

# 基於桑基圖之臺灣能源流現況與2050淨零政策 潛在影響之展望分析

羅凱芸<sup>1</sup> 簡廷陵<sup>2</sup> 蔡欣濤<sup>3</sup> 謝依芸<sup>4\*</sup>

## 摘 要

為了對抗氣候變遷，臺灣政府於2022年公布《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》，提供落實長期減碳目標之初步藍圖，以接軌國際邁向淨零排放轉型。在此背景之下，能源供需勢必將出現巨大的變化；了解能源流對於減少碳足跡至關重要。本研究基於2020年臺灣能源平衡表等數據，以桑基圖繪製出我國的能源流現況，並針對能源的三個主要階段—初級能源、電力轉換、終端消費—進行全面性的分析及評估。此外，本研究探討了2050淨零政策下的潛在能源流影響，並重點關注電力部門去碳化與運輸部門電力化的影響。至2050年，電力部門的發電結構將由化石燃料轉變為再生能源為主的系統；公路運輸部門的電力消費將因運具電動化的政策增加至近18%。藉由將臺灣能源的供需情形以視覺化的方式呈現，以協助利益相關方瞭解我國能源系統各階段之使用、轉換、平衡與損耗之情形。本研究建構的能源流桑基圖成果可作為臺灣永續發展與能源管理的參考基準，具有高度學術研究及實務應用之價值。

**關鍵詞：**能源流分析，桑基圖，2050淨零政策，再生能源

## 1. 前 言

### 1.1 國際能源政策發展進程

能源使用的普及化帶動各國的經濟發展與國民生活水平，尤其當工業化後，人類文明更是很大程度的依賴與建立在能源之上。隨著近年全球經濟與人口的快速成長，人們對能源資源的需求逐年提升，然而，傳統化石燃料的過度使用導致大量的溫室氣體排放於大氣中，攔截原應散發到太空的熱能，溫室效應對全球環境產生了巨大衝擊。

為了對抗氣候變遷，能源系統的脫碳化成為當前全球朝向永續發展的重大目標與挑戰。聯合國於1990年設立政府間氣候變化綱要公約談判委員會(Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change, INC/FCC)，並於1992年通過《聯合國氣候變化綱要公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)。該公約每年召集簽署的締約國舉辦締約國會議(Conference of the Parties, COP)共同商討氣候變遷的應對措施，並陸續制訂具國際法性質的相關協議，期盼透過各締約方的

<sup>1</sup> 國立臺灣大學土木工程學系電腦輔助工程組 碩士生

<sup>2</sup> 國立臺灣大學土木工程學系 學士生

<sup>3</sup> 國立臺灣大學土木工程學系 學士生

<sup>4</sup> 國立臺灣大學土木工程學系與化學工程學系 助理教授

\*通訊作者，電話：02-33664259，電郵：[iyhsieh@ntu.edu.tw](mailto:iyhsieh@ntu.edu.tw)

收到日期: 2022年08月31日

修正日期: 2022年11月08日

接受日期: 2022年11月16日

努力，減少溫室氣體的排放。該公約分別於1997年(COP3)與通過的《京都議定書》(Kyoto Protocol)明訂針對二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亞氮(N<sub>2</sub>O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)及六氟化硫(SF<sub>6</sub>)六種溫室氣體定出具體減量的目標，並另於COP17決議新增三氟化氮(NF<sub>3</sub>)為第七種溫室氣體，期望將大氣中溫室氣體的濃度穩定於一個適當的水準，以避免氣候系統受危險人為干擾(dangerous anthropogenic interference)，使生態系統得以平滑適應，並確保糧食安全與國家經濟的可持續發展。2015年(COP21)的《巴黎協定》(Paris Agreement)，制訂了全球平均氣溫較工業化前升溫2°C以內，並努力控制於1.5°C的目標。要求所有締約國須提出國家自訂貢獻(Nationally Determined Contributions, NDCs)承諾，並如實通報減排成果，約定每五年進行檢討修正並提交加強計畫。

近幾年國際間掀起了淨零排放的熱潮；淨零排放目標成為當今全球各國氣候倡議的政策焦點。英國率先於2019年6月將2050淨零碳排放列入《英國氣候變遷法》(Climate Change Act 2008)中，透過減少碳密集活動需求、採取低碳解決方案、擴大低碳能源供應與土地和溫室氣體移除等四大關鍵策略實現碳預算，成為全球第一個將長期零碳排放量目標明確入法的國家；美國於2021年11月公布《2050淨零排放之路：美國長期策略》(The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050)，確立未來十年溫室氣體減量的政策與目標；日本於2021年4月提出將爭取日本2030年的溫室氣體排放量較2013年減少46%，並朝減少50%的目標努力；5月通過《促進全球變暖對策法》，將2050年碳中和明確入法，並確保該目標的長期執行；同年12月公布14個綠色成長戰略，提出包含離岸風電、氫能、汽車、半導體、資通訊、船舶與碳回收等領域的詳細施政方針；德國也將淨零排放的目標提前訂至2045年，

提出將2030年較1990年溫室氣體排放減少65%及2040年減排88%，以達成2045年碳中和的目標，並宣布於2050年實現溫室氣體負排放。

溫室氣體排放來自於多個部門：全球有將近四分之三的溫室氣體排放來自於能源使用，其中工業、運輸與住商部門的能源使用分別占其中的24.2%、16.2%和17.5%(Ritchie and Roser, 2020)。低碳經濟的發展與能源系統的轉型息息相關。因此，為了加速經濟脫碳，能源轉型的推動被視為應對世界氣候挑戰的關鍵，成為當今全球的發展趨勢。各國政府皆以再生能源為能源戰略的重要組成部位，致力將能源系統中的電力、運輸與住商進行跨部門整合，訴求降低全球總體碳排放量，以達成低碳經濟與永續發展之宗旨。各國相繼提出新的能源政策以提高再生能源發電比例。例如：歐盟於2014年1月底提出《2030年氣候與能源政策綱要》(A 2030 framework for climate and energy policies)，制定2030年溫室氣體減量40%及再生能源達27%的兩大政策目標；美國於2014年6月制定《潔淨電力計畫》(Clean Power Plan)規範各州電力碳排放係數，使2030年電力部門的CO<sub>2</sub>排放量較2005年削減30%；中國則是於2020年將提高再生能源發電量設為目標，並預計於2030年將風電與太陽能發電的裝置容量提升至1,200 GW，較2020年增加200%，以實踐電力部門的能源轉型。

## 1.2 我國的淨零排放政策

根據Our World in Data (2022)，全球2021年的人均能源消耗量為20,993 kWh，較1965年增加62%；反觀我國的人均能源消耗量為57,996 kWh，是世界平均水準的2.76倍，增長幅度更是達到了956%。此外，根據經濟部能源局(2021b)統計，臺灣109年度的進口能源依存度為97.8%，顯示我國自產能源不足，能源安全易受國際能源價格波動影響，進而衝擊我國民生經濟。

為提升國家能源安全、綠色經濟與環境永

續。我國政府於2022年3月公布《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》(國家發展委員會等單位, 2022), 修正我國《溫室氣體減量及管理法》為《氣候變遷因應法》, 將國家長期減量目標修改為2050年溫室氣體淨零排放以呼應全球淨零趨勢, 提出以能源、產業、生活、社會四大轉型策略及科技研發與氣候法制兩大治理基礎, 並針對建築、運輸、工業、電力及負碳技術五大項目明確制定具體減碳策略與預計實施期程, 以邁向2050淨零排放轉型。建築部門規劃由公有建築帶頭引導民間建築, 參考日本、美國、歐盟及國際能源總署(International Energy Agency, IEA)等國際發展概念, 透過提升建築外殼設計、建築能效及家電能效標準節能50%, 再輔以綠電達成碳中和, 目標2050年100%的新建建築物及超過85%的既有建築物為近零碳建築; 運輸部門透過改變運具方式降低運輸需求, 並設定2030年營運市區公車及公務車全面電動化、2040年機車與乘用車市售比100%的分階段運具電動化目標; 工業部門透過汰換設備與導入創新低碳製程提升燃料轉換的能源效率, 達成循環經濟; 電力部門持續擴大再生能源裝置容量, 並發展新能源科技、儲能與升級電網, 目標於2050年再生能源發電占比超過60%及智慧變電所布建率達100%; 負碳技術則規劃2030年為示範階段, 並於2050年進入普及階段。

針對臺灣淨零轉型的整體發展進程, 我國推動《能源管理法》、《再生能源發展條例》與《電業法》的修法作業, 持續強化能源需求面管理, 完善綠能發展法制環境與提升儲能建置誘因。短期規劃於2030年透過能源系統的轉型, 包含太陽光電、風力發電、地熱及海洋能等綠能增設, 以及增加天然氣的使用以降低燃煤發電達成低碳轉型; 長期定於2050年透過積極投入創新潔淨能源如高效率風電、太陽光電、生質能、氫能發電與碳捕捉再利用及封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技術的開發建構零碳電力系統, 並加速各產業

