量進行減排策略。

表 4.15 基礎情境下私有運具溫室氣體排放量 (單位:萬公噸)

Year	Ten thousand tons	GHG Emissions
	BAU2005	2,954.15
	BAU2030	2,743.59
	BAU2035	2,732.57
	BAU2040	2,692.05
	BAU2045	2,680.76
	BAU2050	2,640.51

4.2.5 假設情境下溫室氣體排放量

本研究欲探討臺灣私有運具減排策略為(1)低排放車取代汽油車的比例(表 4.10)及(2)4.2.3 小節假設情境說明，並與 2030 年的《國家自定預期貢獻》(INDC)、2050 年的《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)排放目標進行比較。

根據表 4.16 及圖 4.3，在 2030 年假設情境下，僅假設情境四(Scenario4)能達到《國家自定預期貢獻》(INDC)之目標；2050 年假設情境二、三、四(Scenario2、Scenario3、Scenario4)皆能達到《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)之目標。因此選擇假設情境四(Scenario4)為臺灣私有運具溫室氣體減排策略。

根據圖 4.4，在 2030 年低排放車輛取代 30%汽油車與假設情境四(Scenario 4)策略下，排放量為 2,346.16 萬公噸與 2005(BAU2005)年排放 2,954.15 萬公噸相比，減少 607.99 萬公噸(約 21%)，以達到《國家自定預期貢獻》(INDC)之目標(2,363.33 萬公噸)；在 2050 年低排放車輛取代 60%汽油車與假設情境四(Scenario4)策略下，排放量為 1,149.87 萬公噸與 2005 年(BAU2005)排放 2,954.15 萬公噸相比，減少 1804.28 萬公噸(約 61%)的溫室氣體，以達到《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)之目標(1,477.07 萬公噸)。

表 4.16 假設情境下私有運具排放量(2030-2050)

	Year	GHG Emissions (Ten thousand tons)
2030	BAU 2030	2,743.59
	Scenario 1	2,566.07
	Scenario 2	2,465.36
	Scenario 3	2,410.74
	Scenario 4	2,346.16
2035	BAU 2035	2,732.57
	Scenario 1	2,420.51
	Scenario 2	2,286.77
	Scenario 3	2,168.65
	Scenario 4	2,111.11
2040	BAU 2040	2,692.05
	Scenario 1	2,146.97
	Scenario 2	1,966.63
	Scenario 3	1,801.93
	Scenario 4	1,737.51
2045	BAU 2045	2,680.76
	Scenario 1	1,904.70
	Scenario 2	1,668.63
	Scenario 3	1,490.70
	Scenario 4	1,443.02
2050	BAU 2050	2,640.51
	Scenario 1	1,622.71
	Scenario 2	1,266.83
	Scenario 3	1,189.33
	Scenario 4	1,149.87

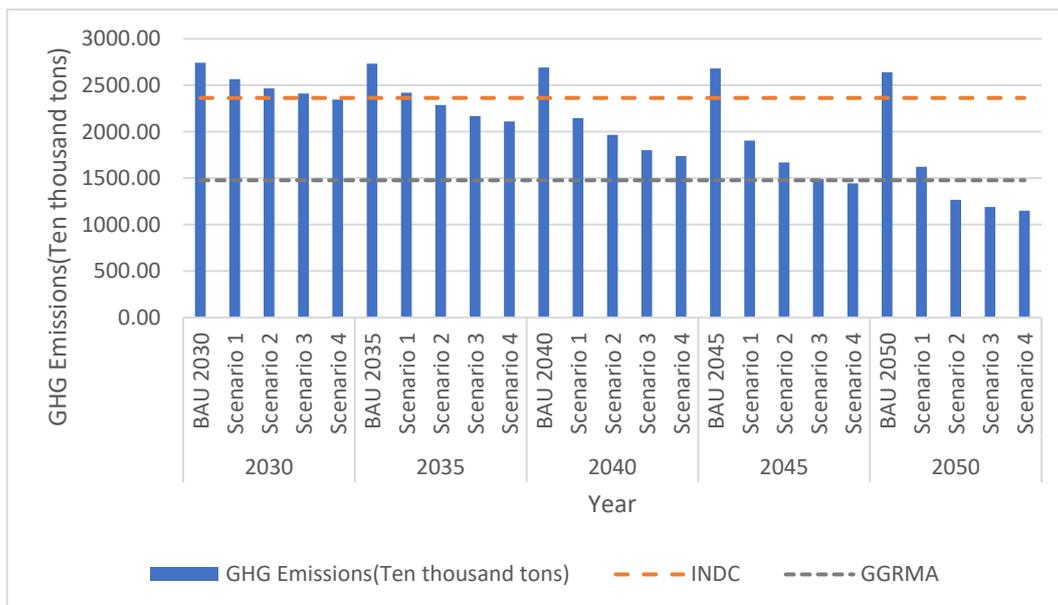


圖 4.4 假設情境下私有運具排放量(2030-2050)

