

2.2 太陽光電

摘要

臺灣要達到 2050 淨零排放目標的首要任務即是「供應無碳電力」，其中，因我國位於亞熱帶地區，年日照時數多，深具發展潛力，故太陽能成為我國無碳電力良好選項之一，本政策建議書有下列幾點建議：

1. 我國地狹人稠、土地利用項目彼此競爭，要提高太陽光電裝置容量，必須提高民眾裝設意願並取得整體社會對於改變土地利用型態之共識與支持。因此，建議政府應加強社會溝通，使民眾了解太陽光電之優點及必要性，以促成全民共識之外，更應提供各式誘導配套措施以加速布建（如：營農型光電設施之行政程序簡化或補貼措施）。
2. 為緩解太陽光電對土地需求之壓力，建議政府應投入高轉化效率太陽能模組技術之研發（如：鈣鈦礦型太陽能電池），使單位土地面積之太陽光電裝置容量及發電量能有效提高，以科技換取土地，如此可大大降低因改變土地利用型態而產生之社會衝突問題。
3. 為解決太陽光電間歇性造成之供電不穩定問題，電力系統應有完善之基礎設施及管理調度機制，建議政府應盡速建置電網級（GW 等級）儲能設施，並搭配智慧電網之調控，正常時間時，可針對太陽能供電之「鴨子曲線」特性彈性升降載及「削峰填谷」作電力調控之用；並於緊急情況時，提供輔助服務以穩定電網電壓。此外，應整合氣候預報系統與太陽能發電裝置系統，提供較精準的太陽能發電量預測資訊，使電廠能及時排程調度電力。
4. 根據估計，我國於 2050 年太陽能裝置容量可能達到的目標為：地面型 31.95~42.6 GW、屋頂型 12.21~15.72 GW，合計可達 44.16~58.32 GW，總發電量約為 464.21~613.16 億度，平均值為 538.69 億度。若要再增加太陽光電裝置容量，則需要在增加裝置面積方面施行更強力的作為，但如此一來，不僅將可能對社會帶來更強的摩擦，更為電網穩定性帶來極大的壓力。

2.2.1 前言

臺灣要達到 2050 淨零排放目標的首要任務即是「供應無碳電力」，其中，太陽能具有「能源資源永續且豐富」、「能源轉換為電力的過程相對環保」、「可應用的區域相對較普遍」的特性，使得太陽光電是目前全世界發展迅速的無碳電力選項之一。但是，太陽能亦具有「能量密度低需要大量土地」、「能量來源間歇性及不穩定性」、「現況技術水準發電效率較低且成本較高」的本質，使得太陽光電的發展需要克服「擴大規模」及「穩定電力」的挑戰。

根據國際能源總署(IEA)對 2050 淨零排放情境下之電力供應各能源別比例之推估¹，全球光電（不計 CSP）裝置容量預期達到 14,458 GW，約占全球電力總裝置容量 43.3%；發電量預期達到 234,690 億度，約占全球電力總發電量 33.0%，這表示光電在未來 30 年間將持續成長，並在無碳電力供給中扮演極大的角色，主要原因即是光電技術已相對成熟、已具商業化規模、成本已持續降低，故能夠在短期內大量布建。惟 IEA 最新針對太陽光電發展之追蹤報告指出雖然全球光電年裝置容量已創新高，但新增速度仍不及預期，這代表著若要達到 2050 年之目標，公私部門皆需要付出更多的努力²。

由此可見，「擴大光電裝置容量」是許多國家未來朝向淨零排放目標會採取的策略，目前累積裝置容量前十名國家分別為中國、美國、日本、德國、印度、義大利、澳洲、英國、韓國、法國等。除了良好光照條件之外，這些均是國土面積相對大的國家，舉例而言，目前全球最大的光電場—Bhadla Solar Park—位於印度，裝置容量達 2.25 GW，占地約 5.67 千公頃，相當於 218 座大安森林公園。這對國土面積相對小的國家而言，幾乎不可能達到，因此，許多新光電技術也開始蓬勃發展，例如：提高轉換效率的結構或材料研發，例如：新加坡國立大學研究團隊針對鈣鈦礦材料進行研發，成功將轉化效率提高到 23.6%³。

¹ 同前揭註錯誤！尚未定義書籤。。

² IEA (2021) Solar PV, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

³ Wei Chen, et al. 2022. Monolithic perovskite/organic tandem solar cells with 23.6% efficiency enabled by reduced voltage losses and optimized interconnecting layer. Nature Energy; DOI: 10.1038/s41560-021-00966-8

此外，另一項技術趨勢便是系統整合，將有限的面積多功能應用，例如：建材一體型太陽光電系統(Building Integrated Photovoltaics, BIPV)將太陽光電模組替代建材，成為建物的一部分，多半應用在屋頂、帷幕牆、窗戶等處；浮動型太陽光電模組運用具有大表面面積的湖泊、水庫等水域，以及港灣、內海等較平靜之海域。

臺灣位於亞熱帶地區，單位面積的總輻射量雖然不及許多熱帶地區或沙漠地區國家⁴，但中南部地區年日照時數多，仍具發展太陽能的潛力；此外，臺灣高科技產業及精密機械產業發展成熟並具國際競爭力，這也有利於太陽光電技術研發與產業發展。惟我國地狹人稠，若要使用大量土地發展太陽光電，將面臨不同土地利用項目競爭的問題。因此，太陽光電雖是我國有條件發展、並可降低溫室氣體排放量的無碳電力選項，但是，在有限的土地資源下，臺灣能發展多少太陽光電、裝置潛能或極限是多少、減碳效益是多少？這些問題取決於我國該如何善用土地資源、該如何發展高效光電板，達成「以科技換取土地」的目標。