部門及民生用具之電氣化進程, 減少非電力之碳排放, 集中改善電力部門零碳能源占比, 打造零碳能源系統, 以實現2050淨零排放之長期目標。

### 1.3 能源流分析—桑基圖(Sankey Diagram)

能源流分析(Energy Flow Analysis, EFA)是以能源為探討對象, 旨在檢視能源的有效使用量與流失量; 藉由能源的流動方向與流量大小計算能各階段的轉換效率與因能源開採、煉製、運輸、儲存與轉換所產生的能量損耗(Loss), 可應用於探討能源流動分布對於系統環境、經濟及社會產生之影響, 提供能源管理決策評估的重要參考依據。

桑基圖(Sankey Diagram)是一種包含流量(Flow)與存量(Stock)數據的可視化工具, 用於說明或繪製系統中的價值流(如能源、材料與成本等), 並使用流線來呈現整體能源的流動情形, 其中流線的寬度代表能源流量大小。常見的應用包含建築的能源流分布, Perez-Lombard *et al.* (2011)提供建築空調系統於供冷及供暖模式下的能量流桑基圖; Abdelalim and O'Brien (2017)利用桑基圖呈現建築夏季與冬季之能源消耗與成本在建築不同組件(如窗戶、牆面、屋頂與地板等)之間的流動分布。將桑基圖應用於能源流可以幫助我們了解能源從初級能源的源頭到最終消費的使用量、能源轉換效率、損耗與整體流動的分布情形。目前已有許多研究文獻透過桑基圖來呈現能源流分析結果: 美國能源部所屬之國家研究機構勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)於1970年至1980年期間即開始使用桑基圖繪製美國能源流使用狀況; Bakken *et al.* (2016)展示了全球氫能供需的流動情形, 並提供各種製氫技術的詳細生產成本, 以瞭解氫商業化的未來發展趨勢; Subramanyam *et al.* (2014)透過桑基圖呈現加拿大亞伯達省五大能源需求部門的能源流動情形; 樊靜麗等(2018)



對照過去資料繪製中國2015年能源流之桑基圖，並結合碳流分析，探討中國能源使用及與能源相關之碳排放情形，以提供國家制定節能減排政策之參考。

臺灣也有將桑基圖方法應用於能源流分析的例子：經濟部能源局每年發布的能源統計手冊目前已將臺灣能源與供給消費的流程圖透過桑基圖的方式簡單呈現能源從初級能源的供給到能源部門自用、運輸部門、工業部門、農業部門、住宅部門、服務業部門與非能源消費等七大部門的總消費情形；Chung *et al.* (2019)發表的〈New Perspective on the Augmented Taiwan Energy Flow Diagram〉展示臺灣2017年初級能源與二次能源的供需情況，相較於經濟部能源局所提供的能源流圖，該研究更詳細分析工業部門的能源供需情形，將原工業部門及農業部門結合為新工業部門，並將新工業部門分為四類：化學製品業、金屬及機械設備業、光電產業、生活用品及農業進行分析。Chung *et al.* (2019)透過桑基圖繪製新分類與定義的能源流：初級能源包含「煤炭、核能、再生能源、生質能與廢棄物、液化天然氣與石油」等六項；消費部門涵蓋「工業(化學製品業、金屬及機械設備業、光電產業、生活用品及農業)、能源部門自用、住宅、商業與運輸」等五項；該研究成果能協助大眾瞭解我國整體能源的使用情形。

## 1.4 本研究之重要性

為如期達成2050年淨零排放轉型路徑之各階段里程碑，我們需要將能源從源頭到最終消費的完整供需流動譜出，以全面了解能源的供給與使用情形。然而，現階段已開發的能源流視覺化工具多採用簡單的折線圖、圓餅圖或是長條圖呈現，仍不足以滿足詳細探討能源流動與存量數據之分析需求。本研究以桑基圖的形式完整呈現臺灣2020年整體能源系統之現況，並針對當今政府主要之淨零排放施政方針—電力部門去碳化與運輸部門電力化—進行細緻化

的分析與2050年淨零政策下的潛在影響推估。藉由將能源的流動情形完整量化呈現，瞭解臺灣能源系統各階段之流量(Flow)、存量(Stock)及能量損耗(Loss)的情形與政策影響，以進一步協助相關能源管理策略之擬定。本文結構安排如下：第二章介紹能源流分析的資料蒐集與研究方法；第三章為2020年與2050年臺灣能源流整體與針對特定部門之細緻化推估模擬結果；第四章則提出結論與建議。

## 2. 資料與研究方法

### 2.1 資料蒐集與定義

本研究使用桑基圖(Sankey Diagrams)的架構呈現臺灣2020年與2050年淨零政策下之能源流推估圖。將桑基圖應用於能源流的分析除了可以釐清能源鏈中各部門能源流入類型、能源流向、能源最終流向以及能源損耗的詳細關係，也可透過計算各能源別之能源轉換效率分析溫室氣體減排潛力，以促進能源系統管理的規劃，為能源低碳轉型提供高效的數據支持與決策工具。

本研究之流程如圖1所示，共包含文獻回顧、資料蒐集、數據分析推估、能源流桑基圖



圖1 本研究之流程圖

繪製及結果探討五個部分。藉由系統性地回顧國內外能源相關政策與能源流研究文獻成果，以了解並建立本研究之能源流桑基圖架構。再透過資料蒐集了解2020年臺灣能源供需平衡現況(經濟部能源局，2021a)及相關能源政策，以整理並分析能源流之各細項推估數據，進行能源流桑基圖之繪製。最後針對能源流模擬結果進行探討，以檢視2050年淨零政策對臺灣能源流供需之潛在影響。

本研究使用Python中pyecharts開源工具繪製能源流桑基圖，其套件被廣泛應用於多種常見之圖表產出，並可生成具互動性之html檔，適合用於能源流視覺化呈現之繪製工具。本研究取用之臺灣能源供需現況數據多來自經濟部能源局的能源平衡表(2021a)；呈現的能源流桑基圖為一由左至右流向的流程圖，流線的寬度與能源流量的大小成正比關係，表示能源的整體流動情形；其中，最左邊的節點為初級能源(Primary Energy, PE)，包含煤及煤產品、原油及石油產品、天然氣、生質能及廢棄物、核能、水利、地熱、太陽光電與風力等九項；經過第二欄節點的能源生產、傳輸或轉為發電後，提供第三欄節點之各大部門做使用，包含工業部門、運輸部門、建築部門、非能源消費與能源部門自用。另外，為了簡化能源流圖以清楚呈現各能源別流向，本研究在繪製能源流桑基圖時將流量小於0.01千公秉油當量( $10^3$  KLOE)的能

源忽略不計，但在數據分析時仍保留此能源以避免計算誤差。

能源流桑基圖中，初級能源的詳細中英文定義說明可參照表1。電力部門供給端數據來源為經濟部能源局2020年〈能源平衡表〉(經濟部能源局，2021a)「轉變投入」中「15公用發電廠」、「16自用發電廠」、「17公用汽電共生廠」及「18自用汽電共生廠」之加總，為初級能源供應至發電廠之能源總量；需求端為各消費部門電力使用量之總和，並依照〈能源平衡表〉「電能與熱能產出」之發電量比例回推各初級能源使用量；發電過程之能源損耗(Loss)為「初級能源供應至發電廠之能源總量」減去「各消費部門電力消耗總和」；消費部門主要依據〈能源平衡表〉的分類，唯工業部門與建築部門之部分定義與平衡表有異，詳見表2；各消費部門的能源損耗則以各初級能源及電力的能源損耗總和，按能源需求的比例分配至各消費部門。此外，本研究將原分散於各部門的電動載具之能源消費統一計算至運輸部門中，以對照經濟部能源局近期針對〈能源平衡表〉部分數據定義之修正。

## 2.2 電力部門能源流推估

根據《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》(國家發展委員會等單位，2022)，我國電力需求將受終端部門能源消費電氣化及經濟持

表1 初級能源中英文定義對照

名稱	定義
Coal and Coal Products Total	能源平衡表「煤及煤產品」
Crude Oil and Petroleum Products Total	能源平衡表「原油及石油產品」
Natural Gas	能源平衡表「天然氣」
Biomass and Waste	能源平衡表「生質能及廢棄物」
Nuclear	能源平衡表「核能」
Hydro	能源平衡表「水力」
Geothermal	能源平衡表「地熱」
Solar PV	能源平衡表「太陽光電」
Wind	能源平衡表「風力」