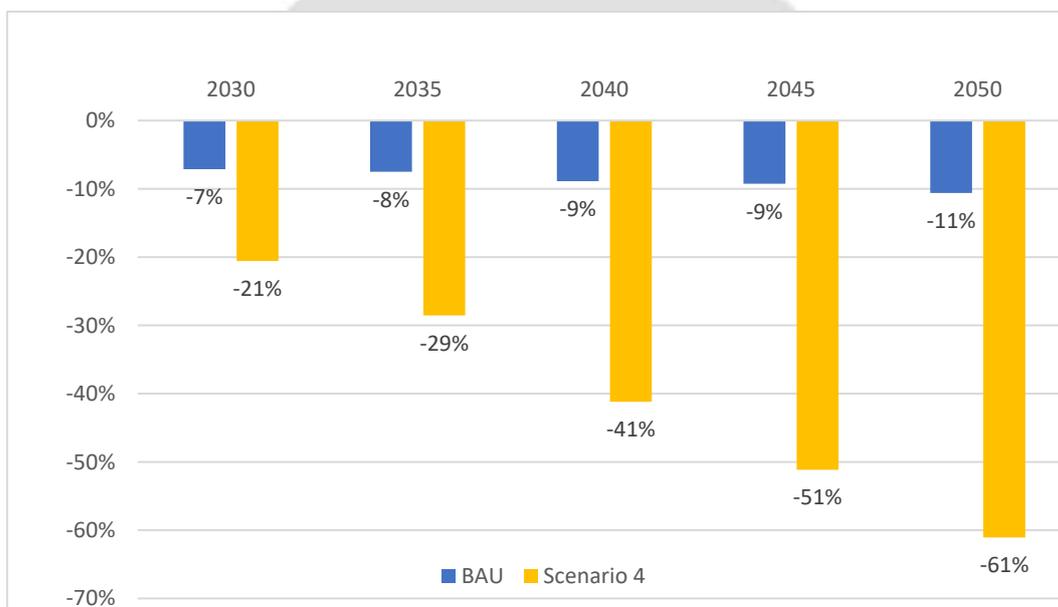


圖 4.5 假設情境 4 下私有運具減排率

4.3 臺灣私有運具之 PM_{2.5} 排放量與外部健康成本

本研究私有運具 PM_{2.5} 排放量與外部健康成本為根據 4.2 節的減排策略進行探討，且因為臺灣目前尚未針對 PM_{2.5} 進行相關的排放管制，因此採用 2030 年的《國家自定預期貢獻》(INDC)、2050 年的《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)排放目標進行比較。

4.3.1 各能源 PM_{2.5} 排放係數表

本研究主要根據 Simapro9.0 及 GREET2019，整理出各能源的 PM_{2.5} 排放係數，如表 4.17。

表 4.17 各能源 PM_{2.5} 排放係數表

Energy	g PM _{2.5} eq/MJ	Emission Factors
Wind Energy		2.40E-05
Run-of-river hydro power		2.33E-06
Solar Energy		1.09E-04
Hydrogen		1.05E-03
Coal-fire Power		1.59E-02
Natural Gas Energy		3.80E-04
Gasoline		4.35E-03

4.3.2 基礎情境下 PM_{2.5} 排放量

本研究根據 4.2.2 小節私有運具耗油量資料，及 4.3.1 節各能源之 PM_{2.5} 排放係數，計算臺灣私有運具的 PM_{2.5} 排放量。將基礎情境設定為假設 2030 至 2050 年無低排放車輛，100%為汽油車，臺灣私有運具的 PM_{2.5} 排放量。

基礎情境下，PM_{2.5} 排放量如表 4.18，相較於 2005 年排放 1453.02 公噸，呈現下降趨勢，雖然比 2005 年排放量少，但汽油車排放量依然為臺灣主要的排放來源之一，仍需針對臺灣私有運具的 PM_{2.5} 排放量進行減排策略。

表 4.18 私有運具 PM2.5 排放量

(單位：噸)