2.2.2 我國發展太陽光電之現況問題分析

2017 年我國政府提出了 2025 年實現再生能源占比達 20%，天然氣 50%，燃煤 30% 的電力結構，在所有再生能源中，太陽光電的發展占比最高，規劃在 2025 年太陽光電裝置容量達到 20 GW 的目標。在此政策目標上，行政院修正相關法規（如：電業法、再生能源發展條例），並積極推動相關行動計畫（如：太陽能光電 2 年計畫、綠能屋頂全民參與計畫、109 年太陽光電 6.5 GW 達標計畫等），希望藉由健全法令、簡化行政程序、建立示範案例、綠能發展建設基金、推動營農型光電措施等策略，擴大太陽光電裝置容量。

透過這些政策引導，我國太陽光電裝置容量漸具規模，圖 2.2.1 呈現我國 2018 年起太陽光電的裝置容量（目標值與實際值），並預計在 2025 年達到 20 GW 的設置目標，其中，原始規劃屋頂型光電裝置容量 3 GW，而地面型光電裝置容量

⁴ ESMAP (2020) Global Photovoltaic Power Potential by Country. Washington, DC: World Bank

17 GW；但此政策目標因地面型光電推動上遭遇到困難，行政院也因此二度修正 2025 年太陽光電目標，目前規劃屋頂型光電裝置容量上調至 8 GW，而地面型光電裝置容量則下修至 12 GW。然而，截至 2021 年底，我國太陽光電實際裝置容量僅達 7.7 GW，未能達到 2021 年目標值，若要達到 2025 年目標，勢必需要了解、並解決目前推動上之問題。

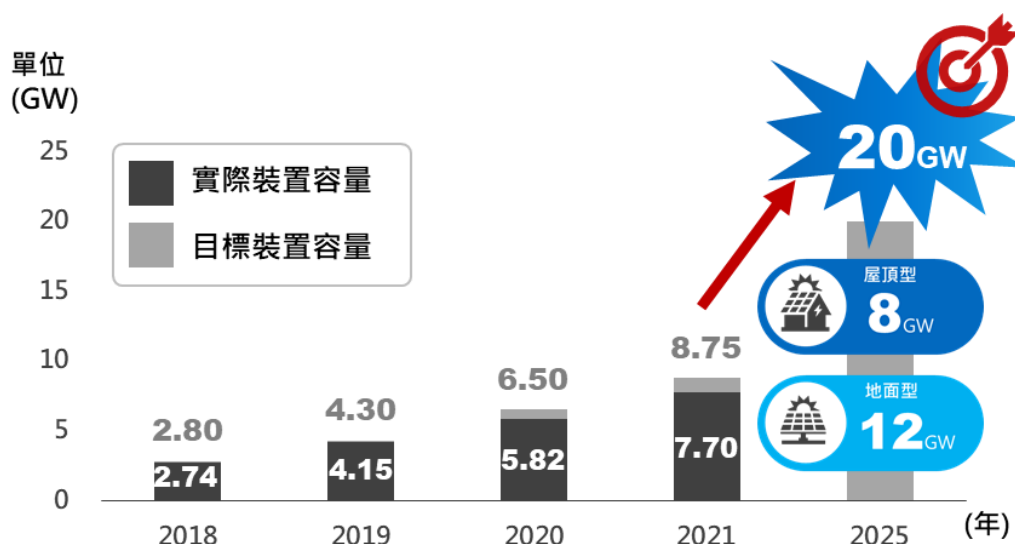


圖 2.2.1 我國太陽光電的裝置容量（目標值與實際值）

地面型太陽光電因單場裝置規模相對較屋頂型大，較具商業價值，原本為我國主要推動之光電項目，但近年地面型太陽光電因土地問題，遭受到社會許多反對聲浪，這些社會反對意見使得地面型太陽光電裝置推動上遇到阻礙。針對這些實務上推動問題，綜整分析如下：

- 1. 大規模土地取得不易：**太陽光電因能源密度低需要大量土地建置，但對地狹人稠的臺灣而言，土地利用型態固定（農地農用）、地權分散、未被利用之閒置土地有限，若要將土地做為光電用地，勢必需要與原有的土地利用項目競爭，因一旦建置，便是至少 20 年的使用時間，故必須變更土地利用類型，而目前的爭議多來自不同利害關係人對土地利用未取得共識，尤其是售電之效益可能遠大於原有土地利用之效益。例如：戶外型農地種電遭受許多農業界抗議（地主可能願意種電，但農業保護團體與農業主管機關主張保護農地）、人造

林地種電遭到環保團體抗議、養殖魚塭種電遭到漁業界抗議（水域型光電是否會影響漁獲）、土地變更與景觀變化的抗議聲音等⁵。

2. **相關法規與行政程序繁瑣**：申請與許可行政程序牽涉不同部會、不同層級（中央及地方）、不同區域（都市與非都市）之權責與規定辦法，一般民眾不易理解，影響布建。
3. **成本效益是否符合光電業者期待**：目前電力收購僅在開始發電售電後，前期建置投資成本高，再加上近幾年物價及原物料成本上漲，若是大型案場更需要價格競標，影響安裝意願。
4. **其他問題**：部分光電案場若位於較偏遠地區，更遭遇饋線不足的問題；另有環保團體對於太陽能製程之污染問題以及回收問題有疑慮。

