

公車候車亭的綠色轉型：太陽能光電與儲能技術的實踐與效益

簡元璽¹ 謝依芸^{2*}

摘要

在《巴黎協定》推動下，全球已將減碳目標置於核心位置，其中太陽能技術以其可再生性快速崛起為重要能源選項之一。傳統公車候車亭普遍依賴城市電網供電，這不僅增加了能源負荷，也限制了其功能性的提升。本研究聚焦於臺北市公車候車亭安裝太陽能發電設備的季節性分析，並透過淨現值法評估裝設發電及儲能設施的成本效益，探索實現能源自給自足的可能性。研究結果顯示，在配置適當儲能設施的情況下，候車亭在二月至十月可基本實現能源自給自足，而在十一月至次年一月則需部分依賴市電。進一步的情境分析表明，單獨安裝太陽能板可減少32.5%的營運費用，而結合儲能設施後可進一步降低69.1%的費用。然而，在無躉購費率支持下，資本回收的時間較長，僅安裝發電設施的情境甚至無法在可預見的未來達到收支平衡。導入躉購費率後，成本回收的時間可縮短至11.8年，大幅提升經濟效益。此外，發電效率、碳排放成本和裝置容量對經濟效益有顯著影響，故在選擇裝置及地點時需要仔細評估以確保最佳發電效率。本研究為相關利害關係者和政策制定者提供了堅實的數據支持，推動太陽能公共設施中的應用，並助力實現全球永續發展目標。

關鍵詞：公車候車亭，太陽能，躉購費率，經濟效益分析，綠色交通

1. 前言

《巴黎協定》所設定的雄心勃勃目標是將全球溫度上升限制在1.5°C，這凸顯了加速發展可再生能源以減少溫室氣體排放的關鍵需求(Colangelo *et al.*, 2021)。在這些可再生能源中，太陽能光伏(Photovoltaic, PV)能源脫穎而出，並且經歷了前所未有的增長。從2015年到2021年，太陽能發電裝置容量每年增長約25%，使其成為過去十年增長最快的能源來源(Lempriere, 2024)。根據國際能源署

(International Energy Agency, IEA)的最新統計數據，太陽能裝置容量僅在過去兩年內就增長了近50%，大大超過了2021年淨零排放情境2050(Net-Zero Emissions Scenario 2050)中的早期預測(IEA, 2023)。這個現象顯示了發展和利用可再生能源已經成為了全球共識，並成為各個國家制定政策的重要組成因素。太陽能，作為最具潛力的可再生能源之一，以其取之不盡、用之不竭的特性，正在被廣泛應用於各種基礎設施建設中(International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020)。

¹ 國立臺灣大學 土木工程學系電腦輔助工程組 碩士生

² 國立臺灣大學 土木工程學系、化學工程學系(合聘) 副教授

*通訊作者，電話：02-33664259，電郵：iyhsieh@ntu.edu.tw

收到日期: 2024年08月28日

修正日期: 2024年10月06日

接受日期: 2024年10月23日

公車候車亭作為城市公共交通系統的關鍵設施，不僅滿足市民日常出行需求，同時也反映城市形象。傳統候車亭普遍依賴城市電網供電，這不僅增加城市能源負擔，也限制了偏遠地區公交設施的拓展。因此，提升候車亭的功能性並減少對電網的依賴，成為城市規劃和公交設計中的重要課題。近年來，隨著太陽能技術的進步及成本下降(IRENA, 2020)，這些技術的應用範圍亦日益廣泛。特別是公車候車亭的頂部(雨遮)，通常是未被充分利用的理想位置，這些地方常無遮蔽物，成為安裝太陽能板的理想地點(Santos, 2020)。透過增加太陽能發電裝置，不僅可實現能源自給自足，還能將多餘的電力回饋至電網，供其他設施使用，進而增強整體能源利用效率。這不僅減少了對傳統能源的依賴，也有助於降低碳排放，推動節能減排，並促進公共交通設施的永續發展。然而，高昂的初期設置成本是推廣太陽能技術的一大障礙(IRENA, 2020)。為此，政府已推出多項政策支持太陽能板的應用，包括提供保證年數的躉購費率(Feed-in Tariff, FIT)以及太陽能發電系統建置補助(工業技術研究院, 2024)，以降低投資風險並提高長期回報。這些措施不僅鼓勵了太陽能的廣泛應用，也為公車候車亭的綠色轉型提供了堅實的支持，進一步推動了城市能源效率的提升及公共交通設施的功能和環保效益的雙重優化。

國外已有多項研究和實施案例探討了候車亭安裝太陽能裝置的可行性。Mutani *et al.* (2017)在義大利杜林「To Wait in a New Way」案例(Bertetto, 2017)中，分析了太陽能候車亭採用連網與離網模式的效益。他們指出，離網模式需配備儲能系統並定期維護，導致經濟效益較低，且多餘的發電量無法有效利用，造成資源浪費。相比之下，連網模式由於免除儲能設備的高昂成本，顯著提高了經濟效益。Santos

et al. (2020)則利用太陽輻射地理資訊圖分析了葡萄牙里斯本的公車候車亭發電潛力，結果顯示超過一半的候車亭具備安裝太陽能發電設施的潛力。這些研究強調了安裝太陽能發電設備在候車亭中的高實用性和經濟效益。然而，臺灣針對候車亭太陽能發電的全面研究仍顯不足，尤其在探討併網後使用躉購費率的經濟效益方面，少有深入分析。本研究填補了這一空白，不僅分析了國內外多個成功的太陽能候車亭案例，還以臺北市公共運輸處的試辦場域作為案例，構建了三種情境，計算並比較安裝太陽能發電裝置後達到收支平衡所需的年數。同時，我們對併網後使用躉購費率的經濟效益進行了全面評估，並透過敏感度分析揭示了在不同條件下的財務可行性。

為了進一步促進太陽能候車亭技術的推廣與實施，我們還開發了一個簡易評估工具，供有意安裝此類設施的使用者與政策制定者探索其經濟效益，該工具可在以下網址獲取：<https://e3group.caece.net/Solar-PV-on-Bus-Shelter/>。

2. 國內外太陽能候車亭案例分析

本章節將探討國內外數個具代表性的太陽能候車亭案例。首先介紹的是臺灣地區，包括新北市、臺東縣及臺中市的實施情況，隨後將對比國際上的創新實例，特別是英國倫敦和新加坡的案例，展示這些地區在推進綠色交通方面的獨特策略及技術應用。

2.1 國內案例

新北市政府交通局自2021年7月起積極推動太陽能候車亭的建設，並附設智慧站牌於捷運頭前庄站、捷運幸福站等重要站點。這些候

車亭上方裝設的太陽能板每天能提供約200瓦特小時的電力，足以供應候車亭及其智慧站牌的運行需求。站牌採用電子紙技術，具有抗紫外線、防反射與防污特性，夜間照明消耗的電量約為63瓦時。由於裝設過程中無需挖掘或埋設電線，整個設置僅需一天，實現了節能與環保的雙重效果(新北市政府交通局，2022)。

新北市的太陽能板選用小型且模組化的設計(如圖1所示)，這不僅降低了初期建設成本，也有助於保持候車亭結構的穩定性。此外，低耗能的電子紙顯示技術確保即使是小容量太

陽能板也能有效發揮作用。根據電子紙的特性，其操作溫度範圍在0至50攝氏度之間(Good Display, 2024; Pervasive Displays, 2023)，符合臺灣的氣候條件，因此無論寒暑，電子紙都能穩定運作，顯示效果不受影響。候車亭可分為連網式和離網式兩種類型，前者如捷運幸福站(圖2)，在發電量不足時可以通過電網補充電力，確保穩定供電；後者如山光社區站(圖3)，適合設置在難以連接電網或連接成本較高的地區，依靠足夠的太陽能板和儲能設施，即使在無電網覆蓋的情況下也能正常運行。



資料來源：新北市政府交通局(2022)

圖1 低耗能電子紙顯示螢幕



資料來源：Google Maps (2022a)

圖2 連網式站點：捷運幸福站太陽能候車亭



資料來源：Google Maps (2024)

圖3 離網式站點：山光社區太陽能候車亭

臺東縣政府(2022)在重要交通和觀光站點建置了14座裝設太陽能板的電子紙公車站牌(圖4)，這些站牌可靠太陽能充電，持續運作超過10天。而臺中市政府(2018)自2017年以來，在推廣綠色交通的過程中增設了210座裝有太陽能及照明設施的候車亭(圖5)，由於當地良好的發電條件，這些候車亭的太陽能板將帶來更顯著的經濟效益。

