

再生能源需要大量土地面積，臺灣是否適合發展

再生能源？

2018.04

核能研究所 黃孔良

關鍵字：再生能源潛能、用地面積、太陽光電、風力發電、地熱發電

隨著 2015 年聯合國氣候峰會通過巴黎協議後，各國多訂定明確的承諾，將增加再生能源和能源效率的投資，力求實現將全球增溫控制在 2°C 以下的目標。不過台灣地狹人稠，尤其是近年來國際再生能源發展的主力太陽能與風能，已列為台灣能源轉型的重要發展項目，但太陽能發電量受日照條件影響，陸域風能也受限風速條件的影響，且都有與民爭地的疑慮，使得前述再生能源發展受到許多輿論質疑。離岸風能亦是我國未來重要的能源選項之一，惟使用的土地不涉陸地，故以下將排除討論。另由於台灣位於環太平洋板塊交界，擁有豐富的地熱蘊藏資源，使地熱能也成為台灣發展再生能源發展的潛力項目，地熱能是否適合在國內發展也受到了注目。

以下將藉由探討上述新興的再生能源占用空間及相關土地盤點，來瞭解於國內發展再生能源的可行性。

再生能源佔用空間

探討再生能源發展時，最常被討論的議題就是使用土地面積問題，目前主力發展的再生能源如風能和太陽能在單位發電面積的表現仍不及傳統能源，由表 1(經濟部，2013；林錦仁，2000；能源局，2016)可得知再生能源的使用土地面積仍較傳統能源高，其主要原因就是風能及太陽能都具有間歇性的特徵，無法全時發電，使得每單位面積發電量較可全時發電的傳統能源小，從表 1 也可以端倪，由於風能及太陽能都具有間歇性的特徵，其陸域風電及太陽光電容量因子分別為 28% 及 14%(離岸風電為 38%)，地熱發電相較之下屬於能穩定供電的再生能源，根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)的資料，地熱發電平均容量因子為 75%，但我國 1980 年代興建之宜蘭清水地熱發電廠資料，其屬於淺層地熱，營運時未注意尾水回注及遭遇到管垢堆積等問題(林錦仁，2000)，在營運初始與營運末期的發電量衰減幅度相當大。而目前深層地熱的發展技術為「加強型地熱系統」，然其必須回注水體或以水力破壞方式進入地熱的儲集層，

並有引發地震的可能(陳宏宇、劉佳玫，2013)，目前國際上已有法國於1987年商轉加強型地熱系統的1.5MWe科學先導型地熱廠，美國、英國、土耳其等國皆在試驗開發階段(林子耕，2018)，國內也尚未採用。

表 1 各類能源單位發電裝置容量及發電量所需土地比較

各類發電方式 所需面積及比較	燃氣	燃煤	核能	再生能源		
				太陽光電	陸域風力	地熱 ^(註2)
單位裝置容量所需面積(m ² /瓩)	0.22	0.52	0.71	10.0~20.0	27	0.67
單位裝置容量面積比較(m ² /瓩)	1(base)	2.4	3.2	45.6~91.2	123	3.03
容量因子	0.9	0.9	0.9	0.14	0.28	0.75
單位發電量面積比較(m ² /度) ^(註1)	1(base)	2.4	3.2	292.9~585.8	395.4	3.64

註：
 1.天然氣、燃煤及核能電廠之占地面積，由台電公司提供台綜院整理。其中發電量假設燃氣、燃煤及核能容量因子以90%計算，太陽光電之容量因子為14%，陸域風機為28%，離岸風機38%。
 2.地熱電廠單位裝置所需面積採1980年代興建之清水地熱廠單閃式發電機組估算。容量因子採75%(參考IEA)。(清水地熱廠運轉期間平均容量因子為13.78%)

(資料來源：經濟部，2013；林錦仁，2000；能源局，2016，核能研究所整理)