2.2.3 我國發展太陽光電之潛能與限制評估

太陽光電會使用到大量土地資源，表 2.2.1 呈現目前屋頂型與地面型（含水域型）兩種太陽光電裝置設施可能包含的用地項目⁶，若後續光電用地擴大其他用地項目或是土地項目有所變更，其面積將有所調整，裝置容量亦可能調整。

表 2.2.1 光電來源用地項目

類型	包含項目
屋頂型	中央公有屋頂、工業區工廠屋頂、農業設施、其他屋頂（地方政府、商用、民宅）
地面型 （含水域型）	鹽業用地、地下水管制區第一級管制區、掩埋場及以受污染土地、水域空間（水庫、滯洪池、埤塘、文蛤養殖、魚塭）、其他土地（閒置工業用地、國防部閒置營區、財政部國有財產署國有土地、其他閒置土地）

1. 屋頂型光電

⁵ 部分問題討論摘錄自中央研究院經濟研究所張靜貞研究員與楊宗翰助研究員所執行本院永續科學研究計畫「台灣邁向 2050 低碳排目標下產業轉型與碳定價策略之研究」（2022~2024）。

⁶ 行政院(2017) 太陽光電 2 年推動計畫；經濟部 (2017) 產業穩定供電策略簡報。

透過政府的開放數據可取得表 2.2.1 中屋頂型各項項目之面積⁷，經估算可發現這些建物屋頂總面積為 109.46 千公頃，初步假設逃生設施、水塔、女兒牆、散熱裝置、通風設施、採光等必要設施約占屋頂面積之 50%，因此，屋頂型光電設施之可裝設面積約為 50%，農業設施為用地法規限制，也僅可裝設 50%，總計約有 54.73 千公頃。此外，考量鋼筋混凝土建築之平均使用年限為 50 年，且太陽光電之保固期限為 25 年，因此，若僅針對屋齡 20 年以內之建物做為分析對象並進行估算，則 20 年內屋齡建物屋頂可裝設面積則為 8.14 千公頃；而 15 年內屋齡建物屋頂可裝設面積則為 5.59 千公頃（表 2.2.2）。

表 2.2.2 屋頂型太陽光電可裝設屋頂面積與裝置容量估算

建物類型	可裝設面積 (千公頃)	可裝置容量 (GW)
公有屋頂	1.99	1.99
工業區屋頂	14.77	14.77
其他屋頂	35.26	35.26
農業設施	2.71	2.71
合計	54.73	54.73
20 年內屋齡建物屋頂	8.14	8.14
15 年內屋齡建物屋頂	5.59	5.59
2030 年至 2050 年 30%新建物屋頂	+2.34	+2.34
備註：裝置容量換算標準 1GW/千公頃		

此外，依據現今科技水準，商用單矽晶型光電裝置轉化率做為計算標準（約 20~22%），並以屋頂型裝置容量換算標準—1 GW/千公頃—來換算（附錄 2C），最終可估算出我國政策規劃用地屋頂型太陽光電潛在裝置量為 54.73 GW；20 年內屋齡屋頂面積之裝置容量則為 8.14 GW；15 年內屋齡屋頂面積之裝置容量則為 5.59 GW。這也代表目前政府設定的屋頂型裝置容量目標(8 GW)已極力運用目

⁷ 黃孔良等(2018) 再生能源需要大量土地面積，臺灣是否適合發展再生能源；內政部營建署 94-104 年統計年報資料；經濟部工業局 105 年工業區開發管理年報；內政部國土測繪中心 102 年國土利用調查面積統計資訊。

前 20 年內屋齡建物之屋頂，未來若要增加屋頂型太陽光電裝置容量，可能必須由新建物屋頂裝置面積著手，甚至需要施行獎勵措施，或是調整建築法規等配套措施。

我國 2021 年核發建築物使用執照總樓地板面積約為 2.8 千公頃⁸，而地面層面積約為 0.77 千公頃，假設地面層面積為每年新建物屋頂面積，因此可裝設太陽光電面積為 0.39 千公頃，若調整建築法規，並在 2030 年開始鼓勵新建物裝設太陽能板，假設有 30%新建物裝設太陽能板，後續 20 年間（2030 年至 2050 年）則約略有 2.34 千公頃新建物屋頂光電，裝置容量則可再增加 2.34 GW(表 2.2.2)。

2. 地面型光電

透過政府的開放數據可取得表 2.2.1 中地面型各項項目之面積⁹，依據不同土地利用之法規，太陽光電裝設面積占比皆不一，水庫港口湖泊為 5%、埤塘為 50%、農業用地 20~40%、其他為 70%、閒置用地則假設為 100%，考量這些裝設面積規定後，可以估算這些可用地面總面積為 106.5 千公頃（表 2.2.3）。此外，地面型太陽光電裝置受限於不同土地使用限制，裝置容量換算標準較屋頂型小，每千公頃約可裝置 0.667 GW，故若完全將這些土地利用類型變更為太陽光電用，至多可達到 71.04 GW。

進一步分析比較我國與德國、日本、英國太陽光電裝置相關指標(表 2.2.4)，可以發現在 2020 年我國與其他國家的裝置容量土地密度（意即單位面積之裝置容量 MW/km^2 ）的差異還不大，約略在 $0.15 \text{ MW}/\text{km}^2 \sim 0.2 \text{ MW}/\text{km}^2$ 之間，但在