Year	Tons	PM _{2.5} Emissions
	BAU2005	1453.02
	BAU2030	1349.46
	BAU2035	1344.04
	BAU2040	1321.10
	BAU2045	1318.55
	BAU2050	1298.76

4.3.3 減排策略下 PM_{2.5} 排放量

本研究根據 4.2 小節臺灣私有運具溫室氣體減排策略，及 4.3.1 小節各能源 PM_{2.5} 排放係數，進而探討 PM_{2.5} 亦採用此減排策略，私有運具之 PM_{2.5} 排放量並與 2030 年的《國家自定預期貢獻》(INDC)、2050 年的《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)排放目標進行比較。

根據圖 4.6，在 2030 年底排放車輛取代 30%汽油車與假設情境四 (Scenario 4)策略下，排放量為 1,049.3 公噸與 2005 年(BAU2005)排放的 1453.02 公噸比較，減少 403.72 公噸(約 28%)的 PM_{2.5}，以達到《國家自定預期貢獻》(INDC)之目標(1,162.42 公噸)；在 2050 年底排放車輛取代 60%汽油車與假設情境四(Scenario4)策略下，排放量為 587.6 公噸與 2005 年(BAU2005)排放的 1453.02 公噸比較，減少 865.42 公噸(約 60%)的 PM_{2.5}，以達到《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)之目標(726.51 公噸)。