從表 1 可以發現太陽光電在單位裝置面積固定下，系統發電效率和日射量對於單位發電量面積之影響可達 1 倍。以日射量來說，國內日射量的分布為由北向南遞增，以嘉義、台東最高，基隆最低，基隆日射量僅台東的 41%左右(徐翠華，2002)。而影響系統發電效率的因素則包含系統模組因素(如電池效率與線路損耗等)以及外在的環境因素(如氣溫、濕度、落塵等)(綠能趨勢網，2015)，若環境因素與線路損耗因素不變，僅考量電池效率下，目前太陽能板商用模組的電池效率，在矽晶模組可達 22.4%，聚光型模組約達 31.2%(Martin A. Green 等，2017)，相同條件下選用不同模組的年發電量差異近 39%，意即在發電量相同下，使用高效率電池模組的用地面積為一般矽晶模組的 72%。

雖然風電與太陽光電所需面積較大，但傳統能源使用的土地具有獨佔性，難以用作其他用途。而再生能源使用的土地則可有多功能的用途，以太陽光電為例，如結合建築物屋頂的屋頂型太陽能，已在國內外廣泛推廣；在農業方面，日本研究生物學的光飽和點，超過飽和點後，太陽光反而不利植物生長，因此提出太陽光電與農業結合之農電共享，建議可採行太陽能板覆蓋農地面積遮蔽率為 32%(Mae-Wan Ho，2016)，而日本靜岡縣已有農場安裝太陽能板實現農電共享之案例(Japan for Sustainability，2014)，桃園農改場也試驗在 40%遮蔽率下，蝴蝶蘭、文心蘭、香莢蘭(香草)、魚腥草等 14 種作物，可維持 70%的產量(陳文姿，2017)；另外在中國大陸漁光一體之研究，魚塭結合太陽光電之設置面積

可達 75% (索比光伏網, 2015), 近期也在青島完成漁光一體的太陽光電併網發電(時代論壇網, 2018), 國內如台南梅佳牧場安裝太陽能板後, 不但牛舍溫度降低, 且夏季泌乳量也不減少(聯合新聞網, 2017)。顯示太陽光電可與不同產業共存, 不必如傳統能源一般, 需要額外專用土地生產能源。

風電傳統上已運用在農業泵送灌溉用水上, 而現今的風力電場則幫助農業在本業發展外, 可獲得更多的營利來源(Mason Inman, 2011), 例如在美國, 農民或牧場主將地租給風電業者或自己成立風力發電站, 德州牧場利用風力發電機為牛群抽水, 愛荷華州農民在土地上種植玉米, 並且同時進行風力發電(Union of Concerned Scientists, 2003)。在丹麥, 透過風車協會(vindmølleaug)整合開發, 農民也可在種植作物的收益外, 獲得額外的收入 (WIND-WORKS.ORG, 2004)。一般規劃風力發電所需場域, 以葉片直徑為 D , 設置間隔為迎風面間距 $2 \sim 4D$, 縱向間距為 $4 \sim 6D$, 方可避免影響風機效能(陳一成, 2016)。以石門風力發電站丹麥 Vestas47 機組為例, 其葉片長度 23.5 公尺(直徑為 47 公尺), 風機高度 45 公尺, 基柱直徑為 3 公尺(www.sparesinmotion.com), 實際占用地面的基座面積約為 7 平方公尺, 佔實際風場面積比例僅 0.04%($7/(2*47*4*47)$)。

由上, 顯示再生能源雖然單位面積發電量較傳統能源低許多, 但卻可兼具發電與農、漁業或商業生產等多重性的功能。

土地盤點

探討再生能源佔用空間的議題後, 國內有哪些土地適合發展再生能源及相關再生能源潛力的大小, 也是值得關心的議題。

在太陽光電用地方面, 經濟部能源局於 2016 年 9 月之「太陽光電 2 年推動計畫」公告國內太陽能發展可使用之地目, 屋頂型太陽光電包含中央公有屋頂、工廠屋頂、其他屋頂、農業設施; 地面型聚焦四大主軸: 鹽業用地、掩埋場及已受汙染土地、嚴重地層下陷區、水域空間(水庫、埤塘、滯洪池、魚塭等)(經濟部, 2016)。而在 2017 年 11 月 8 日行政院排除產業投資障礙穩定供電策略記者會簡報中, 增加桃園埤塘、彰濱工業區崙尾東及崙尾西土地、台西工業區土地、農委會文蛤養殖專區、國防部閒置營區、財政部國產署國有土地等項目, 彙整如表 2 (經濟部, 2017)。而國內研究, 尚提出如國道或鐵路旁用地、休廢農耕地、與閒置機場或港口等地目(呂錫民, 2010; 熊正揚, 2012; 郭成聰, 2014)。

