

2°C情境下之太陽光電及離岸風電力國際市場展望

洪瑋嶸 (核能研究所綜計組能源策略研究室助理研究員)

柴蕙質 (核能研究所綜計組能源策略研究室副工程師)

袁正達 (核能研究所綜計組能源策略研究室副工程師)

陳彥亨 (美國麻省理工學院全球變遷中心研究員)

文章資訊

接受日期：2020.09

關鍵詞：

- 全球可計算一般均衡模型
- 碳價
- 國家自定貢獻
- 2°C 目標

內文摘要 (Abstract)

我國再生能源技術產業之長期擴展需倚重國際市場，因此在研擬技術佈局或產業策略時，國際研究機構出版的能源展望報告或市場分析報告皆是重要的依據，其中降低溫室氣體排放是趨動再生能源技術發展的重要因素，但由於許多著眼技術展望之國際報告，常假設技術進步為主要工具，較少著重碳稅或碳價等價格工具，可能忽略價格機制帶來的經濟影響，此外，國際報告中著重較極端的能源轉型願景，和當下之政策情勢可能存在落差。當其聚焦之情境、技術或減碳策略和本土需求有落差時便無法自主分析，因此國內需要與國際報告互補之量化分析工具。Economic Projection and Policy Analysis (EPPA)-Taiwan 為核研所與美國麻省理工學院全球變遷中心 (The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change) 合作開發之全球可計算一般均衡 (computable general equilibrium, CGE) 模型，具有細緻的能源部門，適合分析不同情境下之能源成本及技術市場規模。本研究參考國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 出版World Energy Outlook 2017 (WEO2017) 報告內容，作為各國之再生能源目標占比參數，並模擬以碳價達到「國家自定貢獻」目標 (nationally determined contributions, NDCs) 及全球溫升低於2°C目標 (2DC) 等二種減碳情境。在2°C情境下，本研究以全球單一碳價為工具，並考量各國貿易、產業互動下帶來之經濟衝擊，發現全球太陽光電及離岸風力發電量將成長，在各國之發電占比也如期增加，但中國、印度因為減碳責任遠比NDC下來得加重，加上國際整體經濟的衝擊，使其用電需求明顯降低，太陽光電之市場規模很可能受到些許負面影響，因此2°C情境下，開發中國家若未提出更積極之太陽光電及離岸風力目標，市場不確定性便較高，本文之分析有別於工程模型，著重於以碳價達到更嚴峻的減碳目標，並考量經濟衝擊對能源及電力需求之負面效果，可和許多假設經濟成長外生(減量政策不對經濟造成負面影響) 之國際展望報告互補，提供技術研發單位及產業界之國際佈局更多元之考量。

ASSESSMENTS OF SOLAR PHOTOVOLTAIC AND OFFSHORE WIND ENERGY POTENTIAL IN A 2°C WARMING SCENARIO

Wei-Hong Hong (Energy Strategy Research Lab, Planning Division, INER)

Hui-Chih Chai (Energy Strategy Research Lab, Planning Division, INER)

Cheng-Da Yuan (Energy Strategy Research Lab, Planning Division, INER)

Y.-H. Henry Chen (Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT)

Information	Abstract
Accepted date : 2020.09 Keywords : <ul style="list-style-type: none">• Global computable general equilibrium (CGE) model• Carbon price• National determined contribution (NDC)• 2°C target	<p>In this study, we look into the future of renewable energy industries under the global context, when decarbonization policies are in place. We note that while bottom-up engineering models are often used to conduct relevant research, as they may provide higher resolutions in terms of time scale or technology options, variables such as GDP and energy demand are usually exogenously given. To complement existing research and capture the interdependency between different sectors and regions, we apply EPPA-Taiwan, a computable general equilibrium model for the world economy developed jointly by the Institute of Nuclear Energy Research in Taiwan and the MIT Global Change Joint Program, to conduct the analysis. In particular, scenarios considered in our study include: 1) the Paris scenario, which considers the case where each country's national determined contribution is carried out as planned, and 2) the 2°C scenario, which assumes that the world is committed to follow an emissions mitigation plan consistent with 2°C of warming by implementing a global cap-and-trade system. We find that on a global scale, offshore wind and solar photovoltaic energy will account for higher shares of electricity generation in both scenarios. However, at the regional level the outcomes may vary. For instance, in developing countries such as China and India, with the 2°C scenario, the growth of offshore wind and solar photovoltaic energy may be hampered by the accompanied global economic slowdown, which makes the future of these energy supply options less certain in these countries, especially without explicit targets for their deployments.</p>

壹、研究動機及目的

我國太陽光電產業鏈完善，已成功進軍國際市場，離岸風力也力朝國產化及加入國際供應鏈發展，可見再生能源技術產業之長期擴展需倚重國際市場，因此在研擬技術佈局或產業策略時，國際研究機構出版的能源展望報告或市場分析報告皆是重要的依據。由於降低溫室氣體排放量是趨動再生能源技術發展的重要原因，各國在研擬新/再生能源技術規畫時，International Energy Agency (IEA)、Energy Information Administration (EIA)、International Renewable Energy Agency (IRENA) 出版的能源技術展望報告、技術地圖或是Bloomberg New Energy Finance (BNEF) 等機構的市場分析報告不致以減碳為願景，並透過量化工具，針對可能對技術進程有重要影響之減碳情境進行模擬，進而推估不同情境下各種技術之市場需求。

但由於國際報告情境設計不一定能即時與決策者關心之重要時事貼近，例如氣候變遷研究倡議更積極之減碳目標、美國退出巴黎協議、美中貿易戰等，或者國際機構著重較極端的能源轉型願景，例如IRENA (2019) 出版之Global energy transformation (GET): A roadmap to 2050報告提出再生能源發電比例高達80%之再生能源地圖(Roadmap for a renewable energy future, REmap) 情境、BNEF(2019) 出版之New Energy Outlook，提出之煤電除役 (coal-phase-out) 情境，這些極端情境通常還有很大的不確定性，國際報告出版之頻率或聚焦之技術，也可能和我國發展中之重點技術存在落差，例如IEA每年多僅對1項技術出版技術地圖報告，我國太陽能產業急迫需要的太陽光電技術地圖僅在2010及2014出版，至今亦未有新版，離岸風力之市場分析也多集中在歐洲市場。