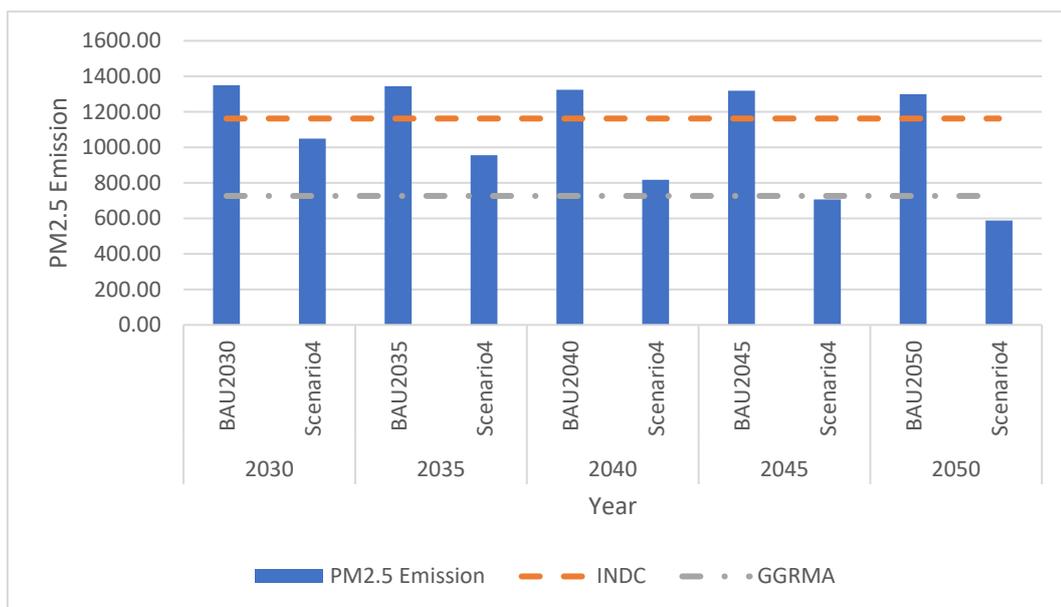


圖 4.6 減排策略下 PM_{2.5} 排放量

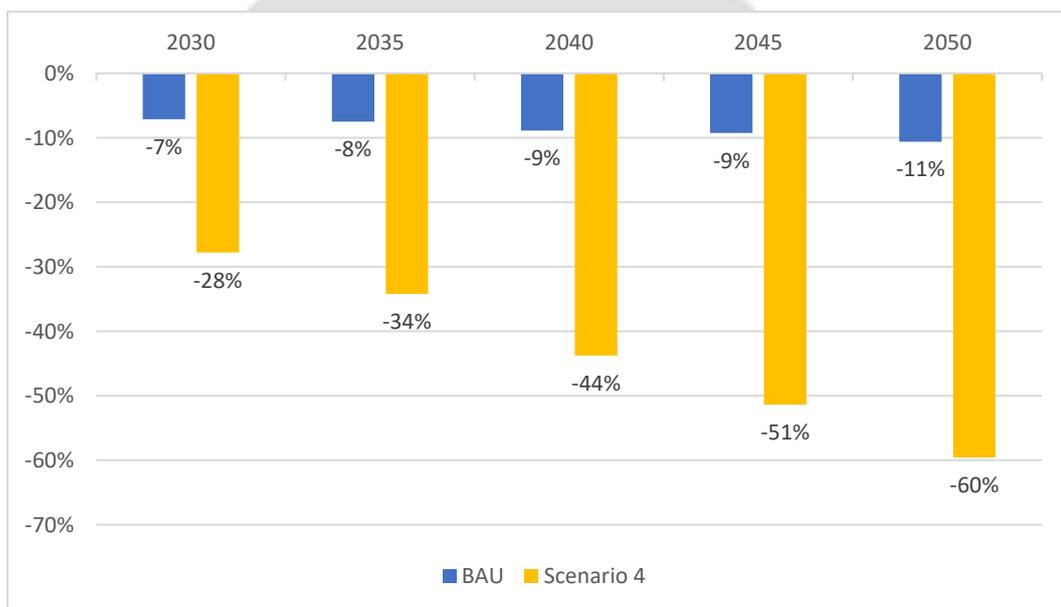


圖 4.7 減排策略下 PM_{2.5} 減排率

4.3.4 外部環境健康成本

本研究根據 Simapro9.0 資料庫針對細懸浮微粒所產生的損害係數 (Damage Factor)，以失能調整生命年(Disability-Adjusted Life Year, DALY)呈現出臺灣私有運具使用之 PM_{2.5} 排放量對於人民的健康影響程度。

圖 4.8 為基礎情境下，由 4.3.2 基礎情境下 PM_{2.5} 排放量推得臺灣私有運具所造成的外部環境健康成本。基礎情境下，外部環境健康成本，相較於 2005 年整體外部環境健康成本為 913.95 DALY，呈現下降趨勢，但汽油車所造成的空氣汙染為臺灣主要來源之一，使得臺灣人民會因為私有運具之 PM_{2.5} 的排放而得到如急性下呼吸系統疾病 acute lower respiratory infections (ALRI)、肺癌 lung cancer、中風 stroke、缺血性心臟疾病 ischaemic heart disease (IHD)及慢性阻塞性肺病 chronic obstructive pulmonary disease (COPD)等，造成其身體健康受損甚至是失能，嚴重者即會造成早逝的情形，因此需採用減排策略。