2.2 國外案例

在國外案例中，英國倫敦於2016年推出的太陽能候車亭尤為引人注目(Newatlas, 2016)，如圖6所示。該候車亭採用建築整合型半透明太陽能板(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)，面積達25平方公尺，年發電量可達2,000度電，主要用於照明和資訊看板。這種候車亭在視覺上極具吸引力，能夠和城市景觀完美融合，提升了公共空間的美觀及環保意識。然而，這種設計的高造價和相對低的轉換效率(6%至12%之間)使得其成本效益比需要進一步提高。



資料來源：臺東縣政府(2022)

圖4 臺東高商太陽能候車亭



資料來源：臺中市政府(2018)

圖5 后里火車站太陽能候車亭



資料來源：Newatlas (2016)

圖6 英國倫敦半透明太陽能候車亭

另一個值得一提的創新案例是新加坡的新型多功能公車候車亭(Kirk, 2017)，如圖7所示。該候車亭整合了借書功能、資訊面板，並在雨遮上設置花園和太陽能板，甚至裝有鞦韆。此案例展示了未來公共交通設施的多功能性和創新潛力，儘管太陽能板的直接影響有限，但其對提升城市生活品質和可持續發展的貢獻不容小覷。此外，Trueform (2013)展示了於阿拉伯聯合大公國候車站牌裝設太陽能板的實際應用情況(圖8)，太陽能板的設計已被廣泛應用於供電候車站牌，這些設計不僅提供照明，也支援

資訊顯示板的運作。特別在日照充足的阿拉伯聯合大公國，利用太陽能發電的效率極高，能確保這些設施即使在偏遠或未覆蓋電網的地區也能持續運行，有效地維持照明和資訊顯示的功能。

3. 研究方法

3.1 案例介紹

本研究的案例分析對象選定為「士林官邸



資料來源：Kirk (2017)

圖7 新加坡多功能候車亭



資料來源：Trueform (2013)

圖8 阿拉伯聯合大公國太陽能站牌

(中正)」站的公車候車亭，該站點為臺北市公共運輸處安裝太陽能發電及儲能裝置的試辦場域，位於臺北市士林區中正路上，具體方向往西行(如圖9)。此候車亭採用長廊式設計，能同時容納大量乘客。在設計上，頂部雨遮覆蓋範圍約為64.5平方公尺，面向北方，並具備10°的傾角設計。為了滿足乘客的基本需求，候車亭內部安裝了15組LED照明設備，以保證夜間和天候不佳時的足夠光照。另外，候車亭內還設置了2組智慧型站牌，能即時提供乘客公車到站

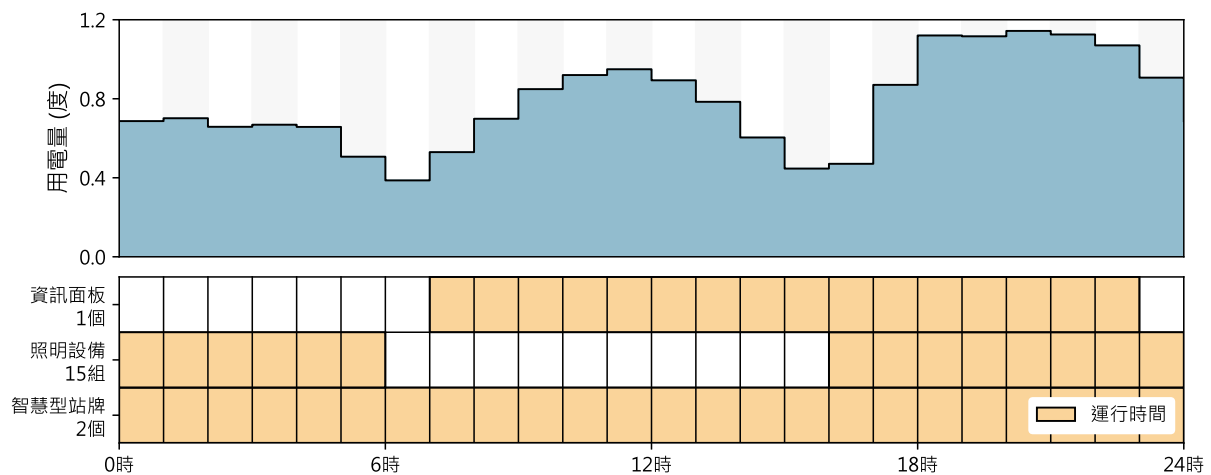
的準確資訊。此外，1組資訊服務面板也安裝於候車亭內，提供了包括路線查詢、天氣資訊等功能，方便乘客進行即時查詢。候車亭的能源需求主要來自於以上提及的照明設備及資訊顯示設備，其每日的平均用電曲線如圖10所示，並展示了不同設備的開放時間。

在此試辦案中，候車亭的頂部雨遮安裝了6.3瓩的太陽能發電裝置，並搭配了一個7.2瓩的儲能裝置，這些裝置為候車亭提供了部分電力來源。為了確保太陽能板的重量不會影響候車



資料來源：Google Maps (2022b)

圖9 士林官邸(中正)候車亭地理位置示意圖



資料來源：本研究繪製

圖10 士林官邸(中正)候車亭平均用電曲線以及各裝置開放時間示意圖

亭的結構穩定性，此次試辦案選用了輕量的可撓式太陽能板，這種太陽能板具有高柔韌性且重量輕的特點，降低了對結構的負荷。然而，由於候車亭目前僅具備單向充電的能力，這意味著當太陽能發電不足時，仍需要從電網中取電來滿足需求，但當太陽能發電量超過需求時，多餘的電力無法回售給電網，這限制了系統的能效發揮。

3.2 發電潛能比較

為了全面評估試辦地點的太陽能板發電潛能，本研究採用了容量因子(Capacity Factor, CF)作為核心的效能評估指標。容量因子是一個重要的性能指標，它衡量了實際發電量與理論最大發電量之間的比率，公式如下：

$$CF = \frac{G}{G_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

其中，CF代表容量因子，G為實際每日總發電量， G_{\max} 為理論最大發電量，即裝置容量。容量因子提供了對太陽能板在不同天候條件下發電效率的深入洞察，高容量因子意味著該地點具有更佳的光照資源和更高效的太陽能利用率，適合作為太陽能發電場域。

在本研究中，我們不僅關注試辦地點的容量因子，還通過比較附近其他光電站以及不同年份的容量因子，更全面地評估試辦地點的發電潛力和經濟效益。這樣的比較分析能夠揭示試辦地點在區域內的相對優勢，並幫助我們預測未來可能的發電量及其對經濟效益的影響。

3.2.1 比較對象介紹

為了確保分析的準確性和代表性，我們選擇了兩個與試辦地點具有地理和氣候相似性的比較對象，分別為淡水3.5萬噸配水池光電站(以下簡稱「淡水光電站」)的歷史發電數據以及2021年同期同地點的預測發電數據(以下簡稱「預測數據」)。