⁸ 內政部統計月報(2022) 核發建築物使用執照按使用分區別分。

⁹ 黃孔良等(2018) 再生能源需要大量土地面積，臺灣是否適合發展再生能源。資料來源：鹽業用地資料、嚴重地層下陷地區內不利農業經營得設置綠能設施之農業用地範圍、行政院環境保護署廢棄物處理資料、行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網—國內污染場址資料、太陽光電單一服務窗口—土地及電網資訊（水域空間-水庫、滯洪池）經濟部「產業穩定供電策略」簡報之桃園埤塘及閒置工業用地（崙尾東、西、台西工業區）、漁業署 104 年漁業統計年報（文蛤養殖區）、行政院農業委員會 104 年農業統計年報（農業長期休耕地、長期耕作地）、行政院農業委員會漁業署 104 年農業統計年報（魚塭、休養魚塭）、交通部統計查詢網（交通用地：國道、鐵路、高鐵）、經濟部水利署縣市統計之標分析—水庫資料、經濟部水利署—水庫與洩洪池水域型太陽能發電系統第 16 次推動會議記錄之滯洪池規劃容量、內政部國土測繪中心 102 年國土利用調查面積統計資料（埤塘、池、溜）、行政院公共工程委員會列管閒置設施一覽。

2025 年的預估目標值中，我國裝置容量密度將大幅提升約五倍，達到 0.56 MW/km²，而同時期的德國則呈現微增至 0.2 MW/km²、日本增至 0.25 MW/km²，這代表著我國因國土面積小，太陽能裝置容量土地密度明顯高於他國甚多。

當太陽光電成為我國未來主要的能源選項時，大幅度的土地利用變更及高裝置密度將帶來極大的社會爭議與供電穩定之壓力。因此，本建議書保守估計若使用 30~40%的可用面積，裝置面積約可使用 31.95~42.6 千公頃，裝置容量將可達到 21.3~28.41 GW，儘管如此，政府仍需大規模、長期的積極溝通，解決社會各方面疑慮，提供各式誘因，方可能達成此目標。至於可能帶來供電穩定之壓力，則須要建構足夠的儲能及有效之電網系統以為配合(詳見本章 2.10 節、2.11 節)。

表 2.2.3 地面型太陽光電可用地面面積與裝置容量估算

土地利用類型	可用面積 (千公頃)	可裝置容量 (GW)
鹽業用地	0.8	0.53
地下水一級管制區(嚴重地層下陷)	1.51	1.01
掩埋場與受污染土地	0.39	0.26
水域空間(水庫、滯洪池、埤塘、文蛤養殖、魚塭)	20.78	13.86
陸上盜濫採土石坑洞計畫列管農地	0.008	0.01
閒置工業用地(台西、崙尾東西)	1.61	1.08
財政部國有財產署國有土地	7.46	4.98
國防部閒置營地	0.13	0.09
土壤不容易貯水或水量不足只能栽培陸稻、雜糧及果樹類等之耕地(農業長期耕作地)	52.7	35.15
長期荒蕪，未種植作物之土地(農業長期休閒地)	19.87	13.25
交通用地(國道、高鐵、台鐵等幹道旁用地)	1.12	0.75
閒置交通用地(機場、港口)	0.13	0.09
合計	106.5	71.04
使用 30%的可用面積	31.95	21.31
使用 40%的可用面積	42.60	28.41
備註：裝置容量換算標準 0.667 GW/千公頃		

表 2.2.4 各國太陽能發電相關指標比較

指標	臺灣		德國		日本		英國	
	2020	2025	2020	2025	2020	2025	2020	2023
太陽能裝置容量土地密度(MW/km ²)	0.16	0.56	0.15	0.2	0.18	0.25	0.056	0.07
總土地面積(km ²)	35,960		349,360		364,560		241,930	
太陽能裝置容量 2020 年(GW)	5.82		53.78		67.0		13.56	
太陽能裝置容量 2025 年(GW)	20		70		92		15.7 (2023 年)	

3. 太陽光電轉化效率

我國若欲增加太陽光電裝置容量，除了增加屋頂型及地面型裝置面積這個策略之外，另一可行的策略即為「提高太陽光電裝置轉化率」。目前太陽能電池材料以單晶矽為主流，結構採用 Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)技術。PERC 結構之太陽能電池片轉換效率可達 23%，製作成商業化模組效率約 20~22%。業界認為 PERC 結構電池已接近最大效率值，不過在持續的最佳化精進下，PERC 結構電池大約還有 0.5%的效率提升空間。

為了繼續提升矽基型太陽能電池之轉換效率，目前可見的矽基電池技術將主要集中在 n 型 Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)與 Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (HJT)結構上。TOPCon 是在太陽能電池結構裡沉積載子選擇性鈍化材料，而此材料組合是由一非常薄的穿隧氧化層，再搭配主要為接觸功能摻雜的多晶矽堆疊而成，目前電池片轉換效率可達約 24%。HJT 則是在 P 型氫化非晶矽和 n 型氫化非晶矽與 n 型矽襯底之間增加一層非摻雜氫化非晶矽薄膜，目前電池片轉換效率可達約 25%。在 n 型 TOPCon 和 HJT 之間，效率提升與每度電成本降低的程度將決定何者是下一個主流技術。