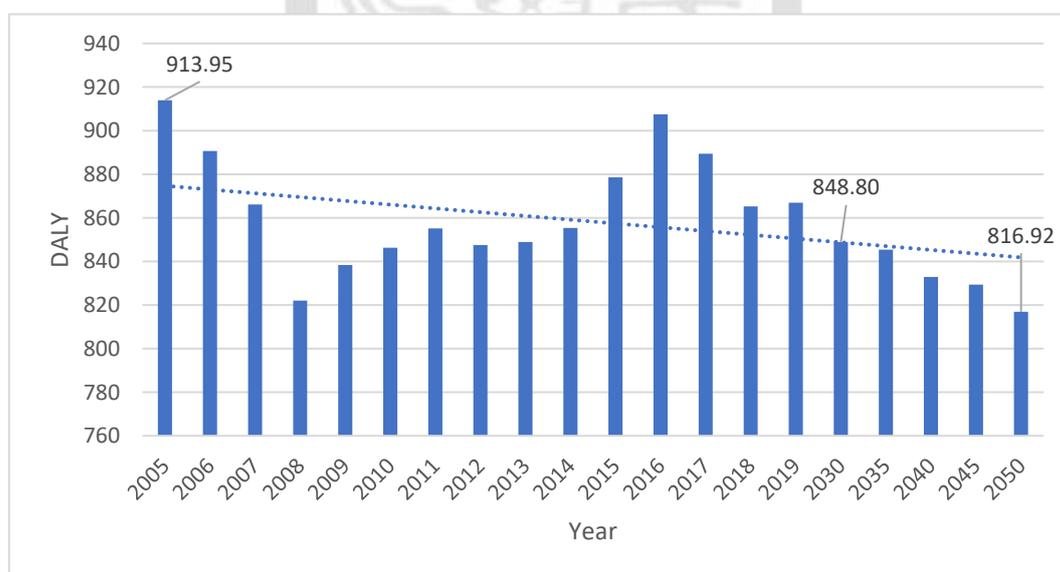


圖 4.8 基礎情境下台灣私有運具之 PM_{2.5} 外部環境健康成本

圖 4.9 為減排策略下，PM_{2.5} 排放量推得臺灣私有運具所造成的外部環境健康成本。在 2030 年低排放車輛取代 30% 汽油車與假設情境四(Scenario 4)策略下，整體外部環境健康成本為 660.01DALY 與基礎情境(BAU-2030)外部環境健康成本 848.80DALY 比較，降低 188.79DALY (約 22%)；在 2050 年低排放車輛取代 60% 汽油車與假設情境四(Scenario4)策略下，整體外部環境健康成本為 369.61DALYs 與基礎情境(BAU-2050)外部環境健康成本 816.92DALY 比較，2050 年降低 447.31DALY (約 55%)。

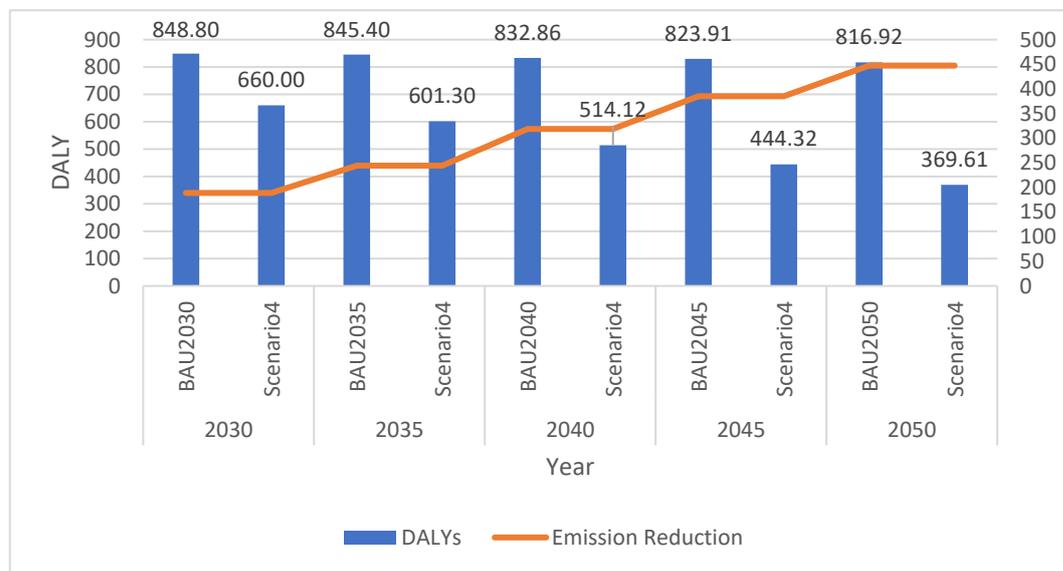


圖 4.9 減排策略下台灣私有運具之 PM_{2.5} 外部環境健康成本

4.4 小結

本研究欲探討臺灣私有運具的溫室氣體減排效果，首先以私有運具之能源(汽油、電能及氫能)，為生命週期碳足跡之溫室氣體排放分析對象，藉此評估出私有運具溫室氣體減排策略，最後探討若實施減排策略後，對 PM_{2.5} 排放量及外部環境健康成本的改善程度。

若臺灣私有運具要達到 2030 年的《國家自定預期貢獻》(INDC)、2050 年的《溫室氣體減量及管理辦法》(GGRMA)排放目標，須訂定減排策略。根據本研究顯示，2030 年低排放車輛取代 30% 汽油車與假設情境四

(Scenario 4)減排策略下，溫室氣體排放量會比 2005 年(BAU2005)排放減少 607.99 萬公噸(約 21%)、PM_{2.5} 排放量減少 403.72 公噸(約 28%)及外部環境健康成本比基礎情境 (BAU2030)減少 188.79DALY (約 22%)；2050 年低排放車輛取代 60%汽油車與假設情境四(Scenario4)減排策略下，溫室氣體排放量會比 2005 年(BAU2005)排放減少 1804.28 萬公噸(約 61%)、PM_{2.5} 排放量減少 865.42 公噸(約 60%)及外部環境健康成本比基礎情境(BAU2050)減少 447.31DALY (約 55%)。因此若能落實減排策略，將可以減少溫室氣體對氣候的影響以及空氣汙染對臺灣人民健康之衝擊。