上述國際報告除了預設的情境有不同外，更大的差異是各報告假設的減碳方式有很大的差異，如擴大再生能源、提升能源效率、電力化之程度、及課碳稅等，此類量化分析所採用之模型通常很複雜，涉及相當多的參數及未來趨勢假設，因此很難直接比較，通常可將不同報告之結果視為可能的市場規模區間參考。不過IEA 出版之WEO、ETP報告，或IRENA出版之GET 報告，主要依賴外生的技術進步來達到減碳目標 (不需額外成本之進步)，雖然有著不同程度的外生碳稅假設，在較積極的減碳情境下似乎對經濟也沒有明顯的衝擊，很可能高估了以碳稅為主要減量工具下之市場規模。當這些國際報告聚焦之情境、技術或減碳工具和本土需求有落差時便無法自主分析，因此國內需要與國際報告互補之量化分析工具。

EPPA-Taiwan 為核研所與美國麻省理工學院全球變遷中心 (The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change) 合作開發之全球可計算一般均衡 (computable general equilibrium, CGE) 模型: Economic Projection and Policy Analysis (EPPA) –Taiwan，具有細緻的能源部門，適合分析不同情境下之技術市場。由於碳價通常被視為成本最小之工具，如IPCC

(2014); Chen et al. (2016) · 因此本研究以全球碳價為工具，以達成更積極的減碳目標，考量各國貿易、產業互動下帶來之經濟衝擊影響，和前述國際報告相較，應可作為較保守的推估參考依據。

本文第二節將回顧主要國際相關報告之情境及減量途徑假設；第三節為本研究採用之EPPA-Taiwan模型、情境及重要參數說明；第四節為模擬結果分析；最後第五節為結論。

貳、文獻回顧

2.1 採用 CGE 分析之相關文獻回顧

國內CGE分析能源、減碳議題之文獻不甚多，且多採用單國模型分析台灣本土之政策，如李秉正(2000)、Lin et al. (2009)、Lin et al. (2012) 及Chen (2013) 等人之研究，優點為對產業部門有相當詳盡的刻畫及模擬，不過卻可能忽略國際貿易之互動，由於減碳政策是全球性的行動，對產業的進出口需求都有很大的影響，台灣屬於小型經濟體，不但對貿易的依存度高，更深度依賴進口能源，因此採用全球模型的價值在於可探討全球減量政策下，全球需求改變、全球能源價格改變等對我國之複合影響。國際上則不乏以CGE方法分析全球減碳議題之文獻，不過CGE模型多著重於探討碳價對經濟、產業之影響，雖會關注再生能源的變化，但顯少揭示對各別再生能源技術需求之影響。MIT 全球變遷中心每1~2年出版的Outlook (Reilly, 2016; Reilly, 2018)，採用之EPPA模型對能源相關技術有相對詳細的描述，不過其公開報告之論述重點並不在各別的再生能源技術市場展望。

探討再生能源技術市場之文獻通常對能源相關技術有詳細的刻畫，因此許多國際報告中多採用工程模型作為分析工具，如IEA出版的World Energy Outlook (WEO) 及Energy Technology Perspectives (ETP) 等報告，優點在於對各技術有詳細的描述，但工程模型多忽略經濟體之產業互動及貿易效果，例如常見GDP為外生給定之假設，特別是上述報告情境中也多有碳價機制或碳稅假設，但顯少討論其對經濟面之影響，因此可能忽略了減碳措施下，經濟受到負面衝擊對再生能源市場成長造成的減緩效果。以下將就國內外常引用之再生能源技術展望報告進行詳述比較。

2.2 全球再生能源市場展望之相關國際報告回顧

有關全球再生能源成長或市場相關的國際報告，不乏以減緩氣候變遷及減碳為背景，不過不同報告預設達到的減量目標略有不同，更大的差異是不同報告假設達到減碳的方式，有很大的差異 (如擴大再生能源、提升能源效率、電力化之程度、及課碳稅等)，而此類量化分

析所採用之模型通常很複雜，經常涉及相當多的參數及未來趨勢假設，因此很難直接比較。最廣被提及的包含IEA定期出版的WEO及ETP，另外還有IRENA出版的GET，以下將概述其情境對應之減量目標，以及達減量目的之方法假設，以便掌握本研究與這些報告結果比較時之主要差異來源。

WEO 2017 (IEA 2017a) 包含3種情境: Current Policy Scenario (CPS)、New Policy Scenario (NPS) 及Sustainable Development Scenario (SDS，即過去版本的450情境)。CPS考量了各國的再生能源目標，NPS 則進一步考量各國達到其NDC承諾之減碳目標，SDS則對所有區域假設有強力的政策推動運輸電力化，增加再生能源、核能及碳捕獲及封存技術(Carbon capture and storage, CCS)之使用、提升能效標準等。另外各情境中分別有不同程度的碳稅(外生碳稅)假設，如表1。

表1：IEA-WEO 2017 報告各情境下之碳價

			(2016 美元/噸)	
	區域	部門	2025	2050
現有政策情境(CPS)	加拿大	電力、工業、航空	15	31
	歐盟	電力、工業、航空	22	40
	韓國	電力、工業	22	40
新政策情境(NPS)	南非	電力、工業	10	24
	中國	電力、工業、航空	17	35
	加拿大	所有部門	25	45
	歐盟	電力、工業、航空	25	48
	韓國	電力、工業	25	48
永續發展情境(SDS)	巴西、中國、俄國、南非	電力、工業、航空*	43	125
	所有已開發經濟體	電力、工業、航空*	63	140

註: (1)碳價單位為 2016 美元/噸 (2) *永續發展情境中航空部門之 CO₂ 價格僅限於新政策情境下也有採行的區域
資料來源：IEA (2017b)