矽基太陽能電池雖可藉由優化製程條件與改變結構提升電池片轉換效率，但最終矽基太陽能電池會面臨到 Shockley-Queisser limit 的理論上限(33.7%)，此外，

目前記錄極限值僅達 26.1%，難以將太陽能電池轉換效率推升到 30% 以上。因此，如果要得到轉換效率超過 30% 的元件就必須要改變結構（如：多接面型、堆疊型），或採用不同材料（如：鈣鈦礦型），方可能達成（Box 2.2.1、附錄 2D）。

Box 2.2.1 太陽光電技術			
一般來說，目前太陽能光電裝置依照材料分為矽材料為主的單接合(Single Junction)太陽光電元件，以及以 III-V 族以及鈣鈦礦/矽基(Perovskite/ Si)為主的多接面堆疊型光電元件，另外還有非晶矽材料以及薄膜型光電元件，詳細說明請見（附錄 2D）。			
表 2.2.5 太陽光電三種類型比較			
類型	第一類	第二類	第三類
	結晶矽為主	薄膜技術與多接面型	非矽材料的使用
細部分類與轉化效率	• 多晶矽 23.3% • 單晶矽 26.1%~27.6% • 矽異質接面 26.7%	• 薄膜 29.1% • 多接面 39.2%	• 有機太陽能 17.5% • 量子點 16.6% • 鈣鈦礦 25.5%
優點	產量上已具備規模經濟，兼具成本與技術優勢	• 薄膜技術採用直接能隙半導體，具有優異吸光特性 • 多接面型（堆疊型）各太陽光譜波長中，皆可有最佳的光譜響應吸收	鈣鈦礦具有良好的光吸收率且光電轉換效率之增加速率高
挑戰	既有製程發展成熟下提升轉化效率空間有限	• 薄膜技術中砷化鎵元件對於製造時的雜質容許度低 • 多接面型仍需使用昂貴的材料和製造工序，有待降低製程設備與基板相關成本	• 鈣鈦礦的穩定性及耐候性仍有疑慮 • 現有高效鈣鈦礦太陽能電池仍含有相當比例的鉛元素而有環境危害風險

我國未來若發展多接面型/堆疊型太陽光電元件、鈣鈦礦型等太陽光電技術，若其轉化效率較現今矽晶型太陽光電提高 50%，便能在相同裝設面積的情形之下，增加 50% 的裝置容量及發電量，這對土地資源有限的我國而言，便是極關鍵的發展策略。因此，若 2050 年達到此科技水準，屋頂型太陽光電裝置容量可由 8.14~10.48 GW 成長至 12.21~15.72 GW（估算 20 年屋齡之建物屋頂及 30% 新建物屋頂）；地面型太陽光電則可由 21.3~28.41 GW 成長至 31.95~42.6 GW（估算 30~40% 使用面積）（圖 2.2.2、圖 2.2.3），合計屋頂型及地面型裝置容量目標為 44.16~58.32 GW。

因我國各地光照條件不一，使得全臺各地之太陽光電容量因數不一，範圍由9~15%之間¹⁰，因此，使用平均值(12%)作為容量因數來進行估算，太陽光電裝置容量目標為44.16~58.32 GW，預計可達約464.21~613.16億度的發電量，平均值為538.69億度。