第五章 結論與建議

本章節共分為三個小節，第一節為本研究結論與建議；第二節為研究限制；最後一節為未來之研究方向。

5.1 結論

臺灣近年來越來越重視全球暖化以及空氣汙染之議題，進而影響健康，而私有運具的使用是造成其主因。有鑑於此，本研究首先以私有運具之能源(汽油、電能及氫能)探討生命週期碳足跡之溫室氣體排放，其次為 2030 及 2050 年是否達到《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範，最後為評估外部環境健康成本改善程度。以下為本研究之結論。

1. 私有運具之傳統能源碳足跡，以汽油最低(88.44gCO₂e)，其次為天然氣發電(137.66gCO₂e)與火力燃煤發電(271.96 gCO₂e)；替代能源之碳足跡，以風力發電排放最低(1.02 gCO₂e) 其次分別為川流式水力發電(1.14 gCO₂e)、氫能(2.41 gCO₂e)與太陽能發電(11.86 gCO₂e)。
2. 2030 年使用 30%低排放車輛(電能 20%、氫能 10%)取代汽油車及使用 35%替代能源(風力發電 15%、水力發電 10%、太陽能發電 10%)與 65%傳統能源(燃煤火力發電 10%、天然氣發電 55%)，溫室氣體排放量比 2005 年(BAU2005)減少 607.99 萬公噸(約 21%)。PM_{2.5} 排放量比 2005 年(BAU2005)減少 403.72 公噸(約 28%)，外部環境健康成本比基礎情境(BAU2030)改善 188.79DALY (約 22%)，根據以上，外部環境健康成本改善 188.79 個失能調整生命年。
3. 2050 年使用 60%低排放車輛(電能 40%、氫能 20%)取代汽油車及使用 86%替代能源(風能發電 46%、水力發電 10%、太陽能發電 30%)與

14%傳統能源(燃煤火力發電 2%、天然氣發電 12%)，溫室氣體排放量比 2005 年(BAU2005)減少 1804.28 萬公噸(約 61%)。PM_{2.5} 排放量比 2005 年(BAU2005)減少 865.42 公噸(約 59%)，外部環境健康成本比基礎情境(BAU2050)改善 447.31DALY (約 55%)，根據以上，外部環境健康成本改善 447.31 個失能調整生命年。

5.2 建議

為了在 2030 年與 2050 年達到《國家自訂預期貢獻》與《溫室氣體減量及管理法》之排放規範，建議政府擴大使用替代能源及大力減少傳統能源(尤其是火力燃煤發電)，配合國際法規之訂定替代能源的比率。此外，為了能提升低排放車輛使用率，期許政府能補助低排放車輛，並且未來能大量設置加電站及加氫站，配合本研究之減排策略之建議，從根本解決溫室氣體及 PM_{2.5} 之排放，進而減少外部環境健康成本。

5.3 研究限制

由於資料數據蒐集不易，本研究僅能依現有資料及文獻針對私有運具所造成的全球暖化及空氣汙染進行減量管制，因此整理本研究限制如以下幾點：

1. 本研究之減排策略及假設情境僅考慮未來政策之環境效益，不考慮經濟成本。
2. 由於本研究探討臺灣替代能源環境效益，然而臺灣現今仍以傳統能源為主，因此替代能源中溫室氣體、PM_{2.5} 排放係數主要參考全球性資料庫 (Simapro9.0、GREET2019)之資料。
3. 私有運具 PM_{2.5} 排放量應包含尾氣排放、輪胎磨損及煞車磨損，因資料限制本研究之 PM_{2.5} 排放僅從能源角度進行探討，且流動情形未考慮自

然因素，如風向、濕度及對流等，自然因素會影響 PM_{2.5} 濃度，進而影響外部環境健康成本。

4. 本研究所探討之外部環境健康成本是針對臺灣進行總體影響，並以失能調整生命年進行量化，但其值無法評斷出準確人數會因該排放而導致疾病產生。

5.4 未來研究方向

根據結論及研究限制，本研究提出以下幾點作為未來建議的研究方向：

1. 由於僅考慮環境效益，因此建議搭配成本層面進行最恰當的減排策略，以達到政府訂定之減排目標。
2. 本研究私有運具排放量採用加油站銷售量為從能源供應端的角度，由上而下探討，因此未來建議能以車輛使用端角度採用由下而上，從車行駛里程數、車輛使用率及耗油率進行研究。
3. 本研究研究對象主要為使用汽油之私有運具，而臺灣公共運具亦會造成排放，因此未來建議可增加研究對象，全面考慮交通運具之減排策略，落實政府訂定之減排目標。
4. 本研究僅針對 PM_{2.5} 之排放量進行管制，但空氣汙染包含不僅為 PM_{2.5}，未來建議可以針對硫化物、氮化物等進行排放管制。

參考文獻

中文文獻

台灣電力公司. (2019). 再生能源發電概況, from <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=204=ghgact>

吳宗翰. (2010). 利用生命週期理論評析燃煤電廠溫室氣體排放量之研究, 淡江大學水資源及環境工程學系碩士班學位論文.