表2 各消費部門中英文定義對照

名稱	定義
Industrial Sector	參考〈New Perspective on the Augmented Taiwan Energy Flow Diagram〉(Chung <i>et al.</i> , 2019)將經濟部能源局〈能源平衡表〉之「工業部門」與「農業部門」加總，並再細分為Chemicals、Metal/Mechanics、Eletrics/Photo與Livelihood/Agriculture四子項。
Chemicals	能源平衡表「工業部門」中的化學材料製造業、化學製品製造業、橡膠製品製造業、塑膠製品製造業。
Metal/Mechanics	能源平衡表「工業部門」中的礦業及土石採取業、金屬基本工業、金屬製品製造業、機械設備製造業。
Eletrics/Photo	能源平衡表「工業部門」中的電腦通信及視聽電子產品製造業。
Livelihood/Agriculture	能源平衡表「工業部門」中的食品飲品及菸草業、紡織成衣及服飾業、皮革及毛皮業、木竹及家具行、紙漿、紙及紙製品業、印刷業、非金屬礦物製品製造業、運輸工具製造業、精密光學醫療器材及鐘錶製造業、其他工業製品製造工業、用水供應及汙染整治業、營造業、其他，以及「農業部門」。
Transport Sector	能源平衡表「運輸部門」。
Domestic Air	能源平衡表「運輸部門」中的國內航空。
Road	能源平衡表「運輸部門」中的公路。
Rail	能源平衡表「運輸部門」中的鐵路。
Pipeline Transport	能源平衡表「運輸部門」中的管線運輸。
Internal Navigation	能源平衡表「運輸部門」中的國內水運。
Building sector	能源平衡表「服務業部門」與「住宅部門」。
Commercial	自定義建築部門中的辦公樓、大型超市、百貨公司、飯店、電信設施、研究機構、展覽館、複合購物區、倉庫、機場、其他。
Public	自定義建築部門中的學校、醫院、政府機關、國防機構、污水處理廠。
Residential	能源平衡表「住宅部門」。
Non-Energy Use	能源平衡表「非能源消費」。
Energy Sector Own Use	能源平衡表「能源部門自用」。

續發展影響，預估至2050年之長期電力消費年均成長 $2\% \pm 0.5\%$ ，足見電力部門去碳化對整體能源系統影響之重要性。電力部門低碳轉型一直是我國政府大力推動的政策之一，透過擴大太陽光電、風力、地熱等再生能源發電機組、開發創新潔淨能源技術(如氫能與生質能)、導入波浪及海流發電等海洋能技術降低燃煤發電占比，並搭配碳捕捉再利用及封存技術改善傳統發電結構，建構零碳之電力系統，以實現2050淨零排放之長期目標。

電力部門之能源流各細項數據來自經濟部能源局〈能源平衡表〉(2021a)統計之我國2020

年各能源別供需平衡詳細數據；2050年電力部門之能源流推估主要參照當前《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》(國家發展委員會等單位，2022)規劃之各再生能源裝置容量與發電量初步藍圖，包含再生能源發電占總電力60%~70%、氫能占9%~12%、搭配碳捕捉之火力發電占20%~27%、抽蓄水力占1%、太陽光電裝置容量40 GW~80 GW、離岸風電裝置容量40 GW~55 GW與前瞻能源裝置容量8 GW~14 GW等政策細則，並透過情境分析假設可能之各能源別發電量占比組合，以進行我國未來能源發展之推估。



針對我國2020年電力部門之供需數據推估方式，需求端為各消費部門電力使用量之總和，並依照〈能源平衡表〉「電能與熱能產出」之發電量比例回推各初級能源使用量；供給端為經濟部能源局109年〈能源平衡表〉「轉變投入」中「15公用發電廠」、「16自用發電廠」、「17公用汽電共生廠」與「18自用汽電共生廠」之加總，為初級能源供應至發電廠之能源總量；發電過程之能源損耗(Loss)為「初級能源供應至發電廠之能源總量」減去「各消費部門電力消耗總和」。2050年電力部門需求端依上述方法進行推估；由於初級能源發電與傳輸均會產生能源損耗，因此2050年的供給端數據將由2020年各能源別供給端與需求端之能源效率反推，且由於2020年並未有氫能相關之需求與發電量數據，因此設定80%為其能源轉換效率進行回推。

再生能源之裝置容量主要參照當前《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》(國家發展委員會等單位，2022)規劃之政策細則進行推估；由於政府2050淨零政策並未提及地熱及生質能之詳細規劃，本研究參考《能源轉型白皮書》(經濟部能源局，2020)規劃之2025年地熱200 MW及生質能813 MW裝置容量發展目標，並依照當前國際能源署(International Energy Agency, IEA) (2021a)針對2050淨零排放情境計算之發電量年平均成長率要求(地熱13.4%與生質能7%)，進行2050年地熱及生質能之裝置容量推估預測。容量因數可以用於衡量發電機組之發電效率，藉由設置的裝置容量與容量因數，將可以推估再生能源裝置之發電量。本研究所使用的太陽光電容量因數為0.14(台灣電力公司，2022)；風力發電包含陸域風電與離岸風電，其容量因數分別為陸域風電0.25(經濟部能源局，2022)及離岸風電0.46(經濟部能源局，2022；International Energy Agency, 2019)；地熱系統根據開採型態可分為傳統地熱系統(Hydrothermal System)及增強型地熱系統(Enhanced Geothermal System, EGS)，傳統型地熱為0.75 (U.S. Energy

Information Administration, 2019)、增強型地熱為0.90 (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022)；生質能所使用之容量因數為0.83(蕭子訓等，2018)。其中，雖政府有將海洋能列入2050淨零政策轉型路徑之規劃，但因海洋能尚無相關完整之配套措施與後續規劃，故本研究並沒有將海洋能納入2050年電力部門能源流之推估作計算。傳統化石燃料之發電數據，包含煤及煤產品(Coal and Coal Products Total)、原油及石油產品(Crude Oil and Petroleum Products)及天然氣(Natural Gas Total)的推估則參考曾暉峻等(2022)依據2050淨零排放政策預估之電力需求年均成長率與臺灣近十年年用電量與年毛發電量的比例計算推估之發電量。發電量的計算公式如式(1)所示：

$$\text{發電量(Wh)} = \text{CF} * \text{IC} * \text{總時數} \quad (1)$$

其中，CF(%)為容量因數(Capacity Factor, CF)，即特定時間內發電廠(或機組)之平均負載(包括廠內用電)與其平均裝置容量之百分比；IC為裝置容量(Installed Capacity, IC)，即發電廠機組之設計容量，單位為瓦(W)。

## 2.3 運輸部門能源流分析

運輸部門電力化為臺灣2050淨零排放政策的核心策略之一，為了更進一步模擬運具電動化對於能源流的影響，本研究應用臺灣車輛模型，針對臺灣運輸部門公路(Road)部分進行細緻化的推估。車輛模型(Fleet Model)是一用來追蹤和預測機動車的保有量、銷量、行駛公里數、燃料使用量、能源消耗以及碳排放的工具；其模型是採用自下而上的方法來描繪機動車輛之周轉和使用的動態以及道路運輸的能耗和環境影響。本研究使用Tsai *et al.* (2022)針對我國運輸公路部門在2020及2050年不同車種之能源消費量預測值。道路運輸細分至汽油自用小客車(Gasoline private car)、柴油自用小客車(Diesel private car)、電動自用小客車(Electric private car)、汽油機車(Gasoline scooter)、電

動機車(Electric scooter)、柴油城市公車(Diesel urban bus)、柴油長程公車(Diesel tour bus)、電動城市公車(Electric urban bus)、柴油大貨車(Diesel heavy-duty truck)、汽油小貨車(Gasoline light-duty truck)、柴油小貨車(Diesel light-duty truck)、汽油非自用小客車(Gasoline non-private car)、柴油非自用小客車(Diesel non-private car)與電動非自用小客車(Electric non-private car)共十四種運具別的能源消費流動情形做分析探討。

## 2.4 建築部門能源流推估

本研究將經濟部能源局〈能源平衡表〉(經濟部能源局, 2021a)定義之服務部門及住宅部門整合為建築部門作探討。由於〈能源平衡表〉(經濟部能源局, 2021a)並無建築部門細節之能源消費數據, 本研究根據經濟部能源局

《非生產性質行業能源查核年報》(2021c)統計之大用戶申報資料(如表3所示。計算時將刪除「車站與軌道」用戶分類之數據, 併入運輸部門的能源消費做計算)與〈能源平衡表〉(經濟部能源局, 2021a)住宅部門與服務業部門之消費數據進行推估。《非生產性質行業能源查核年報》之用戶能源消費資料統計期間為2020年1月至12月; 其中, 非生產性質行業大用戶為電能契約用電容量超過800 kW之能源用戶, 雖查核年報沒有統計全臺建築之整體能源消耗, 但仍可根據大用戶之用電數據大致推估各建築類別之能源消費趨勢; 本研究各建築類別之能源消費量參考〈能源平衡表〉(經濟部能源局, 2021a)住宅部門與服務業部門之能源總消費量, 並利用《非生產性質行業能源查核年報》(2021c)之非生產性質行業大用戶各建築類別能源消費占比進行推估。

表3 各建築用戶分類之能源大用戶能源消費申報資料(經濟部能源局, 2021c)