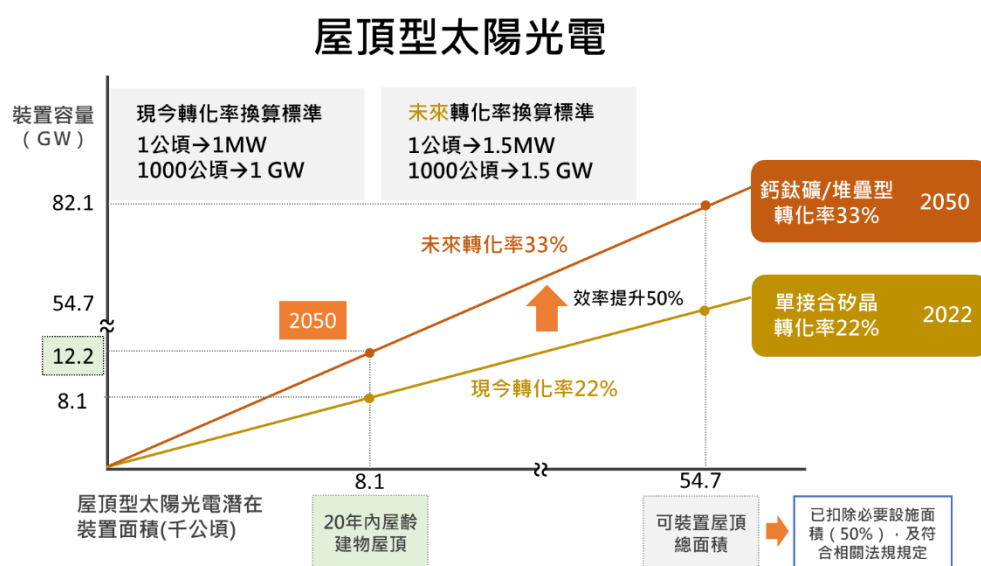


圖 2.2.2 屋頂型太陽光電預估裝置容量示意圖（註：以20年屋齡建物屋頂示意）

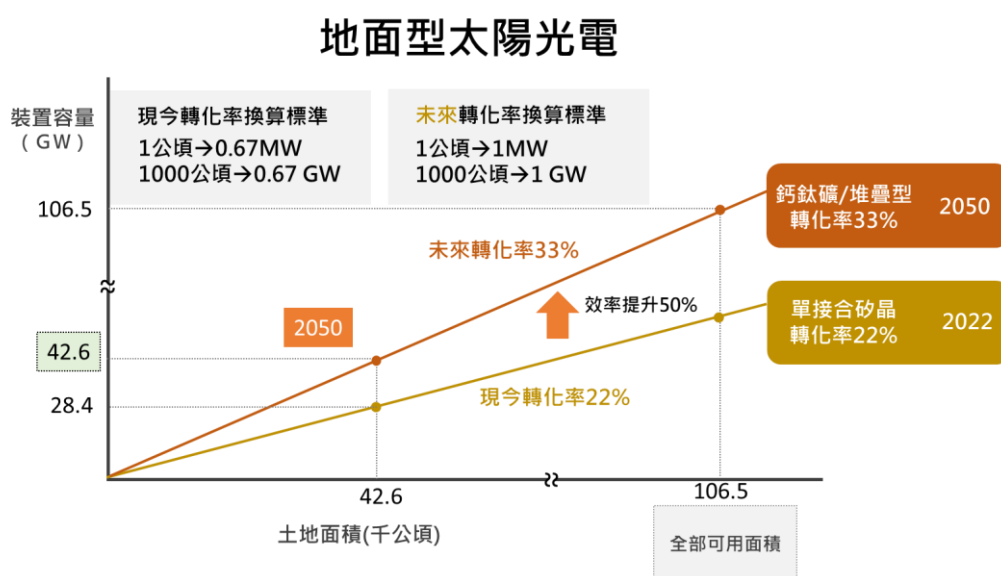


圖 2.2.3 地面型太陽光電預估裝置容量示意圖（註：以40%的可用面積示意）

¹⁰ 台灣電力公司(2021) 購入電力概況：再生能源之各縣市太陽光電容量因數。

2.2.4 政策建議

太陽光電是目前所有無碳電力選項中，技術最成熟、成本相對低之再生能源，只要投入建置裝置容量及支援之電力系統設施，短期便可提高再生能電力供給，但仍需社會支持、技術研發，以及政策配套等整體規劃，方可能解決目前實務上之問題，加速裝置，以達長期減碳目標。本建議書有以下建議：

1. 取得我國社會對太陽光電用地之支持，以提高太陽光電裝置容量與發電量

由於太陽光電先天能源密度低的限制，導致需要大量的土地設置。為了提高太陽光電發電量，擴大裝設面積為最為直接的手段，但由於我國國土面積有限（尤其是適合發展太陽光電之西部平原），增加光電裝置面積將會排擠到其他土地利用的需求（如：農地），這也是為什麼雖然目前政府有許多發展太陽能的鼓勵措施（如：台灣電力公司躉購制度 FiT、補助自用自發太陽能、營農型農地種電措施等），但針對大規模地面型光電場的設置，仍然衍生各種反對的聲浪以及社會爭議，這代表著目前我國社會對於太陽光電用地之重要性與優先性，尚未取得共識與支持，因此，取得社會支持才有增加光電裝置容量與發電量的可能性，再輔以提供各式誘導配套措施以加速布建。本項建議如下：

- (1) 加強跨部會協調統合，針對淨零排放議題進行國土長期規劃（如：光電用地、能源作物用地、儲能電網等基礎設施用地等等），若要進行土地利用變更，則須要調整相關法規限制與行政規範，例如：不適耕作之農地（水量不足之陸稻雜糧果樹耕地、長期荒蕪，未種植作物之廢耕地）須申請地目變更、繳回土地回饋金或加徵土地增值稅等問題。
- (2) 加強社會溝通，使民眾了解太陽光電之優點、必要性，以及溝通釋疑，以促成全民共識，例如：淨零排放的必要性、各能源選項之比較與選擇、民眾對光電衝擊之科學實證與專業解答（如：光電裝置對土質之影響及土地長期利用的農業目標，對養殖收穫之影響、對生態環境衝擊之影響等）。
- (3) 檢討並調整目前綠電電力收購、交易與管理制度，因我國電價偏低，目前我

國是採用電力躉購制度(FiT)以增加誘因，雖有加速推廣之優勢，但長久以來將造成再生能源產業過於依賴問題，因此建議搭配再生能源配額制度(RPS)，如此才能合理控制預算，降低採購成本並增加經濟效益來促進競爭，鼓勵再生能源市場良性競爭(Box 2.2.2)。

- (4) 提供各式誘導配套措施，提高民眾裝設意願，針對農電共生、漁電共生(Box 2.2.3)、私人建物之屋頂型太陽能板等，如能簡化太陽能設置申請與許可程序、強化安裝補貼（降低初始設置成本）、培植專業團隊協助民眾或社區裝設、獎勵綠電投資等，將有助於促成民眾凝聚共識，提升裝置意願。雖然目前太陽能板設置成本仍高，太陽能（住宅用）均化能源成本約 147~221 USD/MWh、太陽能（商業用）均化能源成本約 67~180 USD/MWh；但未來政府若施行碳定價機制，傳統化石燃料發電之均化能源成本將會提高，以燃氣複循環發電機組為例，在碳定價 40 USD/tCO₂eq 的情形之下，均化能源成本將提高至 93~218 USD/MWh，這也代表著綠能將得以與傳統化石燃料競爭¹¹。