表 2 我國屋頂型太陽光電潛在裝置容量預估

能源局規劃用地及裝置容量目標 (面積單位：平方公里，容量單位：MW)							
能源局盤點時間	105年9月		106年11月		至114年落差		
設置類型	規劃面積	預估容量	面積	裝置容量	面積	裝置容量	
屋頂型	-	717	-	1318.7	16.813	1681.3	
地面型	嚴重地層下陷不利耕作區域	25.19	1,679	23.8	1,589	3.63	242
	水域空間	27.21	1,814	27.2	1,815		
	鹽業用地	8.03	535	8.0	536		
	掩埋場及受汙染土地	26.338	1,755	26.3	1,757		
	桃園埤塘	0	0	16.5	1,101		
	彰濱工業區	0	0	4.5	300		
	高樹回填區	0	0	0.4	25		
	台西工業區	0	0	11.6	776		
	農委會文蛤養殖專區	0	0	56.7	3,783		
	國防部閒置營區	0	0	1.3	88		
	財政部國產署國有土地	0	0	74.8	4,988		
地面型小計	86.768	5,783	251.2	16,758			
小計	86.768	6,500	251.24	18,076	20.45	1,924	

(資料來源：經濟部，2017)

國內研究太陽能裝置容量之潛能，根據黃孔良(核能研究所，2017)彙整之國內屋頂型太陽能裝置容量如表 3，若不考量建築物使用年限，其裝置容量潛能可達 54.7GW，以 20 年內建築物與農業設施合計之屋頂型太陽能約有 10.8GW 裝置容量之潛能，而地面型太陽能可用面積約 1095.59 平方公里，裝置容量潛能約 71.9GW，但其中 58GW 為農耕地，若以目前政府政策規劃方向排除農耕地後，裝置容量潛能僅剩 13.6GW，裝置容量如表 4。

其中因鹽業用地、農業用地涉及生態保育與糧食供給的問題，目前政策在開發上傾向縮限使用面積的開發方式，如國有財產署列管之鹽業用地面積約 40 平方公里，而能源局公告開發範圍約 8.03 平方公里；農業用地則規劃以嚴重地層下陷不利耕作區、受汙染農地為開發對象，排除農耕地以減少對糧食供應之衝擊。水域空間部分，為避免影響水庫水質，目前水利署規劃水庫設置太陽能板的面積也以 5%為上限。而屋頂型太陽能在政策上雖未做限制，但考量建築物使用年限與躉售機制之年限，宜以 20 年內建築物做為開發對象(馬維揚等，2014)。

表 3 我國屋頂型太陽光電潛在裝置容量預估 (單位：MW)

類型	能源局政策規劃用地類型					本研究估算建築屋頂(不含農業設施)可用面積	
	公共設施屋頂	工業區屋頂	其他屋頂	農業設施	合計	15年內新建屋頂面積	20年內新建屋頂面積
預估裝置容量	1,992	14,771	35,257	2,708	54,728	5,595	8,142

(裝置容量換算標準屋頂型 1kW/10m²，資料來源：核能研究所，2017)

表 4 我國地面型太陽光電潛在裝置容量預估

用地名稱	預估裝置容量(單位：MW)	用地名稱	預估裝置容量(單位：MW)
鹽業用地	536	農業長期休閒地	23,193
嚴重地層下陷區	585	休養魚塭(40%)	689
掩埋場與受汙染土地	345	未休養魚塭(40%)	9,801
水域空間-(水庫、滯洪池、埤塘、魚塭)	2,026	交通用地(國道、高鐵、台鐵)	745
陸上盜濫採土石坑洞計畫列管農地	5	農業長期耕作地	35,151
政策規劃用地合計	3,497	閒置交通用地(機場、港口)	83
全部規劃用地合計			71,934

(裝置容量換算標準地面型：1kW/15m²，資料來源：核能研究所，2017)