用戶分類	大用戶 家數	電力	燃料油	液化 石油氣	天然氣	汽油	柴油	合計	占比
		(千度)	(公秉)	(公噸)	(千立方 公尺)	(公秉)	(公秉)	(千公秉 油當量)	(%)
學校	219	2,031,122	135	135	7,115	319	2,535	204.17	12.34
辦公大樓	194	1,323,205	0	0	1,054	60	69	127.61	7.71
醫院	155	2,357,678	3,687	274	32,789	236	3,840	266.17	16.09
量販店	99	708,499	0	108	2,232	0	30	70.11	4.24
百貨公司	116	1,624,136	0	1,165	15,770	3	4	172.53	10.43
旅館	92	687,185	819	2,362	23,632	27	3,328	96.46	5.83
政府機關	81	378,009	0	0	1,339	351	131	37.89	2.29
車站及軌道	71	2,344,070	0	0	0	12	71	224.07	13.54
電信網路機房	48	1,310,827	18	0	9	0	258	125.52	7.59
國防機關	44	336,165	527	82	1,011	168	539	34.45	2.08
研究機構	28	539,533	17	4	1,755	66	255	53.63	3.24
展覽館	26	178,580	0	16	18	37	63	17.20	1.04
複合式商場	33	252,023	1	161	1,488	0	3	25.79	1.56
汙水處理廠	15	357,230	0	0	309	0	30	34.47	2.08
倉儲	26	139,035	0	0	2	31	2,402	15.56	0.94
航空站	9	277,775	0	0	0	49	146	26.72	1.62
其他	150	1,082,055	2,232	34	4,560	67	12,336	122.09	7.38
合計	1,406	15,927,125	7,436	4,441	93,082	1,425	26,040	1,654.43	100



本研究將建築部門中重新劃分為商業建築(Commercial)、公用建築(Public)與住宅(Residential)三種建築類別，再細分至學校(School)、辦公大樓(Office building)、醫院(Hospital)、量販店(Hypermarket)、百貨公司(Department store)、旅館(Hotel)、政府機關(Government agency)、電信網路機房(Telecommunication facility)、國防機關(National defense agency)、研究機構(Research institution)、展覽館(Exhibition hall)、複合式商場(Compound shopping district)、汙水處理廠(Sewage treatment plant)、倉儲(Warehouse)、航空站(Airport)、住宅(Residential building)與其他(Else)共十七種建築用戶分類。其中，其他類別涵蓋KTV、文化中心、石化原料倉儲、安養院、冷凍冷藏倉儲、批發市場、原水加壓站、員工宿舍、高爾夫球場、停車場、教育訓練中心、港口碼頭、焚化廠、超級市場、郵局、會議中心、資源回收處理廠、遊樂場、零售市場、電視台、圖書館、廣播電台、影城、餐廳、檢驗機構、營建工地、療養院、殯儀館、職訓中心、體育場、體育館(有供應空調)、靈

骨塔、隧道及道路等。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 2020年臺灣能源供需概況

圖2為針對我國整體能源系統之2020年能源流桑基圖模擬結果，顯示各能源別與消費部門之能源供需流動分布現況。根據模擬結果，我國於2020年能源流的初級能源供給總量約為120,032千公秉油當量，其中，63,013千公秉油當量的初級能源將會轉變為發電做使用，占初級能源總供給的52.50%，並產生36,188千公秉油當量的能源損耗，能源轉換效率為42.57%。

在所有的消費部門(包含工業部門、運輸部門、建築部門、非能源消費與能源部門自用)中，工業部門共消耗26,377千公秉油當量，占總消費量的31.58%，為耗能最大的部門；其中，電力的使用約占工業能源總消費量的六成；工業部門細分出來的四個子項能源消費差異不大，每個子項皆消耗超過5,000千公秉油當量的能源。

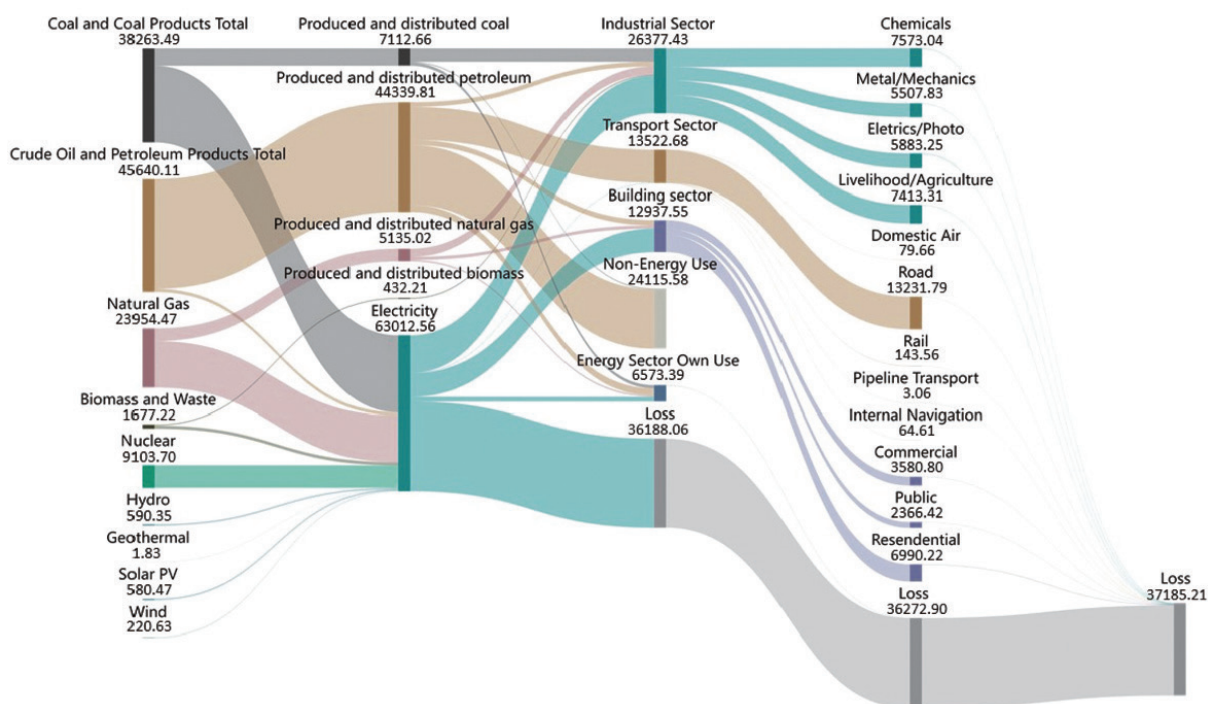


圖2 2020年臺灣能源流桑基圖；單位：千公秉油當量( $10^3$  KLOE)

運輸部門消耗13,523千公秉油當量(占總消費量的16.19%)；目前的能源供給幾乎皆來自於原油及石油產品，僅有極少部分來自於電力。運輸部門的子項中，公路占運輸部門能源總消費量的比高達97.85%，消耗13,232千公秉油當量，顯示我國現階段公路運具電氣化仍有很大的改善空間。

建築部門共能源消耗12,938千公秉油當量(占總消費量的15.49%)，並以電力消費為主；建築部門的子項中以住宅(Residential building)的消費占比最高，共消費6,990千公秉油當量(54.03%)；商業建築(Commercial)次之，消耗3,581千公秉油當量(27.68%)；公用建築最少，共消費2,366千公秉油當量(18.29%)。

### 3.1.1 工業部門(Industrial Sector)

圖3展示了顯示臺灣2020年工業部門的能源流消費細況。電力為當今工業部門的最大能源需求，共消費15,233千公秉油當量(占總能源供給的57.75%)；煤及煤產品次之，消耗5,524千公秉油當量(占總能源供給的20.94%)；第三

為天然氣，共產生3,323千公秉油當量的能源消費需求(占總能源供給的12.60%)。

在工業部門的四個子項中，化學製品業為能源消費需求最高的子項，共消費7,573千公秉油當量，其中50.96%來自於電力、24.10%來自煤及煤產品、15.78%來自天然氣以及剩餘的9.16%來自原油及石油產品；其次為生活用品及農業，共消費7,413.31千公秉油當量，其中46.96%來自電力、28.97%來自煤及煤產品與剩餘的24.07%由多到少排序分別來自天然氣、原油及石油產品以及生質能與廢棄物；第三為光電業，共消費5,883千公秉油當量，其能源的消費幾乎都來自電力，共占93.58%，僅6.42%來自於其他能源；第四為金屬及機械設備業，50.14%來自電力、32.06%來自煤及煤產品、剩餘的17.80%來自於天然氣與原油及石油產品。