首先，淡水光電站由台灣電力公司運營(政

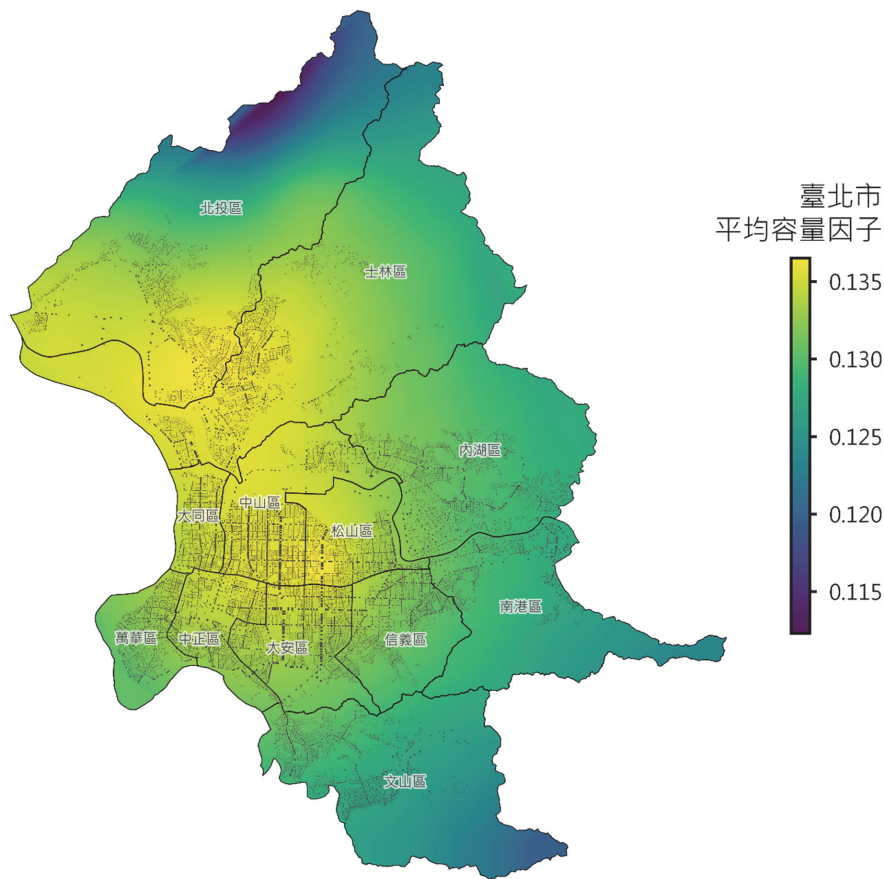
府資料開放平臺, 2024)，該光電站位於試辦站點西北方約12公里處，地理位置如圖11所示。淡水光電站配備了307瓩的矽基型太陽能板，為區域內的重要發電設施之一。選擇淡水光電站作為比較對象，主要是因為其與試辦站點在地理位置及氣候條件上具有高度的相似性，這使得我們能夠通過比較其容量因子來預測試辦地點的發電潛力。

其次，我們參考了學術論文中的預測方法，以進一步補充我們的分析。Feng *et al.* (2023)學者在其研究中，運用了克利金法(Kriging Method)對中央氣象局地面測站的氣象資料進行空間內插，提升了數據的空間覆蓋範圍與品質，並結合人工智慧模型對台電各地光電站的發電量進行了精確的預測。根據研究結果，長短期記憶模型(Long Short-Term Memory, LSTM)在預測光電站發電量方面表現最佳，決定係數(R^2)高達0.7964。圖12展示了該模型對2021年整體臺北市各區域容量因子的預測結果，並標示了臺北市的主要道路作為地理參考。透過這個比較分析，我們能夠更好地理解



資料來源：Google Earth (2024)

圖11 淡水3.5萬噸配水池光電站與試辦站點(士林官邸往西)地理位置示意圖



資料來源：本研究繪製

圖12 臺北市各區域年度平均容量因子

試辦站點在未來可能達成的發電效能及其潛在的經濟效益。特別值得注意的是，在預測結果中，臺北市各區域的容量因子呈現出相似的趨勢，但大同區與中山區的容量因子明顯較高，這意味著這些區域具備更優越的發電條件。根據容量因子計算公式，每相差0.01的容量因子，每年每瓩的裝置容量將相差87.6度電($=0.01 \times 24 \times 365$)。儘管這一差異看似微小，但在長期內，將對經濟效益和能源利用效率產生顯著影響。

由於模型限制，本研究主要選用2021年的預測數據作為代表年度，同時計劃透過比較歷史發電數據來評估不同年度之間的發電表現。由於淡水光電站於2021年6月才開始運營，無法與今年度(2月至7月)的營運數據進行直接比較。因此，我們選擇了與淡水光電站地理和氣

候條件相近的「北部儲運中心光電站」(政府資料開放平臺，2024)作為比較基準。透過這種年度之間的比較，可以檢驗2021年的預測數據是否能夠代表本年度的發電效果，並識別本年度的發電效率是否存在異常變化。

3.3 季節性發電量分析

太陽能發電具有明顯的季節性特徵，主要受日照時間與天氣變化影響。在春夏季，由於日照時間較長且陽光强度高，通常發電量較高；相反地，在秋冬季，尤其是臺北地區，因長期降雨導致日照時間減少，太陽能發電量顯著下降。因此，在設計與評估太陽能發電系統時，必須考慮這些季節變化，以確保能源供應的穩定性與可靠性。

3.3.1 各月發電潛能計算

由於試辦場域尚未營運滿一年，無法完整觀察各季節的發電表現，本研究利用了2021年的預測數據來模擬試辦場域的發電情形，並根據試辦場域與預測數據的比例計算修正參數，以建立更實際的模擬情境。公式(2)展示了本研究模擬各月份平均每日發電量的計算方式。此外，我們透過歷史數據計算各時段發電量占每日總發電量的比例，進而估算發電設備在一天中各時段的發電潛能，計算方式如公式(3)所示。

$$G_{m,daily} = G_{m,predicted} \times \mu \quad (2)$$

$$G_{m,h} = G_{m,daily} \times \gamma_h \quad (3)$$

其中 $G_{m,daily}$ 為試辦場域於m月份平均每日的發電量； $G_{m,predicted}$ 為m月份的預測平均每日發電量； μ 為發電量修正參數，即試辦期間發電量與預測數據的比例； $G_{m,h}$ 為m月份h時的發電量； γ_h 為h時發電量占全日發電量的比例。

另外，我們計算了日間淨發電量與夜間淨用電量，這兩個指標將簡易地判斷發電量是否能滿足候車亭全天候的用電需求。若儲能設施的容量小於日間的淨發電量，則白天產生的過剩電力將無法被有效儲存供夜間使用，只能棄置處理；如果儲能設施容量大於日間淨發電量，則可以將所有多餘的電力有效儲存，供夜間使用。為了使候車亭達到自給自足，需要滿足以下兩個條件：一、日間的淨發電量需高於夜間的淨用電量；二、儲能裝置的容量必須大於夜間的淨用電量。本研究的模擬假設所有發電設備皆接在同一個線路上，意味著所有發電設施都會優先將電力傳輸給候車亭，多餘的電將會儲存至儲能設備當中。我們根據於基本介紹所提及的儲能設施夜間放電時間將每日

切分成日間(07:00至17:00)與夜間(17:00至隔日07:00)，日間淨發電量與夜間淨用電量計算方式如式(4)-(5)：

$$G_{m,morning} = \sum_{h=7}^{16} G_{m,h} - C_{m,h} \quad (4)$$

$$C_{m,night} = \sum_{h=17}^{6 \text{ (Next day)}} G_{m,h} - C_{m,h} \quad (5)$$

其中 $G_{m,morning}$ 與 $C_{m,night}$ 分別為m月份日間淨發電量與夜間淨用電量； $G_{m,h}$ 與 $C_{m,h}$ 分別為m月份h時的發電量與用電量，由於各月份用電量曲線相似，本研究假設所有月份的用電量為試辦期間各時段用電量的平均值。

3.4 案例情境分析

為了更好地了解安裝太陽能板所帶來的經濟效益，本研究進行了情境分析。我們計算了年度營運費用，並以淨現值法(Net Present Value, NPV)評估不同情境的差異。除了基本的用電成本外，鑒於全球許多國家近期設立的碳排放費用規範(World Bank, 2023)，本研究亦納入了營運碳費成本，從環境角度分析營運過程中的潛在外部成本。

3.4.1 情境定義

本報告共設立了三個情境進行比較分析，分別為「原始」、「光電」以及「光電+儲能」。透過這些情境設定，可以更全面地評估安裝太陽能板及儲能設備的成本效益，並同時考量環境影響與營運可行性。各情境的定義如下：

1. 原始情境：作為本研究的對照組，假設候車亭未安裝任何發電或儲能設備，代表一般基本的候車亭營運費用。
2. 光電情境：在此情境中，候車亭安裝了太陽能光電板，但未設置儲能裝置。此模式下與電網的互動僅限於單向，這意味著夜間候車

亭仍需使用市電，而日間若發電量超過用電量，則多餘的電力將被棄置。

3. 光電＋儲能情境：此情境模擬了試辦站點的設置，除了安裝太陽能發電設備外，還包括儲能裝置，使多餘的發電量能夠被儲存，並於夜間供電給候車亭。與電網的互動同樣僅為單向，當發電量超過用電時，仍可能發生棄電情況。

為了更全面地比較各情境的淨現值差異，本研究考量了初期建置成本。如果一個情境具備經濟效益，則其建置成本需被發電設施所帶來的經濟效益打平。本研究將初期建置成本的負值作為初始淨現值，並以每年發電設施帶來的收益相對於原始情境的差異作為正向收入，直至淨現值達到0點為止，此時打平初期建置成本，後續產生的收益即為額外收益。