¹¹ LAZARD (2021) LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS — VERSION 15.0, Levelized Cost of Energy Comparison—Sensitivity to Carbon Pricing, P5, <https://www.lazard.com/media/451905/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>

Box 2.2.2 綠電 FiT 制度與 RPS 制度之比較

表 2.2.6 綠電 FiT 制度與 RPS 制度之比較

制度	再生能源躉購制度 (Feed in Tariffs, FiT)	再生能源配額制度 (Renewable Portfolio Standards, RPS)
內涵	依照再生能源種類、規模、品質、地點等不同屬性，由政府制定各類再生能源的電力收購費率與適用期間	政府以立法規範等方式要求電業或能源用戶需要達成之再生能源發電配比義務，業者可透過再生能源市場進行購買（包括權證）來滿足其義務
採用國家	113 國（2019 年） 德國、法國、芬蘭、臺灣等	34 國（2019 年） 南韓、挪威、瑞典等
優點	• 提供再生能源業者投資利潤保障，在形成市場之初期，可以達到預期之效果 • 形成成本有效的採購機制 • 確實鼓勵再生能源投資並具有單純性	• 由市場供需決定價格，價格水準具有彈性，政府不需扮演價格制定者角色 • 配比義務可以透過最低成本方式達成 • 會促進低成本的再生能源更快速發展 • 較易預測電力供應之規模

資料來源：REN21(2021)；再生能源資訊網(2021)；中華經濟研究院(2013)；能源知識庫(2015)

Box 2.2.3 營農型太陽光電案例—漁電共生¹²

地面型太陽光電若涉及土地變更，其門檻、時間及成本均較高，因此，光電業者偏向於申請「營農型」計畫，有漁電共生、農電共生、畜電共生等類型。其中，漁電共生是透過養殖漁業結合太陽能發電系統並維持養殖漁業的「營農型」生產模式，因為被視為不損害農地、確保糧食安全、水資源保護、具有發電效益，被視為重要解決方案，目前政府已規劃 1 萬 4,480 公頃漁電共生區域，主要推廣地區在桃園埤塘及南部魚塢，但兩地除了有南北太陽輻射的差異之外，產權安排亦有差異，桃園地區漁民通常並非埤塘所有者，因此存有利益衝突；南部地區的魚塢大多由擁有產權的養殖業者經營。目前漁電共生的經營模式包含自行建置、廠商承包以及公民電廠等三個模式，其期初成本投入、維運成本、總收益皆不同，也各有優缺點，若能綜合評估經濟與社會層面問題，有助於與利害關係人溝通，提高裝設意願並弭平爭議（另詳見第七章）。

2. 投入更多研發經費於高轉化效率太陽能模組技術之研發，使單位土地面積之太陽光電裝置容量及發電量能有效提高

我國與其他擁有廣大土地的國家不同，與其一味的尋求大量土地並裝設光電

¹² 同前揭註 5。

設施以達成目標的方式，我國更應該思考投入研發高轉化效率太陽能模組技術（包含新穎技術以及製程開發），以科技換取土地的思維，以緩解太陽光電對土地需求之壓力。此外，未來幾年全球太陽能安裝量仍會持續上升，面對中國的低價競爭，臺灣一定要研發新材料及新製程設備，才能取得優勢，否則未來臺灣太陽能電池產業仍會經營得非常辛苦。本項建議如下：

- (1) 明訂高轉化效率太陽能模組技術之效能指標項目：全球太陽光電裝置容量於 2050 年時預期達到 14,458 GW 的目標值，顯示此技術需要非常大的商業化規模，因此，除了提高轉化效率的研發項目之外，更應包含可大規模量產、低成本等具商業價值之技術。例如：使用 III-V 族的多接面型光電元件在日光下可達 39.2% 的轉化效率，而在光源強度為 143 倍日光的狀況下，則可達 47.1%，雖然高效率，但因此類型材料在成本上過於昂貴，目前多半使用於特殊用途如軍事與航太科技，這也造成此技術可行性降低。此外，考量目前裝置的光電設施使用年限約 20 年，建議將未來科技水準目標設定為：「轉化效率較現今矽晶型太陽光電提高 50%、並可在 2040 年以前量產、具商業價值之技術或商業模式」，如此新技術可約於 2040 年切入市場，汰換現有技術。
- (2) 針對太陽光電新技術之缺口，明訂研發題目。以鈣鈦礦型太陽能電池為例，鈣鈦礦太陽能電池有著高轉化率(36%)且製程耗能低，可以大面積生產，加上低成本、製程簡單、質輕量薄等多重優勢，尤其近年來更是發展了解決其產品含鉛問題，這會對鈣鈦礦規模商業化更加有利，深具量產潛力。此外，鈣鈦礦太陽能電池具有可調能隙、高吸收係數與易加工性，所以最被看好與矽基太陽能電池搭配達成低成本與高效率疊層式太陽電池。目前矽/鈣鈦礦疊層式太陽能電池實驗室轉換效率可達到 29.5%，對業界是非常有吸引力的。但目前最關鍵的研發挑戰即為：因光譜吸收範圍因素，如要進一步提升電池效率，如何增加堆疊吸收層的層數？目前待解決的問題包括：
 - 降低透明電極電阻值（金屬網狀電極最佳化）

- 設計不同能隙的鈣鈦礦材料，以吸收各個波段的光，並對各層進行優化
- 因矽晶表面起伏大，需研發適合的沉積方式，將各層均勻的沉積
- 各層的光學設計須最佳化，使光損失降至最低
- 尋找適合的電荷再結合層（高導電度與高穿透率）
- 改善寬能隙鈣鈦礦太陽能電池的電壓損失
- 增加鈣鈦礦耐候性
- 延長鈣鈦礦太陽能電池之生命週期
- 提高環境友善度