### 3.1.2 運輸部門(Transport Sector)

圖4展示了臺灣2020年運輸部門的能源流消費細況。運輸部門的能源消費需求幾乎都來自於原油及石油產品，共消耗13,366千公秉油

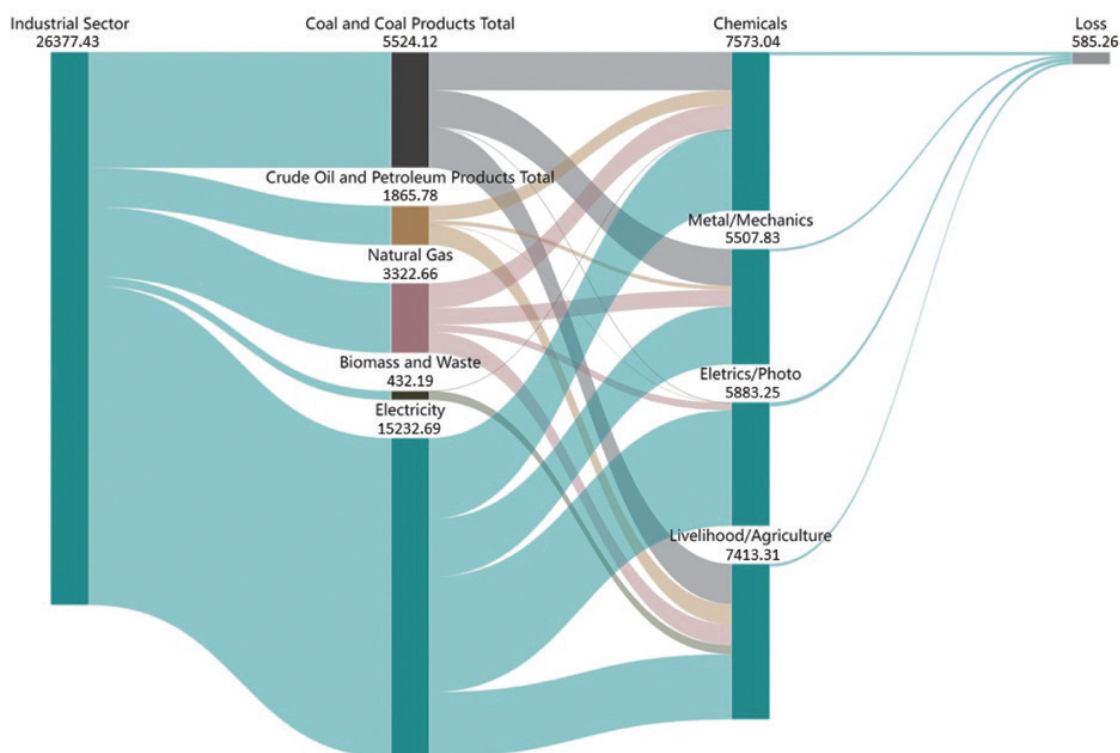


圖3 2020年臺灣工業部門能源流桑基圖；單位：千公秉油當量(10<sup>3</sup> KLOE)

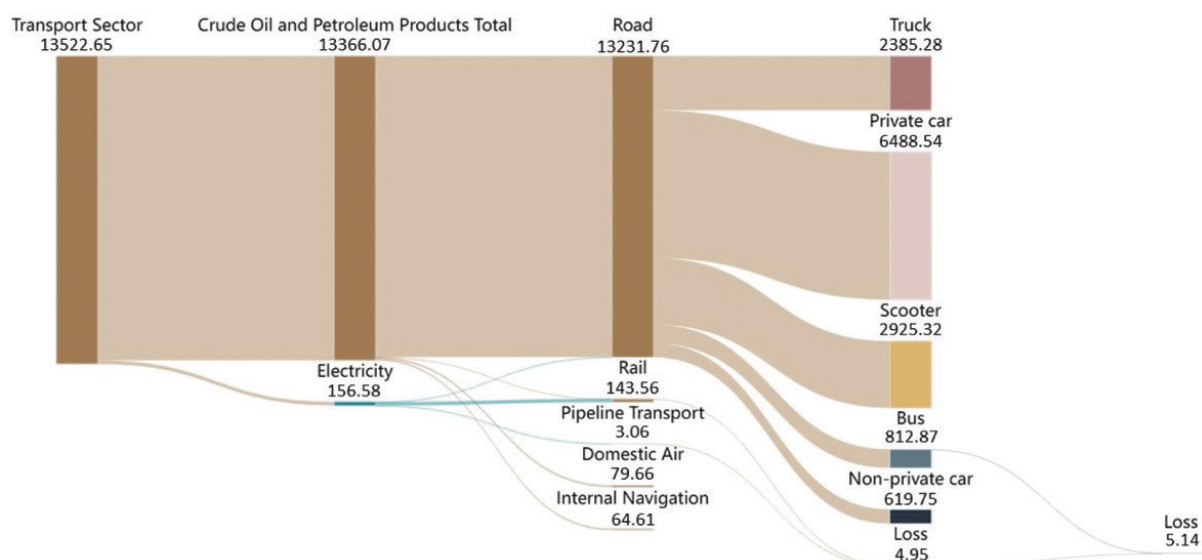


圖4 2020年臺灣運輸部門能源流桑基圖；單位：千公秉油當量(10<sup>3</sup> KLOE)

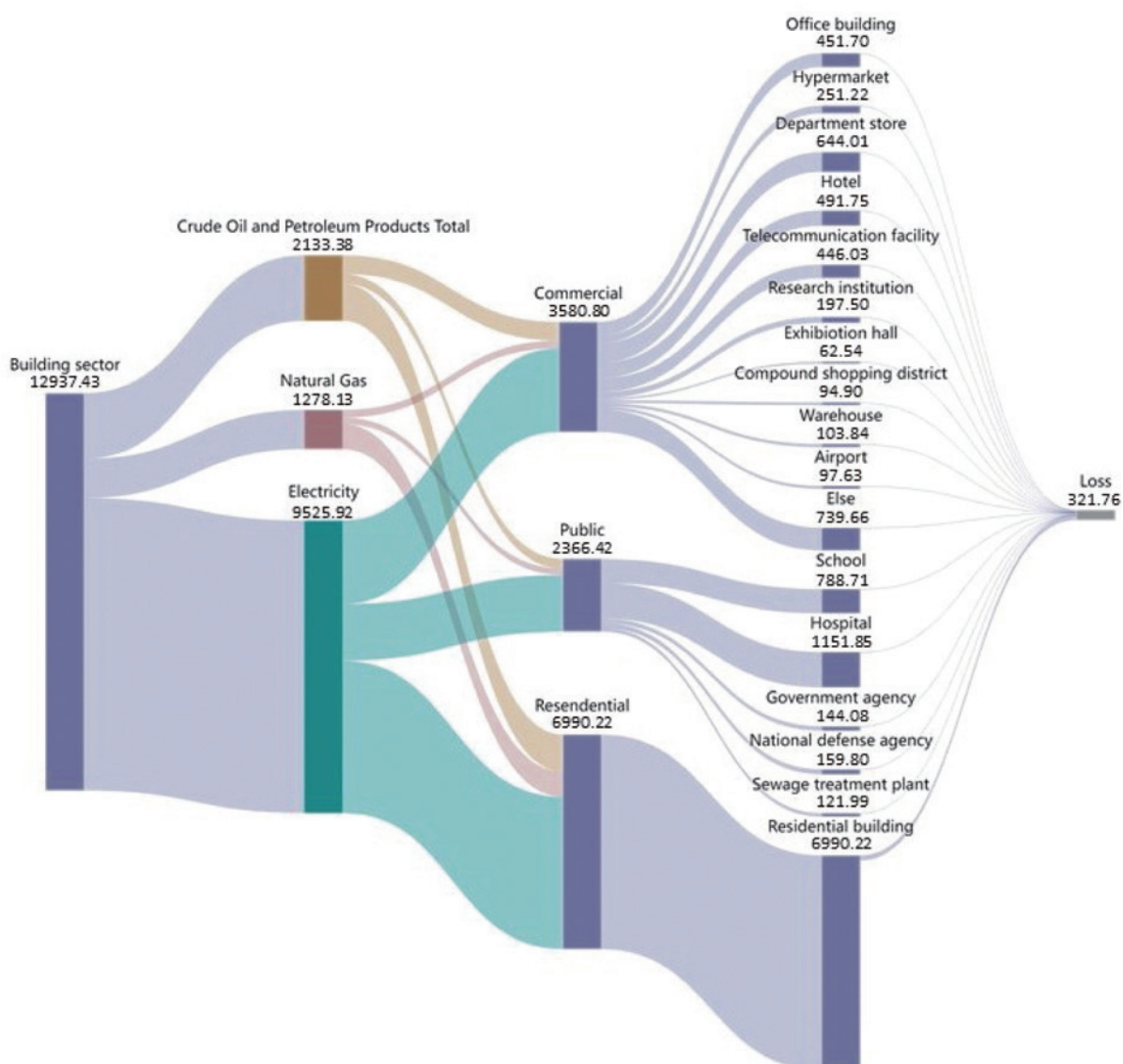


圖5 2020年臺灣建築部門能源流桑基圖；單位：千公秉油當量(10<sup>3</sup> KLOE)



當量(占總能源供給98.84%)，電力僅提供157千公秉油當量(1.16%)，顯示臺灣現階段之交通運具仍以燃油機動車為主。

針對運輸部門的子項，公路占運輸部門的能源總消費的大多數，共計13,232千公秉油當量，高達97.85%，為當今運輸部門的最大能源消費體。其中，原油及石油產品供能99.92%、電力供能0.08%；生質能與廢棄物提供公路約0.03千公秉油當量的能源，但由於相關資料不足且占比極小(不足0.01%)，故本研究將生質能與廢棄物之消耗量忽略不計，運輸部門之能源流細節圖也將忽略此能源不做呈現。運輸部門的其他項目(包含國內航空、國內水運、鐵路及管線運輸)總耗能為291千公秉油當量(2.15%)，國內航空及國內水運能源主要來自原油及石油產品；鐵道及管線運輸主要來自電力。