此外IEA每二年出版之ETP報告，則分為Reference Technology Scenario (RTS)、2°C Scenario (2DS)、Beyond 2°C Scenario (B2DS) 三種情境，ETP 2017 (IEA 2017b) 報告中RTS情境已假設各國達到NDC，即接近WEO 之NPS情境¹；2DS則接近WEO 之SDS情境 (或450情境)，最後B2DS 則是搭配高碳稅 (2060年碳稅450美元/公噸)，使2060年排碳量趨近於零之更積極減量情境。

¹ ETP 2017的RTS情境有別於往年ETP 2015的6°C (6DS)，亦有別於WEO的CPS情境。

IRENA每年出版的GET報告包含Reference case (假設達成NDC) 及REmap 二大情境。Reference case 便已考量現有之能源政策以及達成NDC，假設外生碳價與WEO 報告NPS情境碳價相同；REmap 情境則假設低碳能源技術及能源效率有大幅進展，此情境下2050年再生能源占總能源消費的比例高達62%，電力化程度為45%，其中再生能源發電占84%，與其它國際報告，REmap 屬於再生能源占比相當高的情境 (參見附圖A.1)，此情境假設外生碳價與WEO 報告SDS 情境碳價相同，2025年最高為63 美元/公噸，2040年為140 美元/公噸。表2為Nordhaus (2010) 以RICE全球模型研究欲保持溫升小於2°C之模擬結果，2025年內生求解所得之碳價約為142美元/公噸，2055年碳價約為522美元/公噸，高於 WEO 2017或GET 2019報告假設之碳稅。

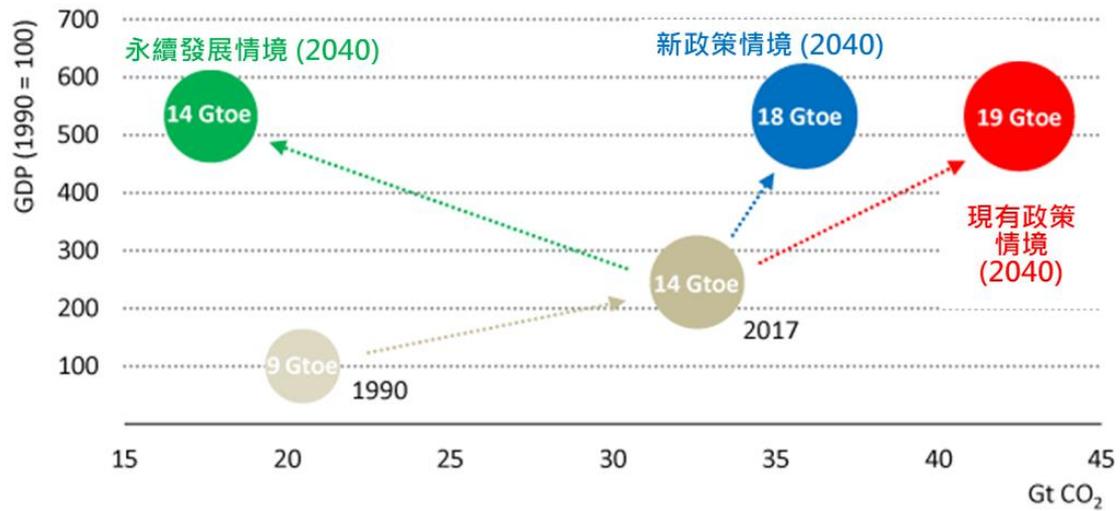
表2：Nordhaus (2010) 分析各情境下之碳價

	(2005 美元/噸)						
	2005	2010	2015	2020	2025	2055	2105
最適目標	0	29	38	50	66	156	408
全球溫升低於 2°C 目標	0	59	79	106	142	522	904
哥本哈根目標:所有區域施行碳價機制	0	0	0	2	6	358	593
哥本哈根目標:僅富裕區域施行碳價機制	0	0	0	2	12	64	28

註: ton of carbon (tC) 在其研究中指每公噸二氧化碳，碳價指達到政策目標所需之市場價格。

資料來源：Nordhaus (2010) 。

由前述可知，WEO、ETP或 GET報告皆假設需要有碳稅或碳價機制才能達成NDC或更積極的減碳目標，但在較積極的減碳情境下似乎也未造成經濟衝擊，如WEO減碳情境下顯少有經濟衝擊之現象，三種情境之GDP外生假設是相同的 (參見圖1)；GET 報告裡REmap 情境反而相較Reference case之GDP 年成長率高2.54%；ETP在不同情境中外生之GDP成長率皆相同，即便是B2DS情境下之碳稅高達450美元/公噸。可能之原因在於 WEO或ETP報告中對技術進步並未假設額外成本，GET 報告中的REmap 情境則假設能源產業部門投資大幅增加，50%來自新增投資，50%來自其它產業部門減少投資 (排擠效果)，(Garcia-Casals et al., 2019)。簡言之，自發性效率提升，以及能源產業部門資本快速增加，所需要的碳稅或碳價較低外，碳稅或碳價的經濟衝擊也較低，其可能影響為電力的使用不會因為在減碳情境下的經濟負面衝擊而明顯的降低，對再生能源的需求推估可能較為樂觀。