在陸域風力方面，風力發電機要有效運作，其風力需介於蒲福風級表 3~7 級間(3.4-17.1 公尺/秒)(經濟部風力發電 4 年推動計畫網站)。國內研究對陸域風能蘊藏量仍有相當差異，潛能由 1.6GW~7.7GW (Chen et al., 2010；曾詠恩，

2006)以平均風速大於 4.5 公尺/秒區域估算,約含有 4.6GW 潛能(陳一成, 2016)。工研院(2016)台灣 2050 能源情境供需模擬器資料顯示,若得到大多數民眾認同,且開發法規大幅降低,並納入最新噪音規範的情形下,2030 年可完成平均風速 5m/s 以上,總數 2,430MW 的風場開發。若統計台灣陸域風機可設置數量,以 VESTAS V80 為單位,設定機組間合理間隔定為東西向 500 公尺及南北向 1,000 公尺,以計算出每張航照圖上土地可利用面積及其中最多可配置之風力機數量。呈現台灣各區域可裝置風機數量如表 5。由表 5 可估算出台灣陸域約可設置 3,881 部風機,佔面積約 1,941 平方公里(0.5 平方公里*3,881 部),若以每部風機裝置容量 2MW,則台灣陸域風能約有 7,7GW 裝置容量潛能,較 2025 年政策目標 1.2GW 為高,然上述分析所呈現的是我國陸域風電可能裝置的最大潛力,實務上,我國在規劃陸域大型風力機組之推廣裝置容量時,應已同時考量風力技術的經濟可行性及政府財政負擔,因而僅設定 1,200 MW 為目前陸域風力機組推廣目標量(溫佩伶等人, 2014)。

表 5 臺灣陸域可設置風機數量

縣市	區域	各區域總數 (部)	縣市	區域	各區域總數 (部)
新北市	雙溪	41	桃園市	大園	129
雲林縣	蚊港	76	臺東縣	大武	39
臺北市	臺北市	24	新竹市	新竹市	142
臺南市	麻豆	1,155	屏東縣	滿州	167
新北市	三芝	39	苗栗縣	白沙屯	86
臺南市	臺南	325	屏東縣	恆春	138
新北市	三芝	14	臺中市	清水	12
嘉義縣	朴子	624	屏東縣	琉球嶼	138
新北市	淡水	134	雲林縣	臺西	572
臺東縣	東河	26	總計		3,881

(資料來源：溫佩伶等人, 2014)

在地熱發電潛能部分,國內曾有團隊以國際新發展的增強型地熱系統(Enhanced Geothermal System, EGS)概念,重新評估全島深部地熱,認為台灣地區的地熱資源量可達 159.6 GWe,可開發潛力高達 33.64 GWe,包含東北部宜蘭地區、北部大屯山火山群、中部廬山地區與花東地區,涵蓋面積約 1,719 km²,如表 6。

表 6 台灣深度小於 4,000 m、地溫超過 175°C之地熱原始蘊藏發電容量

地區	涵蓋總面積 (km ²)	原始地熱發電容量 (MWe)	所佔比率 (%)	各海拔區間地熱蘊藏發電容量(MWe)				
				天然條件限制開發			天然條件較可開發	
				>2,000 m	1,500~2,000 m	1,000~1,500 m	500~1,000 m	<500 m
宜蘭地區	532	36,923	23.13%	30,219	13	456	2,100	4,135
大屯火山群地區	88	2,886	1.81%	0	0	0	716	2,170
花東地熱區	5,403	100,431	62.92%	15,900	43,334	15,443	12,880	12,874
南投廬山地熱區	954	19,366	12.13%	10,143	5,194	3,859	170	0
四大高溫地熱區總計 (所佔比率%)	6,977	159,606		56,262 (35.25%)	48,541 (30.41%)	19,758 (12.38%)	15,866 (9.94%)	19,179 (12.02%)
可開發條件(海拔1,000 m以下，扣除位於陽明山公園內法令不可開發約1,405 MWe)								
潛在地熱發電容量(MWe)							33,640	

(資料來源：宋聖榮等人，2011；張竝瑜等人，2013)