### 3.1.3 建築部門(Building Sector)

圖5展示了臺灣2020年建築部門的能源流消費細況。建築部門的能源多來自於電力，提供9,526千公秉油當量(占總能源供給的73.63%)；其次為原油及石油產品，提供2,133千公秉油當量(16.49%)；天然氣則提供1,278千公秉油當量(9.88%)。

建築部門中，能源消費占比最高的子項為住宅(Building Sector)，占總能源消費量的54.03%，其中電力消費共計4,962千公秉油當量(占住宅總消費的70.99%)、原油及石油產品消費1,208千公秉油當量(17.29%)、天然氣消費819千公秉油當量(11.72%)；商業建築占建築部門27.68%的總能源消耗，分別使用2,723千公秉油當量(占商業建築總消費的76.05%)電力、609千公秉油當量(17.00%)原油及石油產品與249千公秉油當量(6.95%)的天然氣；公用建築占建築部門18.29%的總能源消耗，分別使用1,840千公秉油當量(占公用建築總消費的77.77%)電力、316千公秉油當量(13.36%)原油及石油產品與210千公秉油當量(8.87%)的天然氣。

## 3.2 2050年淨零政策影響推估

本子章節將分別針對電力部門與運輸部門進行淨零政策下的潛在影響評估。

### 3.2.1 電力部門去碳化

電力部門去碳化為我國2050淨零排放政策之重大推展方向。為評估電力部門各能源別之發電量，本研究根據政策細則所規劃之各能源別目標發電量占比及裝置容量範圍，再配合情境分析對可能的火力、再生能源與氫能發電量組合進行探討(如表4所示)。在總發電量固定之下，我們計算出各情境下，火力發電與再生能源類別內之各子能源別可能占比組合，如表5所示。為避免類似的能源流圖重複呈現，本文僅針對情境一的結果做電力部門能源流細緻化之桑基圖繪製。

圖6為2020年臺灣電力部門能源流細緻化分析與2050年淨零政策下潛在影響推估的模擬結果。2020年與2050年的電力總需求量分別為26,747與53,027千公秉油當量，符合《臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明》(國家發展委員會等單位，2022)所預估之至2050年的長期電力消費年均成長率 $2\% \pm 0.5\%$ 。圖7為2020年與2050年電力部門各能源別的發電量占比，顯示我國未來將大幅降低化石燃料發電的占比，並大力推動再生能源與創新潔淨能源(如氫能及生質能)之發展，電力部門的發電量由2020年的以化石燃料為主(82.23%)，轉變為2050年以再生能源發電為主(60%，不包含12%氫能)。從初級能源的供給量(非發電量)來看，煤及煤產品、原油及石油與天然氣等化石燃料從51,271千公秉油當量(82.23%)減少為29,893千公秉油當量(28.39%)；太陽能、風力、地熱及生質能與廢棄物等再生能源總供給量由2,048千公秉油當量(3.25%)增至66,894千公秉油當量(63.54%)；氫能發展亦為2050年淨零排放政策的一大突破，並預計達到7,954千公秉油當量(7.56%)；核能則根據政府非核家園政策，由原本的9,104千公秉

表4 2050淨零政策下可能之發電量占比情境

	火力發電	再生能源	水力	氫能
情境一	27%	60%	1%	12%
情境二	25%	65%	1%	9%
情境三	20%	70%	1%	9%

表5 各能源別發電量與占比之情境分析模擬結果

能源種類	煤及煤產品	原油及石油	天然氣	核能	太陽光電	風力	地熱	生質能及廢棄物	水力	氫能
情境一										
發電量 (10 <sup>3</sup> KLOE)	2,539.99	79.54	11,697.76	0	7,034.75	18,546.92	2,911.06	3,413.48	530.27	6,363.24
占比(%)	4.79	0.15	22.06	0	14.77	31.96	6.11	7.16	1	12
情境二										
發電量 (10 <sup>3</sup> KLOE)	2,351.47	74.52	10,830.77	0	7,620.98	19,995.00	3,153.65	3,697.94	530.27	4,772.43
占比(%)	4.43	0.14	20.43	0	16	34.62	6.62	7.76	1	9
情境三										
發電量 (10 <sup>3</sup> KLOE)	1,881.17	59.61	8,664.61	0	8,207.21	21,533.07	3,396.24	3,982.39	530.27	4,772.43
占比(%)	3.55	0.11	16.34	0	17.23	37.29	7.13	8.36	1	9

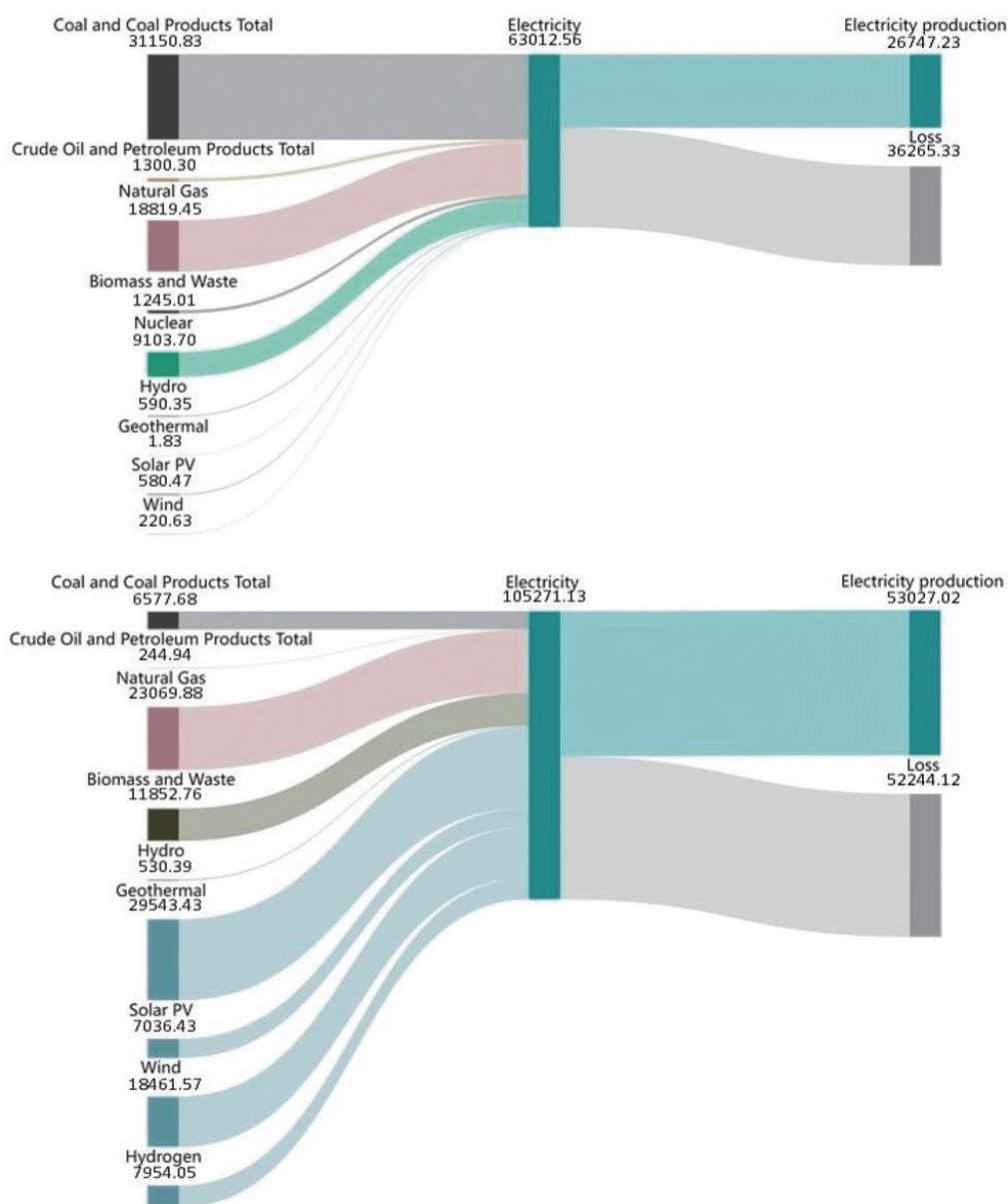


圖6 2020年(上)與2050年(下)臺灣電力部門能源流桑基圖；單位：千公秉油當量( $10^3$  KLOE)