註: Gtoe 係指能源消費量為十億噸油當量; GtCO₂為十億噸CO₂。

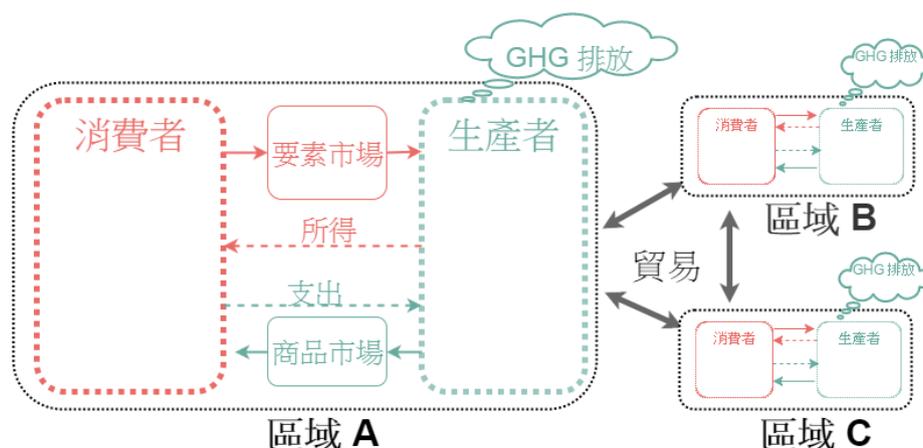
資料來源：IEA (2018)。

圖 1：IEA(2018) WEO 報告各情境下之 GDP 及能源相關之 CO₂ 排放量

參、研究方法及模擬情境說明

3.1 分析工具說明

MIT EPPA模型由美國麻省理工學院全球變遷中心所獨家開發，目前已執行美國能源部 (Department of Energy, DOE)、環保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 等單位的多項研究計畫，為評估全球氣候變遷與溫室氣體減量具公信力之重要政策模擬工具。本研究團隊與MIT共同合作開發的EPPA-Taiwan模型為國內少數建構用以處理能源經濟議題之動態全球CGE模型，有別於工程模型，跨國CGE模型考量了區域及產業間之互動 (示意圖如圖2)，因此可同時納入國際政策與國內政策的互動影響效果，透過跨國貿易、細緻化發電結構與國際減碳政策連動的情境設計，可更完整模擬區域間國際能源、經濟衝擊與各國減碳政策對我國再生能源技術發展及產業國際市場分佈之影響。



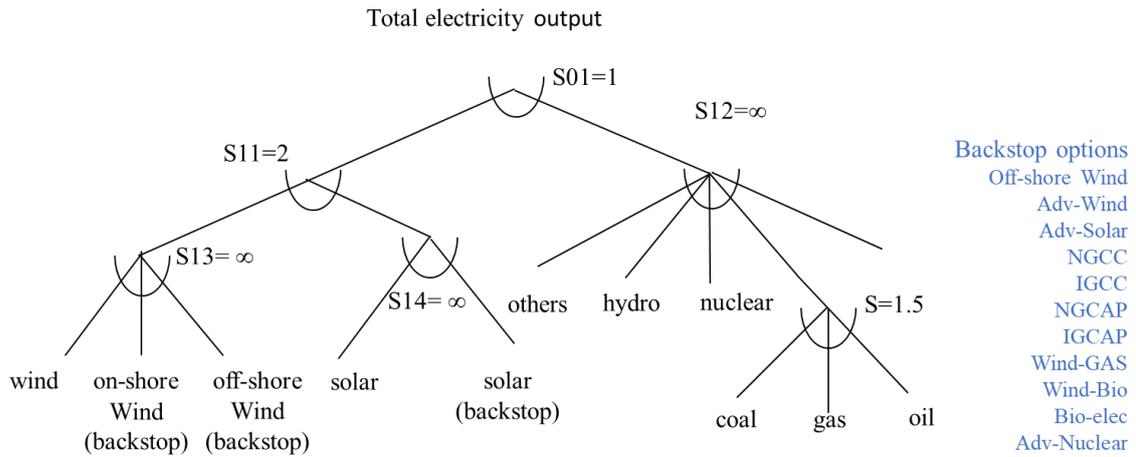
資料來源：柴蕙質與洪瑋嶸 (2017)。

圖 2：EPPA-Taiwan 示意圖

EPPA-Taiwan為一動態CGE模型，採用遞迴動態(recursive-dynamic)方式求解，即假設經濟體系中的各部門沒有前瞻(forward-looking)之行為，每5年為一期獨立求解。其中總要素生產力成長 (factor-augmented productivity growth) 來自BAU下之外生GDP，勞動成長隨人口而成長、自發性能源效率進步 (autonomous energy efficiency improvement, AEEI)、自然資源耗損等為外生，投資具有延展性，即會隨時間累積成長，而政府部門則扮演中立角色，稅收將全數回歸給家計部門的消費者。各部門之巢式結構設計及替代彈性設定大致與MIT EPPA6相同(可參考Chai et al.,2019))，台灣部分則略有調整，以使電力彈性在歷史值範圍左右(約0.5)。其中電力部門細分為油煤氣三種化石燃料發電、及核能、水力、風力及太陽能等，另外設計10種以上目前成本較高，但未來因碳價等政策可能具成本競爭力之低碳技術選項，圖3即表示各種電力技術間之替代關係，圓弧旁之數值為替代彈性參數。

3.2 重要參數說明

EPPA-Taiwan總要素生產力成長 (factor-augmented productivity growth) 來自BAU下之外生GDP，EPPA-Taiwan與MIT EPPA模型一致，台灣以外之區域採用IMF預測，台灣採INER-GEMEET模型推估，約2% (參見表3)。勞動成長隨人口成長外生成長，台灣以外之區域採用聯合國 (United Nations,UN)之預測、台灣採用國發會人口中推計(參見表4)。另MIT EPPA模型之自發性能源效率進步 (autonomous energy efficiency improvement, AEEI) 在各部門設定為1%，電力部門較低為0.3%。



資料來源：柴蕙質與洪瑋嶸 (2017) 。

圖 3：EPPA-Taiwan 電力部門示意圖

表3：GDP成長趨勢假設

	2015-2025	2025-2040	2015-2040				
			歐盟	美國	中國	印度	其它亞洲國家
IMF	2.8%	2.6%	1.6%	2.3%	5.1%	5.6%	3.4%
IEA WEO2017	3.7%	3.3%	1.8%	2.0%	4.4%	6.5%	4.5%
World bank	2.8%	-	1.8%	2.1%	6.4%	7.3%	5.4%

註:(1)EPPA台灣以外之區域採用IMF預測 (2) 台灣採INER-GEMEET :約2 % (3) World bank 以印尼為其它亞洲國家之代表。

表4：人口成長趨勢假設

短期	中國	印度	台灣	美國	歐盟	全球
IMF (2015-2024)	0.26%	1.18%	0.13%	0.61%	0.18%	0.99%
UN (2015-2025)	0.27%	0.95%	0.07%	0.64%	0.10%	0.94%
WEO (2017-2025)	0.30%	1.00%		0.70%	0.10%	1.00%
長期						
UN (2015-2050)	-0.06%	0.66%	-0.31%	0.55%	-0.01%	0.78%
WEO (2017-2040)	0.00%	0.80%		0.60%	0.00%	0.90%