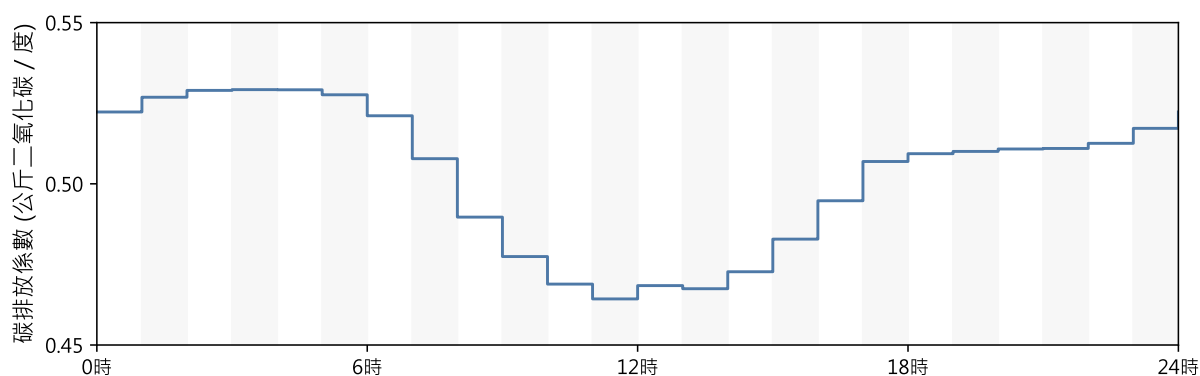
我們將初期建置成本分為兩部分：發電設備與儲能設備。根據經濟部能源局(2023)在113年度太陽光電分組第3次會議紀錄，太陽能板平均初期設置成本為每瓩52,700元。以試辦場域的6.3瓩裝置容量計算，發電設備的初期設置成本約為332,010元。儲能設備的部分，參考專家團隊BloombergNEF (2023)的分析，該來源指出2023年鋰電池的成本為每瓩時139美元，經過匯率換算(31.975元新臺幣兌換1美元(臺灣銀行，

2024))，每瓩時成本約為4,445元新臺幣，以試辦場域的7.2瓩時儲能裝置計算，儲能設備的初期設置成本約為32,000元。最後，本研究加入了3%的折現率(Lai and McCulloch, 2017)，以反映資金的時間價值，確保計算出的淨現值能夠真實反映未來收益的現值。

3.4.2 營運碳排放計算

為了計算營運期間的碳排放量，我們參考了文獻(Tseng and Hsieh, 2023)的計算方法，該研究評估了臺灣電網於一天中不同時段的碳排放係數(每度電公斤二氧化碳當量)，這一係數反映了在對應時段內，電網發購一度電所產生的碳排放量，由於電網於不同時間點使用的發電機組和能源來源各異，碳排放係數將隨之變化。圖13展示了臺灣電網於各時的碳排放係數，從圖中可以明顯看出，由於臺灣電網於白天使用較多再生能源，導致白天的電力較為乾淨，碳排放係數較低，而夜晚期間所發購的電力碳排放較多，碳排放係數較高。

我們利用公式(6)計算了各小時的用電碳排放量，這不僅能更精確地評估候車亭使用市電時的碳足跡，還可以根據碳排放量計算相應的碳費用，為經濟效益評估和環境影響分析提供更全面的依據。



資料來源：本研究繪製

圖13 臺灣電網各時碳排放係數

$$E_{m,h}=(C_{m,h}-G_{m,h})\times CEI_h \tag{6}$$

其中 E_h 為 m 月份 h 時的用電碳排放量； CEI_h 為 h 時的碳排放係數。

3.4.3 營運成本計算

營運期間造成的成本一共包含了兩個部分：電力消耗成本以及營運碳排放量的碳費支出。電力成本計算參考了台灣電力公司(2024)所公布的住商型簡易二段式時間電價(費率如表1所示)。至於碳費，依據113年第5次碳費費率審議會(環境部氣候變遷署，2024)的建議，初步設定的碳費費率介於每公噸二氧化碳300元至500元之間。本研究選擇將每公噸二氧化碳300新臺幣作為計算基準，以評估相關碳排放成本。整體營運成本花費的計算方式如式(7)-(9)：

$$OC = \sum_{y=1}^Y (ECC_{yearly} + CF_{yearly}) \times PVF_y \tag{7}$$

$$ECC_{yearly} = \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H (C_{m,h}-G_{m,h}) \times EP_h \tag{8}$$

$$CF_{yearly} = \sum_{m=1}^M \sum_{d=1}^D \sum_{h=1}^H E_h \times CP \tag{9}$$

其中 OC 為營運成本； Y 為計算模擬的年數； ECC_{yearly} 與 CF_{yearly} 分別代表每年度的電力消耗成本以及碳費； $PVF_y(=1/(1+r)^y)$ 為年底的現值因子， r 為折現率，本研究假設為3%； M 、 D 與 H 分別代表一年之中的月份、一月之中的天數以及一天之中的小時數； EP_h 為 h 時的電力價格； CP 為碳費率，固定為每公噸二氧化碳300元新臺幣。

3.5 以躉購費率評估經濟效益

本研究評估了以躉購費率促進再生能源使用的策略，尤其是對併網太陽能發電設施的經濟效益。藉由將超出自用的發電量賣回電網，此類設施可實現經濟效益的最大化。根據經濟部能源署(2024)的政策，早期安裝太陽能板的民眾或企業將享有較高的初始躉購費率，確保發電者在發電設施併網後能夠持續二十年以固定費率售電。隨著時間推移，此費率將逐步降低至與一般電價相近。在113年的躉購費率框架

表1 住商型簡易二段式時間電價

尖峰/離峰時間				夏季電費 (6月1日~9月30日)	非夏季電費 (夏月以外時間)
流動電費	平日 (週一~週五)	尖峰時間	09:00~24:00 (夏月)	每度5.01元	—
			06:00~11:00 14:00~24:00 (非夏月)	—	每度4.78元
		離峰時間	00:00~09:00 (夏月)	每度1.96元	—
			00:00~06:00 11:00~14:00 (非夏月)	—	每度1.89元
	假日 (週六~週日)	離峰時間	00:00~24:00	每度1.96元	每度1.89元

資料來源：台灣電力公司(2024)

表2 113年屋頂型太陽光電電能躉購費率

裝置容量級距	第一期上限費率(元 / 度)	第二期上限費率(元 / 度)
1 瓩以上不及 10 瓩	5.7848	5.7055
10 瓩以上不及 20 瓩	5.6535	5.5760
20 瓩以上不及 50 瓩	4.4081	4.3694
50 瓩以上不及 100 瓩	4.2320	4.1848
100 瓩以上不及 500 瓩	3.9565	3.9165
500 瓩以上	3.8856	3.8510

資料來源：經濟部能源署(2024)

下(詳見表2)，本研究使用預測的容量因子數據模擬候車亭在理想發電條件下的經濟效益，假設所有超出自用的發電量均能賣回電網。重要的是，由於躉購計畫的目的是保障售回電網的再生能源發電的經濟利益，本研究未考慮安裝儲能等輔助裝置，這是基於其可能降低獲利能力的考量。

根據經濟部能源署公告(2024)：「中華民國一百零五年度以前屬免競標適用對象者及一百零六年度以後之太陽光電發電設備，其設備未曾取得經濟部能源署提供設備補助，且於一百十三年一月一日起至一百十三年六月三十日止完工者，其電能躉購費率適用附表之第一期上限費率。」考量候車亭表面積有限，本研究以「1瓩以上不及10瓩」級距的第一期費率進行計算。

對於僅安裝太陽能光電板的候車亭，其經濟效益將依賴於其能夠將多少比例的發電量以躉購費率售回電網。此分析透過躉購費率計算太陽能板所能帶來的收入以及相關的營運成本，使我們能夠明確瞭解在現行政策框架下，候車亭太陽能發電項目的經濟可行性，並為相關決策者提供有力的數據支持。

3.5.1 敏感度分析

本研究中的敏感度分析詳細檢視了基礎假

設的變異性和內部不確定性，並強調了不同參數對結果可能產生的影響，提供了對未來發展潛在影響的洞見。我們針對三個面向的參數進行了分析，分別為之於預測數據的發電效率、電價漲幅、碳費和裝置容量，詳細描述如下：