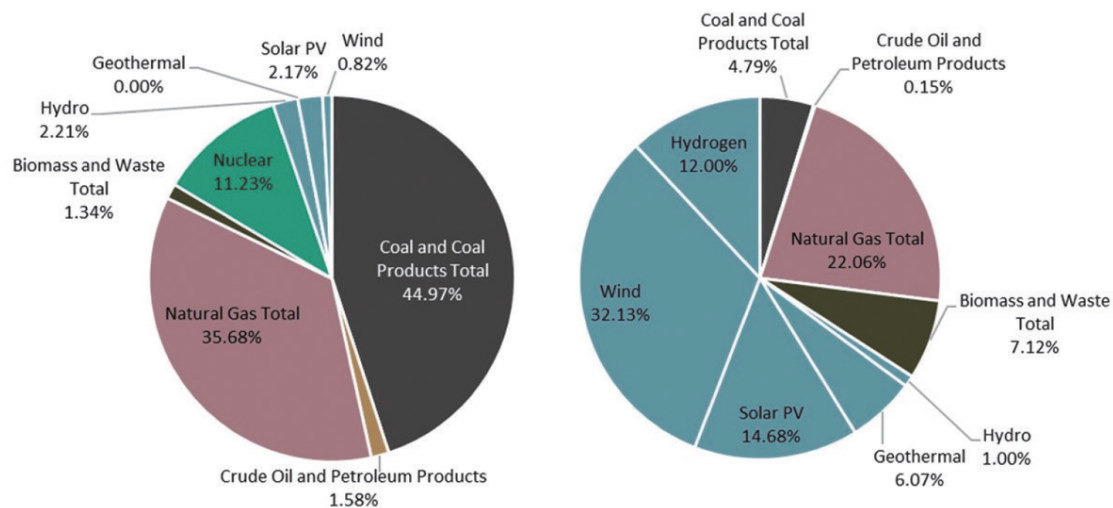


圖7 2020年(左)與2050年(右)臺灣電力部門各能源別發電量占比



油當量(14.45%)降至零(0%)。

根據經濟部能源局〈能源平衡表〉(2021a)之2020年能源供需統計數據，本研究對各能源別的能源轉換效率加以推估，如表6所示。讀者可察覺水力、太陽能與風力發電沒有列在表6裡，這是由於他們在初級能源統計上相較困難，因此當今各國能源局多以次級能源量(即發電量)代替之。Sauar (2017)曾指出，此統計方法急需被改變，以反映世界各國在再生能源部署的真正進程。

### 3.2.2 運輸部門電動化

為了更詳細的評估2050淨零政策下對運輸部門電力化產生之潛在影響，本研究針對運輸部門之最大源消費體—公路部門進行細緻化的分析。根據Tsai *et al.* (2022)的臺灣車輛模型，可得知運輸公路部門2020年與2050年各車種的能源消耗量(如表7與表8所示)。在淨零政策

下，2050年的電動運具(包含小客車、機車及公車)的保有量市占率將達到80%。能源流分析結果繪製於圖8與圖9。由圖可看出，2050年的運輸公路部門能源消費量從2020年的13,231千公秉油當量(不包含損耗及占比不到0.01%的生質能)降至4,479千公秉油當量，共減少66.15%的能源總消費量。此外電力在公路部門能源來源的占比明顯提升，由2020年的0.07%提升至2050年的17.94%，其中尤以自用小客車的上升幅度為最，從0.02%提升至27.81%；公路部門「原油及石油產品」的消費量也呈現明顯下降，由13,222減為3,676千公秉油當量，顯示在2050淨零政策的影響下，燃油機動車所導致之碳排放量應也有顯著下降。

自用小客車為公路運輸部門的能源消費之首。與2020年相比，自用小客車的能源消費從2020年的6,489千公秉油當量降至2050年的2,064千公秉油當量，共減少68.19%的總能源消耗；

表6 電力部門各能源別之能源轉換效率

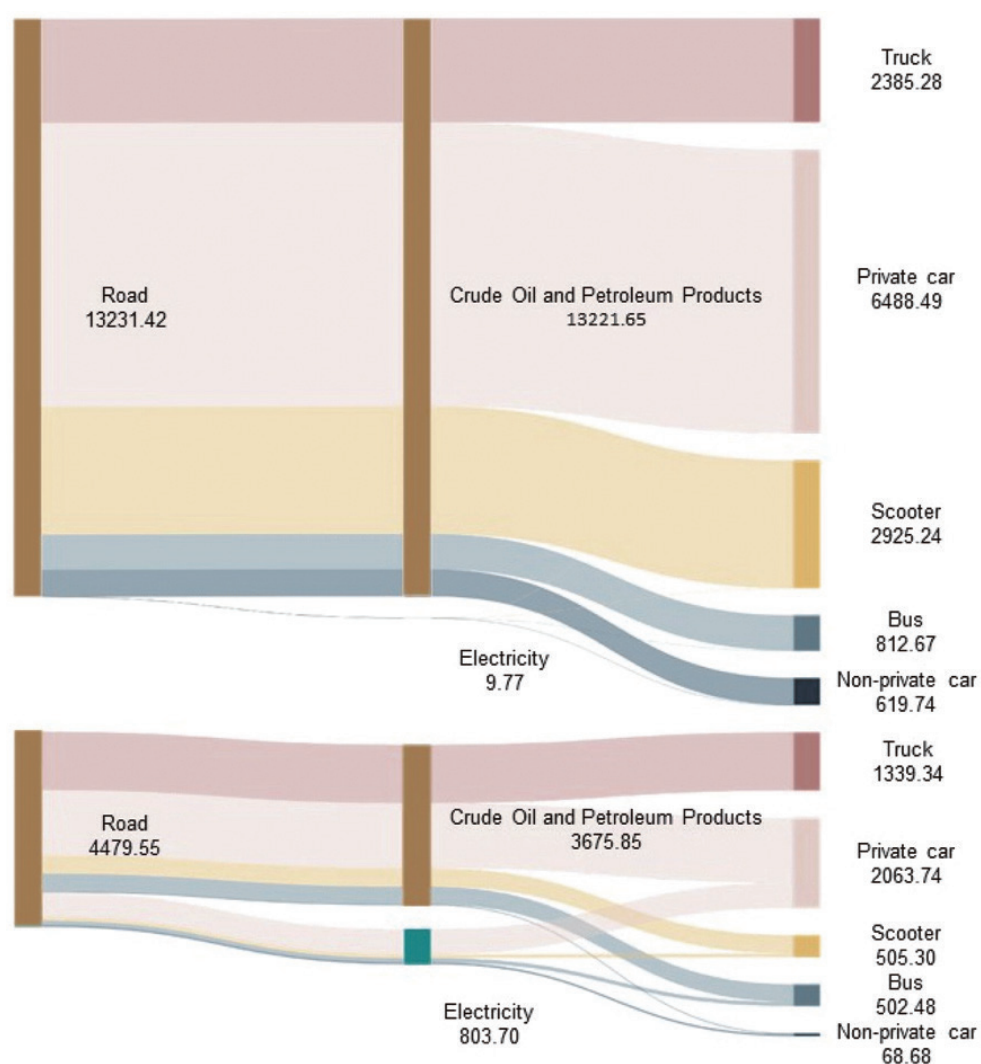
能源種類	煤及煤產品	原油及石油	天然氣	核能	地熱	生質能及廢棄物
能源效率(%)	38.61	32.47	50.71	32.99	9.85	28.80

表7 2020年運輸公路部門能源消費量推估結果

車種		能源消費量(千公秉油當量)
Private car	Gasoline private car	6,236.66
	Diesel private car	250.57
	Electric private car	1.26
Scooter	Gasoline Scooter	2,922.87
	Electric Scooter	2.37
Bus	Diesel urban bus	462.88
	Diesel tour bus	343.97
	Electric urban bus	5.82
Truck	Diesel heavy-duty truck	1,374.71
	Gasoline light-duty truck	612.79
	Diesel light-duty truck	397.78
Non-private car	Gasoline non-private car	522.03
	Diesel non-private car	97.40
	Electric non-private car	0.31

表8 2050年運輸公路部門能源消費量推估結果

車種		能源消費量(千公秉油當量)
Private car	Gasoline private car	1,337.32
	Diesel private car	152.53
	Electric private car	573.89
Scooter	Gasoline Scooter	419.57
	Electric Scooter	85.73
Bus	Diesel urban bus	0.00
	Diesel tour bus	406.21
	Electric urban bus	96.27
Truck	Diesel heavy-duty truck	734.50
	Gasoline light-duty truck	313.96
	Diesel light-duty truck	290.89
Non-private car	Gasoline non-private car	6.55
	Diesel non-private car	14.34
	Electric non-private car	47.80

圖8 2020年(上)與2050年(下)臺灣運輸公路部門能源流桑基圖；單位：千公秉油當量(10<sup>3</sup> KLOE)