註:EPPA台灣以外之區域採用UN預測; 台灣採用國發會人口中推計

3.3 情境設定說明

因此本研究分析時，除了考量在國際上實現可能性高的NDC情境外，也考量了更積極的2°C (2DC) 減碳情境，詳如表5。其中NDC情境下各區域之減量額度參考Jacoby et al. (2017)，減量工具主要以碳價為主，各國所需之碳價皆由內生決定，將因NDC承諾之目標不同而有差異。2DC情境則依據IPCC提供2100年前2°C情境的碳預算，線性分配逐年全球可排放的排碳總額，由於碳價通常被視為成本最小之工具，如IPCC (2014); Chen et al. (2016)，此全球碳價假設之依據為世界銀行所提出的「串連碳市場」(Networked Carbon Markets, NCM) 以及「碳市場俱樂部」(CMC system and services) 等倡議，期望透過發展出一套標準化的碳市場制度，並讓全球各地之排放交易體系的參與者熟悉，長期邁向一全球性的交易制度。根據Global Carbon Pricing: The Path to Climate Cooperation (Cramton et al., 2017) 專書中多位學者之研究，認為現有的京都議定書或巴黎協議，採用承諾及檢視 (pledge-and-review) 的方式，不足以使大部分的國家落實減量，因此改變機制，才有機會減緩氣候變遷。

表5：情境設定說明

情境	內容說明	附註
參考情境	無減量目標 (碳價為零)，但依據WEO 2017 CPS設定再生能源目標。	相當於6 °C情境，接近WEO2017 CPS情境
NDC	各區域2030前排碳目標與其NDC目標相同(逐年平均分攤排碳額度)，假設2030年後各區域排碳量仍遵循2030年的NDC目標，以碳價為政策來達成目標，而台灣設定則與NDC及溫管法情境相同；另外依據WEO 2017 NPS設定再生能源目標。	約相當於3°C情境接近WEO2017 NPS 情境，ETP2017 RTS 情境
2DC (即2°C情境)	依據IPCC提供2100年前2°C情境的碳預算，線性分配逐年全球可排放的排碳總額，並參考文獻 ¹ 的作法-以全球一致之碳價決定各區域的碳排分配，達成全球減碳目標。另外依據WEO 2017 SDS設定再生能源目標。	接近WEO2017 SDS 情境，ETP2017 2DS 情境

註1：包含UN(2018) 與 Sokolov et al. (2015)。

理論方面，Nordhaus在該專書內容中，所倡議的carbon club，即是一以會員方式達到減量的共同協議，對於非會員國或地區，必需設定罰則，即課關稅，碳價和關稅相互搭配，實現全球碳定價之機制。Landry et al. (2019) 之研究亦曾以巴黎協議各國減碳進度嚴重落後，而在短時間內改採全球碳價之情境進行分析。為避免現行自願減量仍有搭便車問題(free rider)，或

是要達成比2度C更積極的目標，必須有更強的遊戲規則來改變現狀，全球碳價是目前文獻中常見的情境設定，而台灣是依賴貿易之小型經濟體，因此在此情境下也接受此政策之規範。故本研究仍以全球一致的內生碳價為工具決定各區域的碳排分配，達成更積極的2°C全球減碳目標，因此2DC情境下有些國家的減量幅度遠大於NDC情境下的承諾幅度，各國的減量幅度也不一定相較NDC等比例加重，2DC情境下各年之全球排碳總額限制如附圖A.2所示。

肆、初步模擬結果及市場分析

4.1 各情境下之排放量

圖4為各情境下2030年及2050年之排碳量推估，BAU下，中國仍是排碳大國，美國、印度次之；NDC情境下，由於中國之NDC承諾方式為2030年之排碳密集度 (CO₂/GDP) 較2005減少60~65%，因此當中國GDP仍維持5%高度成長情況下，排碳量仍占大宗，但相較BAU，中國之排碳量並未顯著減少，2030年之排碳量仍維持在15,000百萬噸左右，根據國際非政府組織氣候行動追蹤器(Climate Action Tracker)之研究(附圖A.3) 也顯示，在中國維持目前政策下，2030年之排碳量可能已接近NDC承諾之目標，但離維持溫升2°C之區間仍有不足，除中國外，還有許多國家承諾之減量亦不足以達到2°C之目標²，因此本研究以全球一致之碳價決定各區域的碳排分配，此時中國、印度及非洲都要擔負較NDC多相當多的減碳責任，2030年碳預算僅NDC之5成左右 (2050年則更低，碳預算僅有NDC下之1~2成)，因此這三個區域在2DC情境所需的碳價也較NDC高出許多，進而會對這些國家甚至全球之經濟有較大之衝擊。