1. 容量因子(相對於預測數據)：容量因子顯著受天氣狀態和硬體品質影響。近年氣候異常，導致不穩定的天氣進而影響發電效率，對安裝太陽能板的經濟效益產生重大影響。本研究以發電效率相對於預測數據的百分比進行分析，觀察從最低80%至最高130%的預測數據容量因子所帶來的影響。
2. 電價漲幅：近年來國際能源價格不穩定(Energy Information Administration (EIA), 2023)，加上能源轉型，導致電力價格不斷上漲，並可能在未來持續變動。本研究將最高電價漲幅設為60%，最低設為-40%，以評估電力價格變動的影響。這裡的電價漲幅僅影響到電力使用價格，即簡易二段式時間電價，而不會影響固定的躉購價格。
3. 碳費：根據World Bank (2023)數據顯示，目前全球碳費收取標準差異較大，多數國家尚未開始實施，但國際間對碳費收取已有共識，多國已制定相關政策。碳費的高低也反映了國家對環境影響的重視程度。於所有收取碳費的國家中，烏拉圭目前的碳費最高，

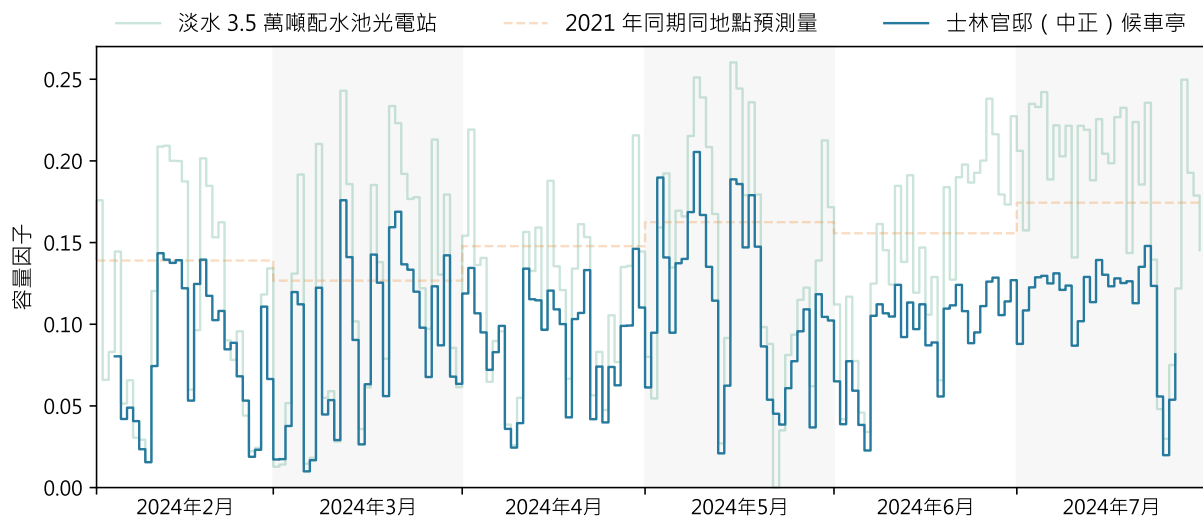
每公噸二氧化碳為167.17美元(約5,345元新臺幣)。在敏感度分析中，我們展示了不同碳費下對經濟效益的影響，其中最高值設為每公噸二氧化碳5,345元新臺幣，最低值為0元。

4. 裝置容量：考量到實際候車亭可能無法利用所有的頂部雨遮面積，我們模擬了當架設較少太陽能發電裝置時的效益表現。以試辦場域的6.3瓩裝置容量作為最大值，1瓩裝置容量作為最低值。

4. 研究成果與討論

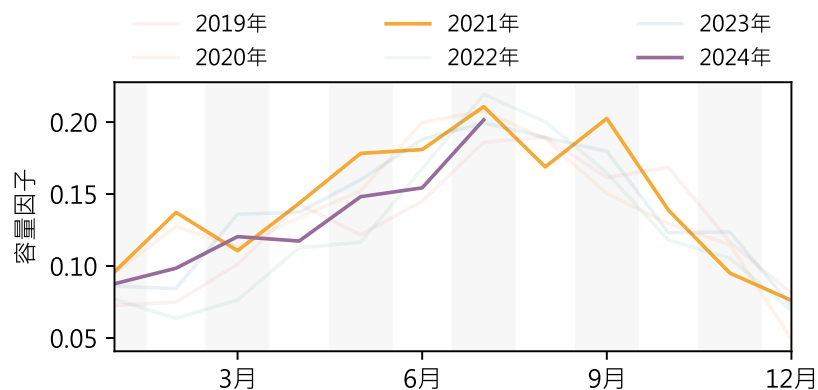
4.1 發電潛能比較揭露

圖14展示了試辦場域、淡水光電站與預測數據的容量因子比較。結果指出，淡水光電站的容量因子較2021年的預測數據低6.9%，表明2024年的發電條件較之前預測的不理想。從圖15可觀察到這一趨勢。此外，試辦場域的容量因子顯著低於其他兩組數據，比預測數據低出35.4%，這可能與台電使用的高效矽基太陽能板相比，試辦場域所用的可撓式裝置在轉換效率上較低有關(李昌駿，2017)。環境因素，如遮蔽或塵土積累以及可能的設備配置不穩定也是影響因素。這些發現顯示，儘管試辦場域的



資料來源：本研究繪製

圖14 試辦場域、淡水光電站與預測數據容量因子比較



資料來源：本研究繪製

圖15 2019年至2024年北部儲運中心光電站各月份平均容量因子比較

發電設施有顯著的改進空間，透過配置更高效的設備能夠顯著提升發電效能，但這將對成本產生影響。

4.2 各月發用電量分析

圖16展示了試辦場域模擬一年各月的平均每日發電量和用電量，假設太陽能裝置容量為6.3瓩，且發電效率為預測數據的64.6%。圖中所示的日間用電量(淺綠色)與日間淨發電量(深綠色)的總和，代表了全天候可用的發電量。當日間淨發電量(深綠色)高於夜間用電量(深藍色)時，表示太陽能板所產生的電力足以滿足候車亭整天的用電需求。從圖中可以觀察到，二月至十月期間，當所有多餘的發電量能被有效儲存並用於夜間時，候車亭可以實現自給自足，這意味著在這段期間內，候車亭無需依賴電網供電。然而，十一月至次年一月的情況則有所不同，這幾個月發電量不足以完全滿足夜間的用電需求，因此需要適度地從市電取電來補充電力不足。這種季節性變化凸顯了在太陽能發電系統設計中考慮儲能設備的重要性，不僅需要安裝足夠的發電設施，同時需要仔細評估所需要的儲能設備容量，太少裝置容量將導致

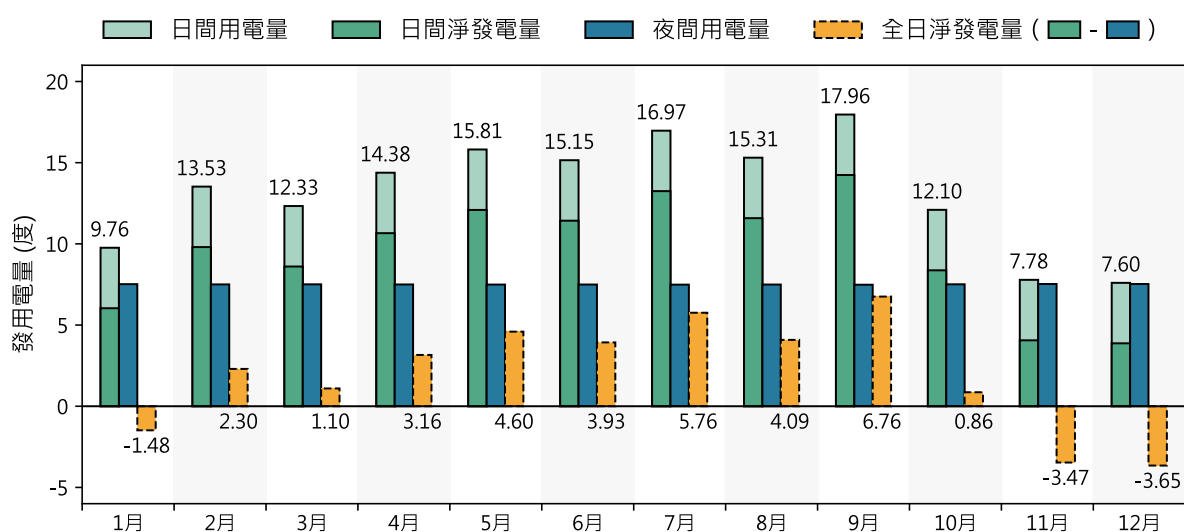
電力無法有效儲存工業間使用，太多裝置容量將造成高昂的初期建置成本，降低經濟效益。