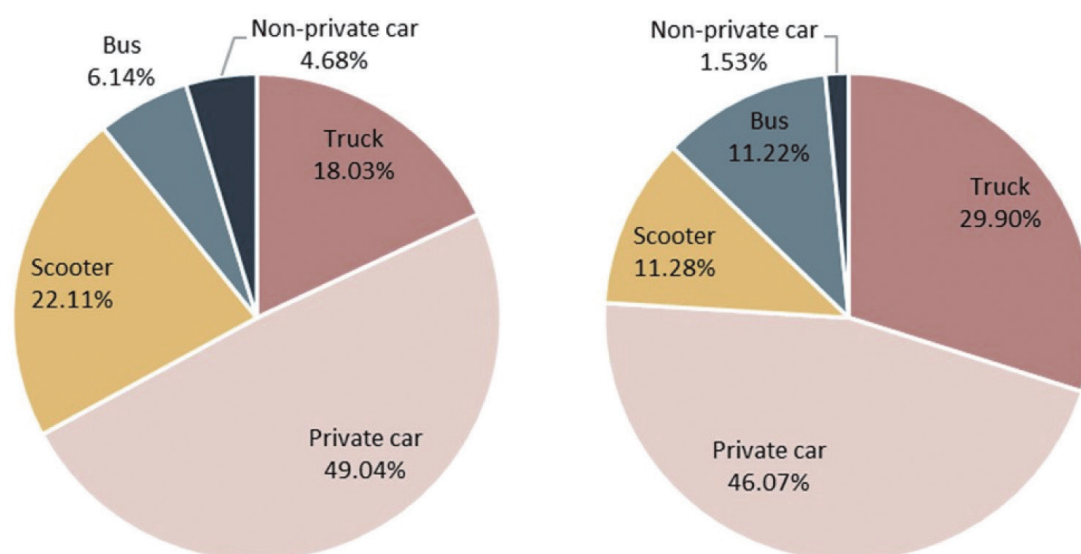


圖9 2020年(左)與2050年(右)臺灣運輸公路部門各車種能源消費占比

公車減少38.17%、貨車減少43.85%、機車減少82.73%、非自用小客車減少88.92%的能源消費需求。

## 4. 總 結

本研究以桑基圖為架構對臺灣能源現況(2020年)的能源流動分布進行了完整的分析及推估，並針對電力部門去碳化與運輸部門電力化探討2050年淨零政策下的潛在影響。藉由將能源的流動情形完整量化呈現，可瞭解臺灣能源系統各階段之流量(Flow)、存量(Stock)及能量損耗(Loss)的情形與政策影響，以進一步協助相關能源管理策略之擬定。研究結果表明：

(1)工業部門占我國總能源消費量逾三成，且一半需求由電力所供給；其中又以化學製品業為最大的耗能子項；(2)運輸部門為當前我國能源部門中第二大的消費部門(占16%)，其初級能源的供給幾乎皆來自於原油及石油產品。然而隨著運具電動化政策的推行，消費的能源形式預期將逐漸轉變為電力，由2020年的0.07%提升至2050年的17.94%；運輸部門中公路子項的能源消費量相比於2020年，預期將在2050年減少66.15%；(3)建築部門為我國現今第三大的能源消費部門，子項貢獻量由大到小依序為住宅、

商業建築與公用建築；主要依賴的能源形式為電力(占近四分之三的該部門能源需求)；(4)我國目前的電力部門主要仰賴煤及煤產品(占比近五成)，但在淨零政策下，2050年的煤貢獻預期將降至約5%，取而代之的是再生能源與氫能的發電。在能源終端使用部門推廣電氣化的同時，電力部門的去碳化將扮演至關重要的角色，以發揮能源耦合帶來的減碳加乘效益。

本研究之能源流分析成果可作為臺灣永續淨零發展的能源管理的參考基準，具有高度學術研究及實務應用之價值。目前的研究僅針對當今政策主力發展的電力部門去碳化與運輸部門電動化進行細緻化的推估，未來預計納入所有部門進行探討，並加入碳流(Carbon emission flow)做綜合分析，以瞭解能源使用、轉換、平衡與碳排放量之關係，並可協助我國相關淨零政策之擬訂，以加速臺灣能源系統低碳轉型。

## 誌 謝

本論文為科技部補助編號MOST 109-2222-E-002-006-MY2之專題計畫。由於科技部的支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。



## 參考文獻

- 台灣電力公司，2022。購入電力概況-再生能源。 <https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=207&cid=165&cchk=a83cd635-a792-4660-9f02-f71d5d925911>。(擷取日期 2022年11月7日)
- 國家發展委員會、行政院環境保護署、經濟部、科技部、交通部、內政部、行政院農業委員會與金融監督管理委員會，2022。臺灣2050淨零排放路徑及策略總說明。
- 曾偉峻、陳厚銓、張綜桁、張天昱與謝依芸，2022。臺灣電力碳密集度現況研究與淨零政策之展望，臺灣能源期刊，第9卷第4期。
- 經濟部能源局，2020。能源轉型白皮書(核定本)。
- 經濟部能源局，2021a。能源平衡表。 [https://www.esist.org.tw/publication/page01\\_detail?Id=30427c7ed1a1](https://www.esist.org.tw/publication/page01_detail?Id=30427c7ed1a1)。(擷取日期：2022年5月30日)
- 經濟部能源局，2021b。109年能源供給概況(經濟部能源局，2021a)況。 [https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu\\_id=14435](https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu_id=14435)。(擷取日期：2022年8月25日)
- 經濟部能源局，2021c。2021年非生產性質行業能源查核年報。
- 經濟部能源局，2022。再生能源統計資料。 <https://www.re.org.tw/information/statistics.aspx>。(擷取日期：2022年11月8日)
- 蕭子訓、黃孔良與葛復光，2018。我國再生能源年發電量的評估與機率分布研究，臺灣能源期刊，第5卷第2期。
- 樊靜麗、魏世杰與張賢，2018。2015年中國能源流與碳流分析，北京理工大學學報(社會科學版)，第20卷第4期。
- Abdelalim, A. and W. O'Brien, 2017. Data Visualization and Analysis of Energy Flow on a Multi-Zone Building Scale. *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 258-273.
- Bakkenne, A., W. Nuttall and N. Kazantzis, 2016. Sankey-Diagram-Based Insights into the Hydrogen Economy of Today. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 7744-7753.
- Chung, J.-L., S. N. T. Le and C.-L. Chen, 2019. New Perspective on the Augmented Taiwan Energy Flow Diagram. *Low Carbon Economy*, vol. 10, no. 2, 2, pp. 59-80.
- International Energy Agency, 2019. Offshore Wind Outlook 2019. <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>. (Retrieved November 7, 2022)
- International Energy Agency, 2021a. Geothermal Power. <https://www.iea.org/reports/geothermal-power>. (Retrieved November 7, 2022)
- International Energy Agency, 2021b. Bioenergy Power Generation. <https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>. (Retrieved November 7, 2022)
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2022. Chapter 2: Geothermal Takes the Stage. <https://www.energy.gov/eere/articles/chapter-2-geothermal-takes-stage>. (Retrieved November 7, 2022)
- Our World in Data, 2022. Energy use per person. <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>. (Retrieved August 13, 2022)
- Perez-Lombard, L., J. Ortiz and I. R. Maestre, 2011. The Map of Energy Flow in HVAC Systems. *Applied Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 5020-5031.
- Ritchie H, and M. Roser, 2020. Emissions by sector. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. (Retrieved August 13, 2022)
- Sauar E., 2017. IEA Underreporting Solar & Wind

- Energy 3–4x Compared To Fossil Fuels. <https://cleantechnica.com/2017/09/05/iea-underreporting-solar-wind-3-4x-compared-fossil-fuels/>. (Retrieved November 7, 2022)
- Subramanyam, V., D. Paramshivan, A. Kumar and Md. A. H. Mondal, 2014. Using Sankey Diagrams to Map Energy Flow from Primary Fuel to End Use. *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 342-352.
- Tsai, C.-Y., T.-H. Chang and I.-Y. L. Hsieh, 2023. (To be published in January 2023) Evaluating vehicle fleet electrification against net-zero targets in scooter-dominated road transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 114, 103542. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103542>.
- U.S. Energy Information Administration, 2019. Nearly half of U.S. geothermal power capacity came online in the 1980s. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=42036>. (Retrieved November 7, 2022)

# Sankey-Diagram-Based Insights into Taiwan's Energy Flow: Status Quo and Net-Zero Future

Kai-Yun Lo<sup>1</sup>   Ting-Ling Chien<sup>2</sup>   Hsin-Yun Tsai<sup>3</sup>   I-Yun Lisa Hsieh<sup>4\*</sup>

## ABSTRACT

To fight against climate change, Taiwan has recently published “Taiwan’s Pathway to Net-Zero Emissions in 2050”, which provided practical action plans for achieving the long-term reduction targets. Great impacts are anticipated during the transition toward a net-zero future. Understanding energy flows from resources to end users is essential for reducing the carbon footprint. Therefore, this study traces the energy flows throughout Taiwan’s economy in 2020 using Sankey diagrams, mainly based on the Energy Balance Sheet. Three main energy stages are identified and well examined: primary energy supply, energy transformation, and energy consumption. Moreover, this study explores the potential energy flow impacts of the 2050 net-zero policy, focusing on the impacts of decarbonizing electricity generation and electrifying on-road vehicles. From now to 2050, the power sector will gradually shift to renewable-dominated systems, and the electricity consumption in the road transport sector will increase to nearly 18%. The Sankey diagrams of energy flow established in this paper serve as a valuable tool in sustainable development and energy management, contributing academic and practical insights to the ongoing net-zero transition.

**Keywords:** Energy Flow Analysis, Sankey Diagram, 2050 Net-Zero Policy, Renewable Energy.

---

<sup>1</sup> Graduate Student, Computer Aided Engineering Division, Department of Civil Engineering, National Taiwan University.

<sup>2</sup> Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University.

<sup>3</sup> Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, National Taiwan University.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Department of Chemical Engineering, National Taiwan University.

\*Corresponding Author, Phone: +886-2-33664259, E-mail: [iyhshieh@ntu.edu.tw](mailto:iyhshieh@ntu.edu.tw)

Received Date: August 31, 2022

Revised Date: November 08, 2022

Accepted Date: November 16, 2022