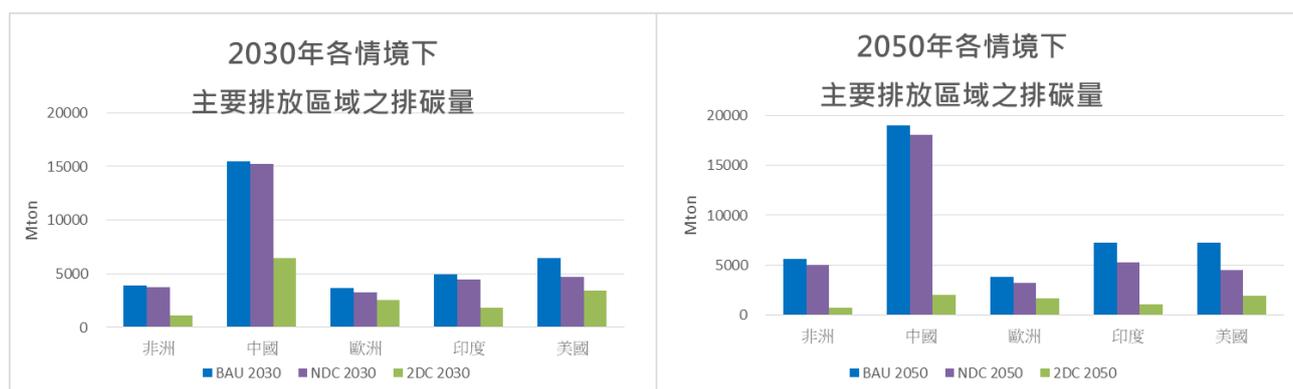


圖 4：減碳情境下主要排放區域之排碳量

² Climate Action Tracker 網站: <https://climateactiontracker.org/countries/>

圖5為EPPA-Taiwan 模擬NDC及2°C 之碳價。NDC下，2030年前假設各國達成NDC承諾，2030年後各區域排碳量仍遵循2030年的NDC目標，碳價較高的為美國，2030年約30美元/公噸，2050年接近78美元/公噸。非洲和歐洲也很低，此外，中國欲達到NDC目標，並不需要額外碳價，非洲和印度也有類似的現象。2DC情境下，本研究依據IPCC提供2DC情境的碳預算，線性分配逐年全球可排放的排碳總額，並以全球一致之內生碳價決定各區域的碳排分配，以達成全球減碳目標，碳價在2030年約在50 美元/公噸左右，2050年需提高到600美元/公噸，Nordhaus (2010) 透過RICE模型，研究欲溫升小於2°C，2025年碳價為142美元/公噸，2055年碳價為522 美元/公噸。

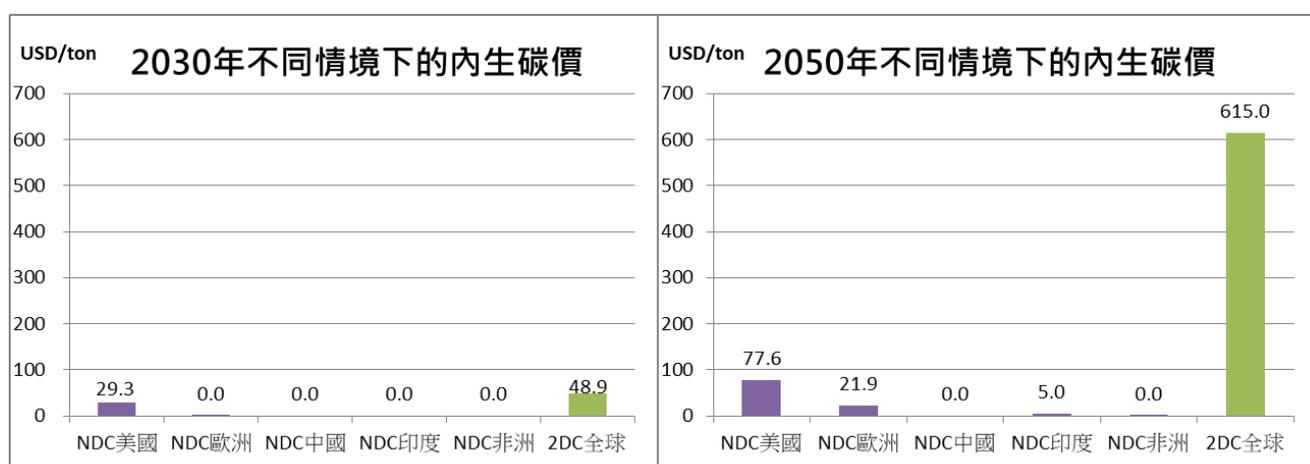
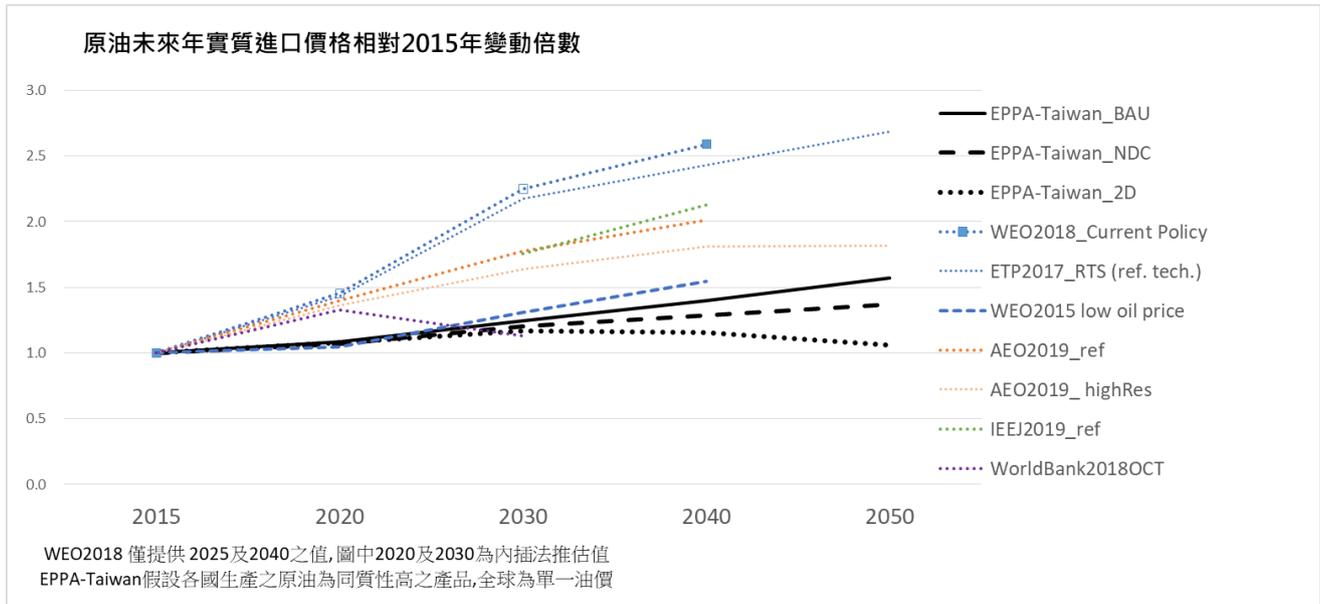