4.3 情境分析結果

圖17(a)至(c)深入分析了各情境下的年度營運費用、與原始情境相比的營運費用現值差異，以及各情境的淨現值曲線。從圖17(a)中可以看出，單獨安裝太陽能光電板和額外裝設儲能系統分別減少了32.5%和69.1%的營運費用，這一節省主要來自於電費的降低，因為營運過程中對市電的依賴減少。然而，外部碳費的收取對整體經濟效益的影響並不顯著，這表明目前碳費的收取標準可能偏低，未能充分反映其環境成本。

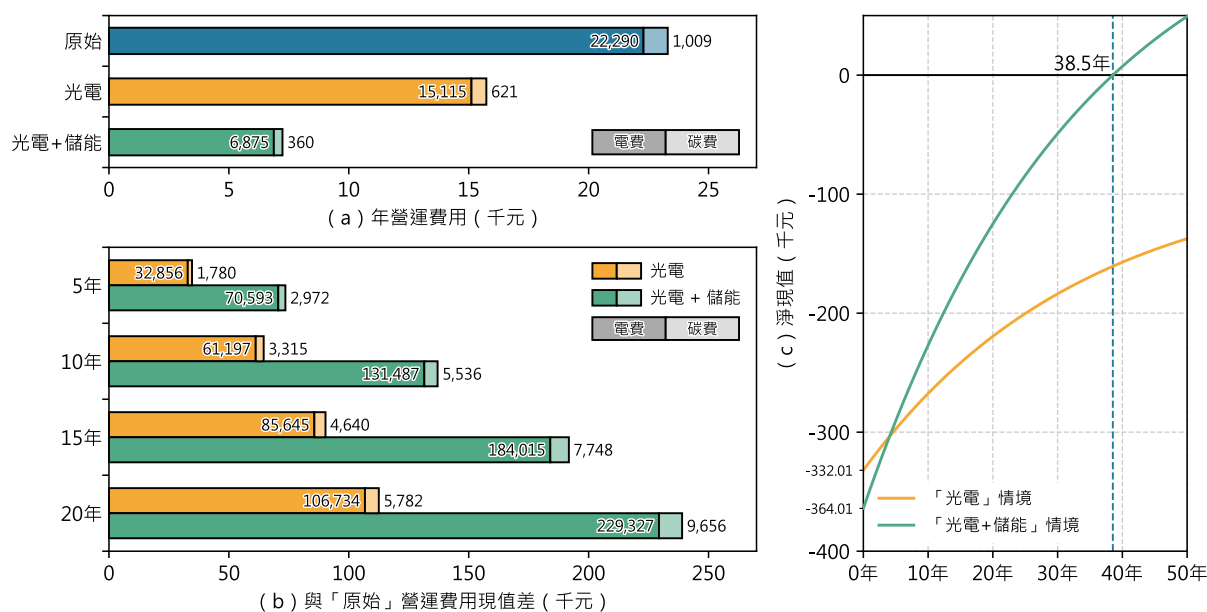
圖17(b)顯示了各年份與原始情境相比的營運費用現值差異，這些差異揭示了在特定年份內達到收支平衡所需的條件。具體而言，若希望在20年內實現收支平衡，則光電情境和光電+儲能情境的初期設置成本分別需要低於112.5千元和239.0千元。

圖17(c)則評估了光電及光電+儲能情境下達到收支平衡所需的年數。根據第3.4.1節所述的初期建置成本計算方式，這兩種情境的初期



資料來源：本研究繪製

圖16 各月份平均每日淨發用電量



資料來源：本研究繪製

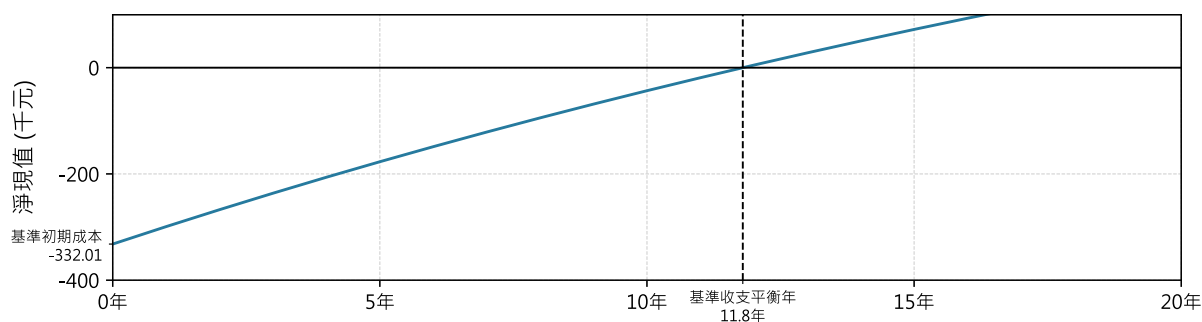
圖17 (a)各情境年營運費用、(b)各情境與「原始」情境於各年數營運費用現值差異、(c)各情境淨現值曲線

成本分別估計為332.0千元和364.0千元。淨現值曲線顯示，在光電+儲能情境下，需要約38.5年才能達到經濟效益，而光電情境則在可見的未來內無法實現收支平衡。這表明僅依靠自用的太陽能板和儲能設施在經濟上可能難以取得顯著效益。這一結果強調了在現行模式下，僅依靠自給自足的太陽能發電和儲能設施難以在經濟上取得成功。因此，下一章節將探討透過躉購費率將多餘電力售回電網的模式，這或許是一個更具潛力的經濟效益來源，並可能在實現收支平衡和提高投資報酬率方面提供更大的

可能性。

4.4 躉購費率下的可行性

根據圖18的淨現值曲線分析，採用113年第一期躉購費率後，於理想狀態下候車亭的太陽能板裝置僅需11.8年即可達到收支平衡。這一結果清楚地表明，躉購費率的應用能顯著提升太陽能發電的經濟效益，並大幅縮短回收成本的時間。此外，這種模式不僅能夠為電網提供更乾淨的能源，還符合政府推動再生能源和減少碳排放的雙重目標，對於推動可再生能源普