財政部. (2017). 電動汽車免徵牌照稅, from https://www.dot.gov.tw/ch/home.jsp?id=26&parentpath=0,9&mcustomize=taxnews_view.jsp&dataserno=201712060002&t=TaxNews&mserno=201707060001

曾詠恩. (2006). 臺灣地區風力發電之潛力分析與生命週期評估, 國立臺北大學自然資源與環境管理所碩士論文.

經濟部能源局(2019). 我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析

環保署(2015) 國家自定預期貢獻(Intended Nationally Determined Contribution, INDC), from [https://enews.epa.gov.tw/enews/enews_ftp/104/1117/174044/%E4%B8%AD%E8%8F%AF%E6%B0%91%E5%9C%8B%EF%BC%88%E8%87%BA%E7%81%A3%EF%BC%89%E3%80%8C%E5%9C%8B%E5%AE%B6%E8%87%AA%E5%AE%9A%E9%A0%90%E6%9C%9F%E8%B2%A2%E7%8D%BB%E3%80%8D\(INDC\).pdf](https://enews.epa.gov.tw/enews/enews_ftp/104/1117/174044/%E4%B8%AD%E8%8F%AF%E6%B0%91%E5%9C%8B%EF%BC%88%E8%87%BA%E7%81%A3%EF%BC%89%E3%80%8C%E5%9C%8B%E5%AE%B6%E8%87%AA%E5%AE%9A%E9%A0%90%E6%9C%9F%E8%B2%A2%E7%8D%BB%E3%80%8D(INDC).pdf)

環保署. (2015). 溫室氣體減量及管理法, from <https://www.epa.gov.tw/lp.asp?ctNode=34546&CtUnit=2525&BaseDSD=7&mp>

環保署.(2019). 溫室氣體排放統計, from <https://www.epa.gov.tw/Page/81825C40725F211C/6a1ad12a-4903-4b78-b246-8709e7f00c2b%E3%80%80>

英文文獻

Abdin, Z., & Mérida, W. (2019). Hybrid energy systems for off-grid power supply and hydrogen production based on renewable energy: A techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 196, 1068-1079.

Ahmadi, P. (2019). Environmental impacts and behavioral drivers of deep decarbonization for transportation through electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 225, 1209-1219.

- Atilgan, B., & Azapagic, A. (2016). Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts. *Renewable Energy*, 89, 649-657.
- Agrawal, Jain (2013). Assessment of greenhouse gas emissions from coal and natural gas thermal power plants using life cycle approach. *International journal of Environmental Science and Technology*.
- Ayodele, T. R., Alao, M. A., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Munda, J. L. (2019). Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 127.
- Bachmann, T. M., & van der Kamp, J. (2017). Expressing air pollution-induced health-related externalities in physical terms with the help of DALY. *Environ Int*, 103, 39-50. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28376353>.
- Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folęga, P., Korol, J., Pustejovska, P., & Blaut, A. (2018). Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic. *Journal of Cleaner Production*, 202, 476-487.
- Danthurebandara, M., & Rajapaksha, L. (2019). Environmental consequences of different electricity generation mixes in Sri Lanka by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 210, 432-444.
- EEA. (2019). Air quality in Europe - 2019 report., from <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
- EEA. (2018). CO2 emission intensity, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-based-on-linked-open-data24>. Renewable energy in Europe-2018 · <https://www.eea.europa.eu/publications/renewable-energy-in-europe-2018#tab-data-references>
- EEA. (2018). Renewable energy in Europe - 2018, from <https://www.eea.europa.eu/publications/renewable-energy-in-europe-2018>
- Flury, Frischknecht(2012). Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation. *ESU-services*.
- Gao, M., Beig, G., Song, S., Zhang, H., Hu, J., Ying, Q., . . . McElroy, M. B. (2018). The impact of power generation emissions on ambient PM2.5 pollution and human health in China and India. *Environ Int*, 121(Pt 1), 250-259. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30223201>.
- Galetovic, A., & Muñoz, C. M. (2013). Wind, coal, and the cost of environme