圖 5：各情境下之內生碳價

4.2 各情境下之原油價格

由於台灣進口能源占98%，能源價格主要由國際市場之供需決定，國內相關研究多直接採用國際報告之二手資訊作為依據。而EPPA-Taiwan 模型之能源價格為內生，藉此可了解不同情境下之能源價格。首先先檢視BAU下的原油價格長期推測（如圖6之實質價格指數），相較其它國際報告，不難發現國際報告中BAU 下（如WEO current policy, AEO ref case）之能源價格相當分歧，EPPA-Taiwan BAU下之價格則相對較低，主要原因來自於對印度及其它亞洲國家之人口假設較保守，經濟成長也較保守。另外EPPA-Taiwan也假設各國生產之原油同質性高，可自由流通，因此接近國際報告中油氣資源持續穩定供應情境下之價格，短期貼近WEO 2015 low oil price，2050年則接近 AEO ref case)。隨著減量目標變得嚴格，對全球整體的經濟衝擊加大，因此油價也愈低，2050年NDC情境較BAU低13%，減碳目標更嚴格之2DC情境較BAU低32%。



資料來源：IEA, EIA, IEEJ, World bank；本研究繪製。

圖 6：國際能源價格趨勢推估 (原油)

4.3 各情境下太陽光電全球趨勢及國際市場分佈

各情境下太陽光電全球發電量都將迅速成長，不同情境下之全球之成長率略有不同 (如圖 7)，每年複合成長率在 BAU 下為 6%，NDC 情境為 6.7%，2DC 則有 7%。本研究依據 WEO2017 之推估，設定各情境下太陽光電及離岸風電在各區域本身的發電占比 (附圖 A.4 及 A.5)，BAU 下印度便由 2015 年的 0.4% 成長至 12% 最多，2030 年便超過 10% 也最為積極，其它區域之太陽光電發電占比大約僅提升至 5% 左右。在各國達成 NDC 承諾的情境下，仍以印度太陽光電占比最高，非洲和中國發電占比成長速度相近，歐美長期占比仍在 10% 以下。而在 2°C 的情境下，非洲、印度將大幅採用太陽光電取代傳統能源發電，2030 年都達 20% 左右，長期更接近或超過 30%。

由發電占比可看出太陽光電技術在該區域電力技術之重要性，但較無法直覺地比較市場規模大小，因此本研究也從總發電量來探討各市場在全球之重要性，此外也同時列出其它國際報告之推估作為參考。圖 8 比較本研究與 IEA 及 IRENA 報告 2040 年³各情境下之太陽光電總發電量，EPPA-Taiwan BAU 下的全球太陽能總發電與 WEO 2017 CPS 下的總發電量很接近。