資料來源：本研究繪製

圖18 採用躉購費率之淨現值曲線

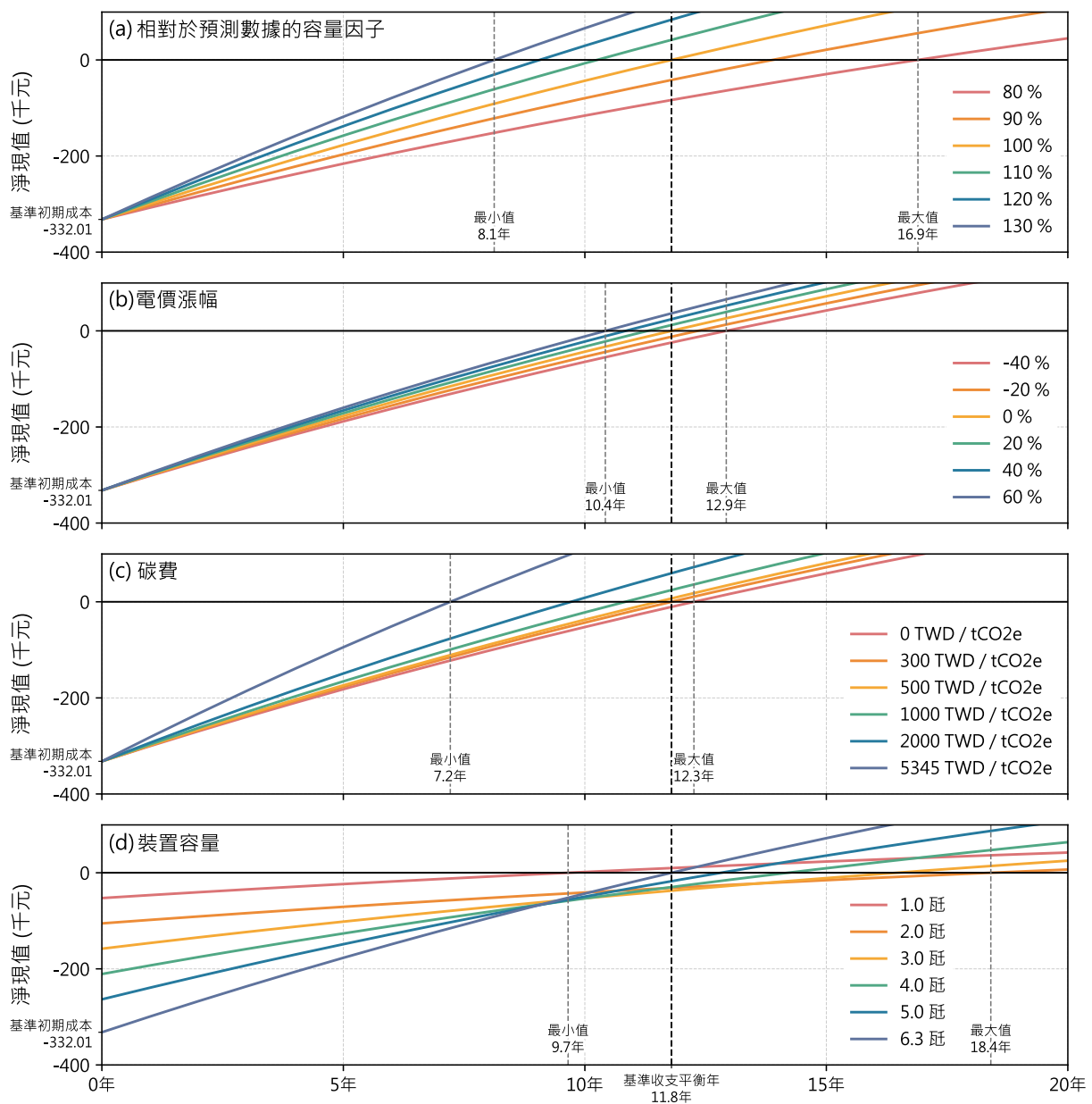
及具有重要意義。然而，僅以11.8年的收支平衡時間來看，並未充分揭示躉購費率在不同情境下的潛在變化。因此，我們需要進一步探討各種影響因素如何改變經濟效益的表現，以及在不同情境下的敏感度分析結果。

4.4.1 敏感度分析

圖19(a)至(d)分別展示了在不同發電效率、電價漲幅、碳費及裝置容量下的敏感度分析，

並佐以各參數對收支平衡年數的影響範圍。從圖中可以得出以下結論：

首先，容量因子對整體經濟效益的影響頗為顯著。較低的容量因子將延長回收成本的時間，最長可能需要16.9年才能回收成本。相反地，若容量因子提升，回收成本的時間可大幅縮短，最短僅需8.1年即可實現經濟效益。這說明了選擇高效發電材料和優良發電環境對於太陽能發電項目的重要性。



資料來源：本研究繪製

圖19 在不同(a)發電效率、(b)電價漲幅、(c)碳費及(d)裝置容量下的淨現值表現

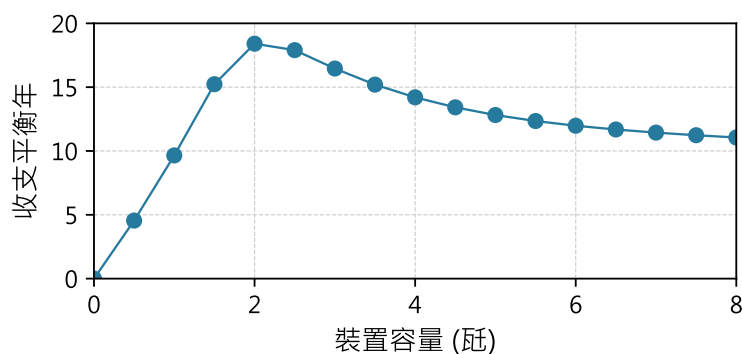
再者，電價漲幅對經濟效益的影響相對較小，但仍然具有一定的作用。由於電價上漲將增加原始情境下的用電成本，因此更高的電價漲幅能凸顯太陽能發電的優勢，並減少收支平衡所需的時間。當電價漲幅達到60%時，收支平衡的時間將比無漲幅情境快1.4年。

關於碳費的影響，儘管當前碳費在整體營運成本中僅占極小比例，但若未來碳費顯著提高，對經濟效益的影響將變得更加明顯。以國際上最高碳費每公噸二氧化碳5,345元(烏拉圭)為例，回收成本的時間可縮短至7.2年。這種情境凸顯了太陽能板在環境保護和永續發展中的重要作用，並與全球減碳目標形成共鳴。

最後，我們分析了不同發電裝置容量對經濟效益的影響。有趣的是，裝設1瓩容量的情境下，回收成本的時間最短，而裝設2瓩容量的情境下，回收時間卻達到最高。為了進一步探討這一現象，我們製作了圖20來分析不同裝置容量下的收支平衡年數。由於裝置容量直接影響初期設置成本，較小的容量能快速回收成本，然而，這樣的配置在環境效益上的貢獻相對有限，與裝設太陽能板的初衷相左。當觀察到較大容量的發電裝置時，回收年數逐漸降低並趨於穩定，這主要是因為考慮了折現率後，隨著時間推移，新增容量的經濟效益逐漸減少。

5. 結論與建議

本研究透過詳細的容量因子比較、情境分析、躉購費率的經濟效益評估，以及敏感度分析，深入探討了在不同設置和政策情境下候車亭安裝太陽能光電板及儲能系統的經濟可行性。本研究填補了現有文獻中對躉購計畫考量的缺口，提供了政府未來在地化再生能源補貼與獎勵政策的重要數據支持。比較顯示，試辦場域的容量因子明顯低於淡水光電站和預測數據，主要原因可能為台電使用的矽基太陽能板在轉換效率上優於試辦場域的可撓式裝置，以及其他環境因素的限制，例如今年度(2024年)的發電條件欠佳，這個現象表明試辦場域的太陽能發電設施仍有很大的改進空間，形成更佳的影響。在各月發用電力分析顯示，二月至十月期間，候車亭可以在發電量充足的情況下實現自給自足，而在十一月至次年一月則需要適度依賴市電補充電力。這種季節性變化強調了在設計太陽能發電系統時，儲能設備的配置至關重要。此外，單獨安裝太陽能板和額外裝設儲能裝置分別減少了32.5%和69.1%的營運費用，但在無躉購費率支持的情況下，這兩種情境的收支平衡時間較長，光電+儲能情境需要38.5年，而光電情境則是無法在可見的未來內實現收支平衡。然而，當引入躉購費率後，情



資料來源：本研究繪製

圖20 裝置容量收支平衡年數細部分析圖

況顯著改善，僅需11.8年即可達到收支平衡，這表明躉購費率的應用大大提升了太陽能發電的經濟效益。敏感度分析進一步顯示，發電效率、電價漲幅、碳費和裝置容量對經濟效益有著顯著影響，特別是發電效率和碳費的提高，能顯著縮短收支平衡時間，從而提升整體經濟效益，另外我們也發現當裝置容量改變時的有趣影響，雖然整體走勢顯示了更多發電設備將能夠加速收支平衡的年數，但是由於安裝少量發電設備形成低初期設置成本，導致這種情境下的收支平衡年數異常的低，同時它所能帶來的環境效益也不顯眼。

基於本研究結果，我們建議在太陽能發電項目中改善設備配置以提升轉換效率，並進行定期維護以減少環境因素的影響。選擇合適的安裝地點對提升經濟效益至關重要；應根據容量因子評估該地區的適宜性，同時考量候車亭的結構和雨遮面積，確保站點具備良好的發電條件且安全無虞。對於離網站點，建議進行全面的評估並合理配置儲能設備，以有效平衡季節性用電需求，增強系統的自給自足能力，並避免過度的電力浪費。此外，需深入分析電力供應的穩定性和地區的適宜性，考慮地理位置、人流量及使用頻率，以避免在高需求地點使用穩定性較低的設施。對於連網站點，建議積極參與躉購方案，以太陽能發電直接賣電，無需配置儲能設備，從而提升投資回報率。鑑於碳費政策的潛在變化，建議靈活調整經濟評估模型以抓住市場機會。若發電設備購置成本進一步下降，將顯著提升經濟效益；相比之下，儲能設備由於其在總成本中所占比例較小，成本變化對總體經濟效益的影響有限。最終，政府應考慮提高躉購費率或提供進一步的補貼，並鼓勵有效的投資策略，確保經濟效益最大化並推動可再生能源的廣泛應用。