另有研究根據臺灣區域性熱流分布之地溫梯度數據，使用美國、紐西蘭、日本等國際地熱先進國家常用之蘊藏熱能法(Stored Heat Method)來估算，並以 150°C為最低開發溫度，推估 3~6 公里深度之 EGS 發電潛能，其結果顯示，臺灣本島之九大增強型地熱系統潛能區之總分布面積約 4,532km²，約佔全島面積之 12.5%，平均溫度約 208°C，總儲藏發電潛能理論值約 31.8GW，此一數據並納入能源局 2014 年能源產業技術白皮書中，如表 7。

雖然地熱潛能區域分布面積廣闊，但地熱發電能否具有經濟效益的最大因素為選址的工作(陳宏宇、劉佳玫，2013)，上述用地可能位於高山區、國家公園保護區，是否適合開發與開發面積大小，仍需視當地的地形結構，有無酸蝕、結垢因素(經濟部中央地質調查所，2012)，與用地合法性等因素作評估。而郭佳韋(核能研究所，2015)也指出上述地熱潛能為模型直接套用台灣地底地溫梯度分佈所運算出來的理論值，但實際可開發量則會受到技術成熟度、都市規劃及地質環境限制影響，若採工研院所發展的臺灣 2050 能源供需情境模擬器評估，較為樂觀且有可能實行為 Level II 或 Level III，優先開發傳統淺層地熱，待國外 EGS 技術發展成熟再引進發展，可兼顧再生能源發展與開發成本的支出。目前於臺灣 2050 能源供需情境模擬器顯示 Level II 或 Level III 之 2050 地熱潛能分別為 1.2GW、2.1GW。

表 7 台灣九大地區地熱潛能評估

地區	平均面積 (km ²)	平均溫度 (°C)	蘊藏熱能 (10 ¹⁸ J)	發電潛能 (GW)
大屯山	278	236	252	2.7
清水、土場	909	223	223	7.8
廬山	279	210	209	2
瑞穗、安通	467	195	297	2.6
霧鹿、紅葉	571	196	366	3.3
知本、金崙	701	214	545	5.4
寶來	476	205	336	3.1
關仔嶺	510	197	334	3
新竹、苗栗	343	192	209	1.8
合計	4,532	208	3,307	31.8

(資料來源：柳志錫等人，2012)

綜上各種再生能源，其發電潛能皆具有相當之規模，太陽能(僅考慮地面型，因屋頂型為使用既有建築物，並無實質新增用地需求)、陸域風能及地熱的全部潛能開發面積達 7 千五百餘平方公里，佔本島面積約 21%，如此大量的土地佔有必然是不可能。但如果相視於目前能源局新近宣示的 2025 年再生能源建置目標，地面型太陽能 17GW、陸域風能 1.2GW、以及地熱 0.2GW，與上述的潛力占有面積相比較，地面型太陽能約為 250 平方公里、陸域風力約為 302 平方公里、加上地熱約為 9 平方公里，2025 年再生能源建置目標的佔地面積約為本島面積的 1.6%。以我國當前發展再生能源的目標從佔地面積的觀點，應屬合理。當然，更多的潛在能源場址能否適當開發，仍需考量技術面、生態面、法規面、社會面、成本效益面等因素，即使連景觀面也都需考量，以免破壞環境，反而違背發展再生能源的美意。

參考文獻

工業研究院(2016)·台灣 2050 能源情境供需模擬器·<http://my2050.twenergy.org.tw/>。

呂錫民(2010)·我國裝置太陽能潛力探討·能源報導·2010 年 11 月·頁 31-33。

宋聖榮、羅偉、葉恩肇、吳逸民、劉聰桂、陳洲生、張竝瑜(2011)·宜蘭清水地熱能源研究：探勘技術平台的建立與深層地熱(2/3)·行政院國家科學委員會。

李錦發、李柏村、朱偉嘉(2012)·從地質、環境與技術方面探討我國地熱發電的展望·經濟部中央地質調查所。

林子耕(2018)·地熱發電技術(四)：地熱取熱技術 - 增強型地熱系統 EGS·<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/OAdX.htm>。