- ntal externalities. *Energy Policy*, 62, 1385-1391.
- Gao, C.-k., Na, H.-m., Song, K.-h., Dyer, N., Tian, F., Xu, Q.-j., & Xing, Y.-h. (2019). Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102,
- Ghandehariun, S., & Kumar, A. (2016). Life cycle assessment of wind-based hydrogen production in Western Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22), 9696-9704.
- Govender, I., Thopil, G. A., & Inglesi-Lotz, R. (2019). Financial and economic appraisal of a biogas to electricity project. *Journal of Cleaner Production*, 214, 154-165.
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy*, 30(11-12), 2042-2056.
- IEA. (2017). Energy Technology Perspectives 2017, from https://webstore.iea.org/download/direct/1058?fileName=Energy_Technology_Perspectives_2017.pdf
- IEA. (2019). World Energy Outlook 2019, from <https://www.iea.org/weo2019/>
- IEA. (2018). CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION OVERVIEW, from https://webstore.iea.org/download/direct/1082?fileName=CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2018_Overview.pdf
- IEA. (2018). Key world energy statistics, from https://webstore.iea.org/download/direct/2291?fileName=Key_World_2018.pdf
- IEA. (2018). Renewables 2018, from <https://www.iea.org/renewables2018/15>. <https://www.iea.org/topics/renewables/>
- IPCC. (2013). AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, 2013, from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- Lee, D.-Y., Elgowainy, A., Kotz, A., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217-229.
- Liang, X., Wang, Z., Zhou, Z., Huang, Z., Zhou, J., & Cen, K. (2013). Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China. *Journal of Cleaner Production*, 39, 24-3

1.

- Li, L., Lei, Y., Wu, S., Huang, Z., Luo, J., Wang, Y., . . . Yan, D. (2018). Evaluation of future energy consumption on PM_{2.5} emissions and public health economic loss in Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 187, 1115-1128.
- Li, J., Li, S., & Wu, F. (2020). Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory. *Renewable Energy*, 155, 456-468.
- Odeh, N. A., & Cockerill, T. T. (2008a). Life cycle analysis of UK coal fired power plants. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 212-220
- Odeh, N. A., & Cockerill, T. T. (2008b). Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. *Energy Policy*, 36(1), 367-380.
- Orfanos, N., Mitzelos, D., Sagani, A., & Dedoussis, V. (2019). Life-cycle environmental performance assessment of electricity generation and transmission systems in Greece. *Renewable Energy*, 139, 1447-1462.
- Patterson, T., Esteves, S., Carr, S., Zhang, F., Reed, J., Maddy, J., & Guwy, A. (2014). Life cycle assessment of the electrolytic production and utilization of low carbon hydrogen vehicle fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(14), 7190-7201.
- Posso, F., & Zambrano, J. (2014). Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(23), 11846-11853.
- Quek, A., Ee, A., Ng, A., & Wah, T. Y. (2018). Challenges in Environmental Sustainability of renewable energy options in Singapore. *Energy Policy*, 122, 388-394.
- Raugei, M., Hutchinson, A., & Morrey, D. (2018). Can electric vehicles significantly reduce our dependence on non-renewable energy? Scenarios of compact vehicles in the UK as a case in point. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1043-1051.
- Schleisner(2000). Life cycle assessment of wind farm and related externalities. *Renewable energy*.
- Shen, W., Han, W., Wallington, T. J., & Winkler, S. (2019). China Electricity Generation Greenhouse Gas Emission Intensity in 2030: Implications for El

electric Vehicles. *Environmental science & technology*.

Stoppato, A. (2008). Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy*, 33(2), 224-232.

Tang, L., Nagashima, T., Hasegawa, K., Ohara, T., Sudo, K., & Itsubo, N. (2015). Development of human health damage factors for PM2.5 based on a global chemical transport model. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2300-2310.

Verán-Leigh, D., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: a policy support perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1376-1395.

Wakiyama, T., & Kuriyama, A. (2018). Assessment of renewable energy expansion potential and its implications on reforming Japan's electricity system. *Energy Policy*, 115, 302-316.

WHO.(2005).Air quality guidelines., from https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

WHO. (2018). WHO ambient (outdoor) air quality database Summary results, update 2018., from <http://www.who.int/airpollution/data/cities/en>

WMO. (2018). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018, from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789

Wu, P., Ma, X., Ji, J., & Ma, Y. (2017). Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback of Solar Photovoltaic Systems and a Case Study. *Energy Procedia*, 105, 68-74.