(3) 整合我國研發至商業化之力量，建議學術界可持續針對關鍵技術之關鍵缺口投入研發高轉化效率太陽能電池，並邀請業界提供檢測設備與太陽能電池片壽命(Lifetime)的評估。其他研究單位或法人也可協助開發針對新電池材料的新製程設備(Box 2.2.4)。

Box 2.2.4 中央研究院之研發進程

中央研究院長期投入鈣鈦礦薄膜長晶技術研發，同時也以各種添加物填補晶界與鈍化鈣鈦礦薄膜缺陷，達到提升鈣鈦礦太陽能電池的轉換效率與改善其耐候性，我們的目標是製作出效率超過 30% 的矽鈣鈦礦疊層式太陽能電池。未來國內業界投產的電池片的面積大小將以邊長 188 mm 與 210 mm 規格為主，我們近期也在嘗試各種塗布技術用於製作大面積鈣鈦礦薄膜，待塗布技術確認與塗布條件最佳化後，我們可將鈣鈦礦太陽能技術無縫接軌的轉移給臺灣太陽能產業。

3. 建置完善電力系統之基礎設施及管理調度機制，以解決太陽光電間歇性造成之供電不穩定問題

太陽光電之間歇性造成能源來源不穩定，這是由於太陽光會受到日夜以及天候影響（如：雲、高溫），瞬間降低光照，導致無法穩定供電。本項建議如下：

- (1) 建議儘速建置電網級（GW 等級）儲能設施，並搭配智慧電網之調控，正常時間時，可針對太陽能之「鴨子曲線」特性彈性升降載及「削峰填谷」作電力調控之用；並於緊急情況時，提供輔助服務以穩定電網電壓（本建議可詳見本章 2.10 節、2.11 節）。
- (2) 提升天候預報能力（時間與空間尺度更細緻），並結合氣候預報系統與太陽能發電裝置系統，提供較精準的太陽能發電量預測資訊，使電廠能及時排程調度電力，意即在日照充足時多使用太陽光電，而日照低時則調配其他電力。

4. 其他建議：以新技術帶動產業，發展我國太陽光電產業

除了上述之政策建議之外，亦需要發展我國的太陽能光電產業，方能掌握新技術研發、大量生產、裝設設備、系統維運等。惟我國太陽能光電產業受到國際廠商大量加入競爭的衝擊，再加上各國貿易壁壘等問題，使得廠商的投入日趨保守。中國因近年大力發展太陽能中上游產業，挾帶著中國政府大量的補貼以及產量大的優勢，因此價格較低，甚至常削價競爭，導致我國許多廠商競爭失利甚至倒閉。這導致歐美國家許多太陽能產業先驅者因成本因素導致競爭失敗，因而黯然退出市場，因此歐洲開始採行對於國內太陽能產業的保護主義，另外，美國也推動反中國傾銷而對中國課徵高關稅，這連帶使得我國太陽能廠受到波及，所幸目前我國生產的太陽能電池技術仍受到國際認可，電池的轉換效率相較於中國高，若能再繼續深耕相關技術，配合政府對於高效率模組技術的未來需求，及早佈局下世代高於 30% 光電轉換效率之技術，將能有效的將市場做區隔，跳脫目前劣勢，提升產業的競爭力。

5. 其他建議：以妥善技術及配套措施降低太陽能板生產至廢棄之環境衝擊

標榜著乾淨能源的太陽光電，在生產製程當中產生由大量碳化矽粒子、矽屑、金屬與切削油形成的固體「矽泥」廢棄物，而目前大多採取掩埋法或是堆置法處理，這對環境會造成一定的影響，這一點也是許多團體反對太陽能的原因。因此在致力發展太陽能產業的同時，必須規劃以及投入相關廢棄物處理技術的研發，例如國立成功大學研究團隊所開發的「矽泥資源化分選技術」即可將其轉換為矽

鐵，並作為鋼鐵業的助燃燃料，以避免未來大量使用太陽能裝置帶來的廢棄物問題¹³。

此外，由於目前在我國多數的裝設的太陽能板保固的發電效率為 25 年，因此還尚未進入太陽能模組的回收期，但在未來將會是不可避免的問題，這也意謂著我國必須提前思考進入回收期後大量的廢棄太陽能模組處理問題。現今歐洲和日本國家因發展太陽能較早，目前即將進入回收期，因此已有相當多的單位及公司投入研究，目前 PV Cycle 太陽能板回收的比例已達到 97%，而在臺灣則是由經濟部能源局與行政院環境保護署攜手規劃並提出透過向業者提存經費以作為未來回收費用所需，輔導兩家合法處理機構處理廢太陽能板，並取得日本與德國收受處理意願，因此目前可以因應現階段太陽能板回收量，但在實務上，一旦未來我國邁入光電模組回收期，大量且多尺寸的太陽能板將增加回收的困難度，因此建議建立專職回收聯盟，並發展可針對多尺寸太陽能板自動化回收系統將會是必要的作為。

¹³ 國立成功大學(2016) 成大把廢棄物變黃金「太陽能電池廢棄物—油泥資源循環技術」發表會。
<https://web.ncku.edu.tw/p/404-1000-156134.php?Lang=zh-tw>