徐翠華(2002)·台灣地區太陽輻射及太陽能發電潛力之研究·國立台灣師範大學地理研究所碩士論文。

時代論壇網(2018)·贊！青島 Qingdao 首個漁光一體光伏發電專案並網發電·<http://www.a1126.org/DispOneMessage.asp?txtOrgCode=CCEF&Category=18&ID=CCEF43104091532932&Page=1>。

索比光伏網(2015)從“漁光互補”到“漁光一體”光伏農業雙贏之道需政策助力·<http://news.solarbe.com/201506/02/73443.html>。

馬維揚、辛華煜、郭成聰(2014)·台灣太陽能蘊藏量之估算與評估·核能研究所

能源資訊平台-能源簡析。

張竝瑜、宋聖榮、劉佳玫、賴佑吉、陳洲生、羅偉(2013)，由宜蘭清水地區地熱

研究推估臺灣地熱發電潛能之研究。西太平洋會刊，地熱專刊。

郭成聰(2014)，臺灣太陽能發展的現況、問題、解決方案或建議，核能研究所能

源資訊平台-能源簡析。

郭佳韋(2015)，地熱發電潛能評析，核能研究所。

陳一成(2016)，能源議題：認識再生能源，<http://www.tpea.org.tw/uploads/>

[TPEA_2016893210.pdf](http://www.tpea.org.tw/uploads/TPEA_2016893210.pdf)。

陳文姿(2017)，「農地種電」來真的 追日太陽能板 種出高經濟作物不是夢，

<http://e-info.org.tw/node/208079>。

陳宏宇、劉佳玫(2013)，臺灣地熱潛能之發展，臺灣能源期刊第一卷第一期，

85-103 頁。

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。

黃孔良(2017)，我國太陽光電用地及潛在裝置容量評估及建議，核能研究所。

溫佩伶、林師模、林晉昺、馮君強、葛復光(2014)，臺灣陸域風力發電之成本效

益分析，核能研究所。

經濟部(2013)，台灣能源面臨的挑戰與選擇。

經濟部(2016)，太陽光電 2 年推動計畫。

經濟部(2017) · 產業穩定供電策略。

經濟部風力發電 4 年推動計畫 · 知識學習 > 基本介紹 · http://www.twtpo.org.tw/knowledge_show.aspx?id=23。

熊正揚(2012) · 台灣再生能源動態蘊藏量評估與供電模式分析。台灣大學應用力學研究所碩士論文。

綠能趨勢網(2015) · 干擾光伏电站發電量的十大因素 · <http://pv.energytrend.com.tw/knowledge/20150721-11711.html>。

聯合新聞網(2017) · 牧場設太陽光電 牛舍降溫又能提高乳牛受孕率 · <https://udn.com/news/story/7326/2403236>。

Chen, F., S. M. Lu, K. T. Tseng, S. C. Lee, and E. Wang (2010), Assessment of Renewable Energy Reserves in Taiwan, Renewable and Sustainable Energy Reviews,14(9), 2511–2528.

IEA(2010), Renewable Energy Essentials: Geothermal.

Japan for Sustainability(2014), Solar Sharing in Japan: Efforts and Hurdles, https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id035010.html.

Mae-Wan Ho(2016), Japanese Farmers Producing Crops and Solar Energy Simultaneously · Science in Society, http://www.i-sis.org.uk/Japanese_Farmers_Producing_Crops_and_Solar_Energy.php.

Martin A. Green (2017), Solar cell efficiency table (version 50).

Mason Inman(2011), Planting Wind Energy on Farms May Help Crops, Say

Researchers, <https://news.nationalgeographic.com/news/energy/2011/12/111219-wind-turbines-help-crops-on-farms/>.

SparesInMotion.Com, <https://www.sparesinmotion.com/wind-turbine-parts/other-mechanical-parts/towers-vestas-v39-47>.

Union of Concerned Scientists(2003), Farming the Wind: Wind Power and Agriculture (2003), <https://www.ucsusa.org/clean-energy/increase-renewable-energy/wind-power-agriculture#.WqDGjqhuZaQ>.

WIND-WORKS.ORG(2004), Community Wind:The Third Way, http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=61&tx_ttnews%5Btt_news%5D=500&cHash=61275c1871a645d3c5bb37e5c256ef70.