誌 謝

本文作者感謝臺北市公共運輸處的支持，其不僅提供了太陽能候車亭的相關資料，也提供了本研究所需的協助，使本研究得以順利完成。

參考文獻

- 工業技術研究院，2024。「113年度各縣市補助計畫清單」。取於：2024年8月23日，<https://www.mrpv.org.tw/>。
- 經濟部能源署，2023。「113年審定會分組會議(太陽光電、風力發電、生質能及其他再生能源)」。取於：2024年5月28日，https://www.moeaea.gov.tw/ECW/renewable/content/ContentLink.aspx?menu_id=778。
- 經濟部能源署，2024。「中華民國一百三十三年度再生能源電能躉購費率及其計算公式」。取於：2024年5月27日，https://www.moeaea.gov.tw/ECW/populace/Law/Content.aspx?menu_id=26351。
- 李昌駿，2017。「可撓式太陽能電池的應用 | 專家專欄 | 專欄新知 | 能源教育資源總中心」。取於：2024年5月23日，<https://learnenergy.tw/index.php?inter=knowledge&caid=4&id=414>。
- 台灣電力公司，2024。「113年上半年電價表及說明」。取於：2024年6月22日，<http://www.taipower.com.tw/2289/2558/49405/49408/50907/50919/50978/>。
- 臺東縣政府，2022。「智慧城鄉更進一步！臺東縣啟用智慧候車亭及太陽能電子紙公車站牌」。取於：2024年8月25日，https://www.taitung.gov.tw/News_Content.aspx?n=13370&s=120232。

- 臺灣銀行，2024。「歷史本行營業時間牌告匯率」。取於：2024年8月19日，<https://rate.bot.com.tw/xrt/quote/day/USD>.
- 臺中市政府，2018。「中市推廣綠能交通 太陽能候車亭210座全國最多」。取於：2024年8月25日，<https://www.taichung.gov.tw/8868/8872/9962/782482>.
- 新北市政府交通局，2022。「我聰明 你方便 新北公車站牌智慧又環保」。取於：2024年5月29日，<https://www.traffic.ntpc.gov.tw/home.jsp?id=54fa46e9e522dde4&act=be4f48068b2b0031&dataserno=8a70fe77b9b76b6b3cc0051c239fa364>.
- 政府資料開放平臺，2024。「台灣電力公司_風力及太陽光電發電量」。取於：2024年5月23日，<https://data.gov.tw/dataset/17140>.
- 環境部氣候變遷署，2024。「113年第5次碳費費率審議會」。取於：2024年9月9日，<https://www.cca.gov.tw/affairs/carbon-fee-fund/carbon-fee-rate-committee/review-status/12299.html>.
- Bertetto, A. M., 2017. The project “To wait in a new way”. <http://torinolivinglab.it/portfolio/to-wait-in-a-new-way/>.
- BloombergNEF, 2023. Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh. Retrieved August 19, 2024, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>.
- Colangelo, G., G. Spirto, M. Milanese and A. de Risi, 2021. Progresses in Analytical Design of Distribution Grids and Energy Storage. *Energies* 14 (14): 4270. <https://doi.org/10.3390/en14144270>.
- EIA, 2023. International Energy Outlook 2023. https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2023_Narrative.pdf.
- Feng, Y.-F., C.-C. Chou, L.-P. Wang and I.-Y. L. Hsieh, 2023. Spatial Solar Power Prediction at Daily Scale: Incorporating Ground Observations and Reanalysis Dataset with Machine Learning and Geostatistical Approaches.
- Good Display, 2024. 1.54 inch e-paper display ultra low temperature E ink. Retrieved October 1, 2024, <https://www.good-display.com/product/228.html>.
- Google Earth, 2024. 淡水3.5萬噸配水池光電站與試辦站點(士林官邸往西)地理位置示意圖. Retrieved August 25, 2024, https://earth.google.com/earth/d/1XDCApw6evzhpgYLzt_vA3G9OvSdzHvAn?usp=sharing.
- Google Maps, 2022a. 捷運幸福站. Retrieved August 25, 2024, <https://maps.app.goo.gl/QTmfsXKRaf7Wfodk7>.
- Google Maps, 2022b. 士林官邸(中正). Retrieved August 25, 2024, <https://maps.app.goo.gl/hHHDJ1MZncp7XT2Y6>.
- Google Maps, 2024. 山光社區. Retrieved August 25, 2024, <https://maps.app.goo.gl/QYzPSwstK1DsQWKKA>.
- IEA, 2023. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach – Analysis. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
- IRENA, 2020. Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050. <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.
- Kirk, M., 2017. Singapore May Have Designed

- the World's Best Bus Stop. Retrieved August 23, 2024, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-01/singapore-may-have-designed-the-world-s-best-bus-stop>.
- Lai, Chun Sing and Malcolm D. McCulloch. 2017. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Applied Energy* 190 (March):191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.153>.
- Lempriere, M., 2024. Wind and Solar Are 'Fastest-Growing Electricity Sources in History'. Retrieved August 23, <https://www.carbonbrief.org/wind-and-solar-are-fastest-growing-electricity-sources-in-history/>.
- Mutani, G., A. Vodano and M. Pastorelli, 2017. Photovoltaic solar systems for smart bus shelters in the urban environment of turin (Italy). *2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 20–25. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2017.8211671>.
- Newatlas, 2016. London transparent about its new solar bus shelters. Retrieved May 25, 2024, <https://newatlas.com/london-polysolar-transparent-solar-bus-shelter/42735/>.
- Pervasive Displays, 2023. Innovation of eink display conquering extreme weather : Wide Temperature Eink Display. Retrieved October 1, 2024, <https://www.pervasivedisplays.com/wide-temperature-eink-display/>.
- Santos, T., K. Lobato, J. Rocha and J. A. Tenedório, 2020. Modeling Photovoltaic Potential for Bus Shelters on a City-Scale: A Case Study in Lisbon. *Applied Sciences* 10 (14): 4801. <https://doi.org/10.3390/app10144801>.
- Trueform, 2013. UAE Solar Info Stop | Bus Stop Sign | Trueform. Retrieved May 25, 2024, <https://trueform.com/products/uae-solar-info-stop-system/>.
- Tseng, W.-C. and I.-Y. L. Hsieh, 2023. Impacts of electric fleet charging patterns under different solar power penetration levels: Hourly grid variations and operating emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 122 (September):103848. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103848>.
- World Bank, 2023. State and Trends of Carbon Pricing Dashboard. Retrieved May 25, 2024, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>.

Green Transformation of Bus Shelters: Implementation and Benefits of Solar Photovoltaic and Energy Storage Technologies

Yuan-Hsi Chien¹ I-Yun Lisa Hsieh^{2*}

ABSTRACT

In alignment with the Paris Agreement's goals, the global imperative to reduce carbon emissions has positioned solar technology as a crucial renewable resource. Traditional bus shelters, which typically depend on central power grids, face increased energy demands and limited enhancements in functionality. This study conducts a seasonal analysis of solar photovoltaic (PV) systems installed in Taipei's bus shelters and evaluates their cost-effectiveness through Net Present Value (NPV) analysis, assessing the feasibility of energy self-sufficiency. The findings reveal that with adequate energy storage, bus shelters can achieve self-sufficiency from February to October, but require grid support from November to January. Scenario analysis shows that installing solar panels can reduce operating costs by 32.5%, and by 69.1% when paired with storage solutions. However, in the absence of feed-in tariffs (FIT), the payback period extends significantly, and setups relying solely on generation facilities may not attain break-even within a foreseeable timeline. Introducing FIT reduces the payback period to 11.8 years, markedly improving economic outcomes. Key factors such as efficiency of power generation, carbon fees, and installation capacity profoundly influence these economic benefits, highlighting the importance of meticulous device and location selection to maximize generation efficiency. This study offers valuable data for stakeholders and policymakers, enhancing the integration of solar energy in public infrastructures and aiding the pursuit of global sustainability goals.

Keywords: Bus Shelter, Solar Photovoltaic, Feed-in Tariff, Cost-effectiveness Analysis, Green Mobility.

¹ Graduate Student, Computer-Aided Engineering in Department of Civil Engineering, National Taiwan University.

² Associate Professor, Computer-Aided Engineering in Department of Civil Engineering, Department of Chemical Engineering, National Taiwan University.

*Corresponding Author, Phone: +886-2-33664259, E-mail: iyhshieh@ntu.edu.tw

Received Date: August 28, 2024

Revised Date: October 06, 2024

Accepted Date: October 23, 2024