³ WEO 207 推估各情境之 2040 年，故以 2040 年作為與國際報告之比較基準。

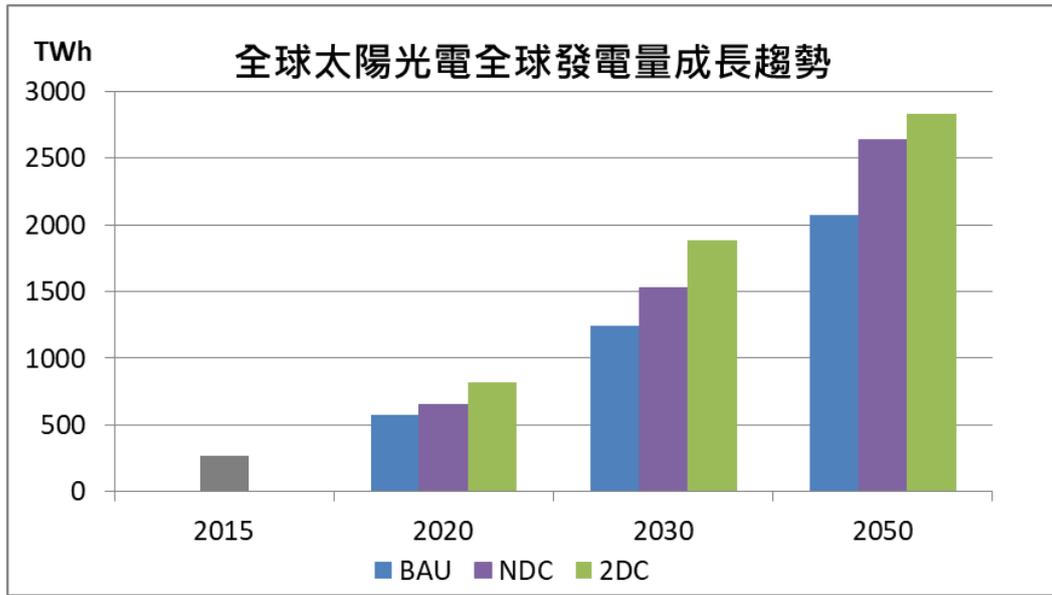


圖 7：太陽光電全球發電量成長趨勢

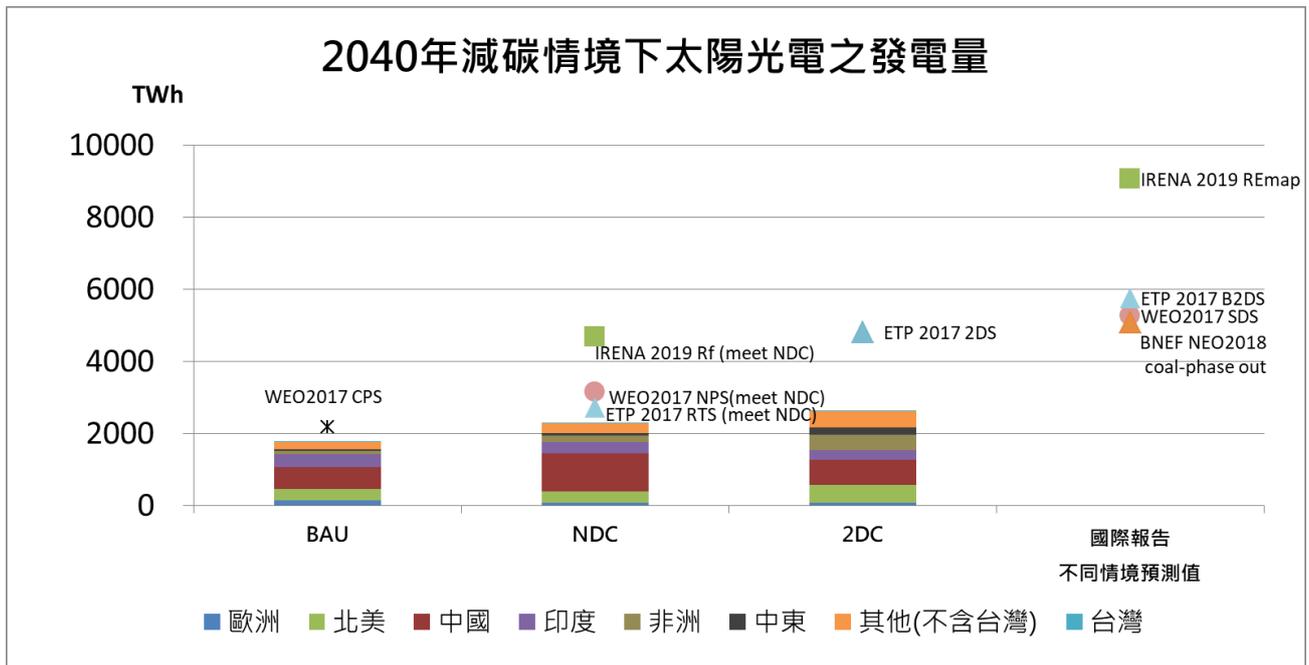


圖 8：太陽光電發電量與其它報告比較

NDC下貼近ETP2017 RTS情境，略低於WEO 2017 NPS情境，而IRENA2019 GET 報告之 reference case則更加樂觀。而在2DC情境中，EPPA-Taiwan以全球均一之碳價達到全球之減碳目標，因為中、印減碳的邊際成本相對其它國家低，減碳責任將主要落在這些國家身上，且

高額的碳價，將使中國和印度等新興市場經濟嚴重受到衝擊，即便太陽光電的占比較NDC提升，但因為總發電量大減，太陽光電的發電量未見增加。如前所述，IEA及IRENA報告中多假設以額外新增的投資、技術大幅進步等方式達成減碳目標，需搭配之碳稅相對本研究低許多，是全球太陽光電市場發電量較本研究樂觀許多的主要原因。但若以圖9來看，本研究2DC情境下全球太陽能總發電量各區域占比與WEO 2017 SDS情境差異不大，顯示不論在何種報告或何種情境下，中國之太陽光電仍是全球占比最大的市場，北美和非洲市場隨著減碳越趨積極，在太陽光電市場的重要性便逐漸浮現，在2°C情境下之成長則會較中國及印度更為明顯。

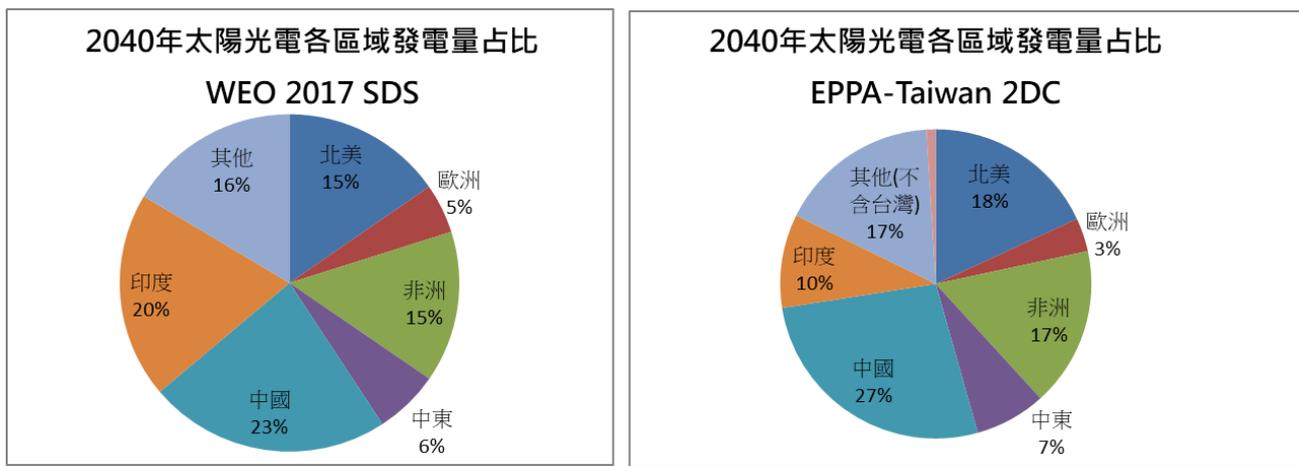


圖 9：太陽光電各區域發電量與 WEO 報告比較

4.4 各情境下離岸風電全球趨勢及國際市場分佈

因為離岸風電的成本較高，所以在BAU情境下，年複合成長率只有1.3%，但在減碳壓力下，離岸風電的全球發電量才能迅速成長，在NDC情境及2°C情境下，每年將分別以6.9%及8.3%的複合成長率成長（如圖10）。不同情境下各區域離岸風電於該區域發電占比成長趨勢詳如附圖A.4，在BAU下只有歐洲離岸風電因產業成熟，未來在歐洲發電占比穩定在1.4%左右（其陸域風力占比2015已超過10%），其它區域幾乎是零。各國達成NDC的情境下，也僅有歐洲強力的政策驅使下，離岸風電才能迅速發展，其它區域仍低在1%以內。而在2DC情境下，中國、美國及印度等排碳大國，也將運用離岸風電來達到較嚴格的減碳目標因此有較明顯的成長，但因為這些國家屬於大陸型國家，陸域風力發展成本遠低於離岸風力，因此歐洲以外國家之離岸風力占總發電比重在5%以內。

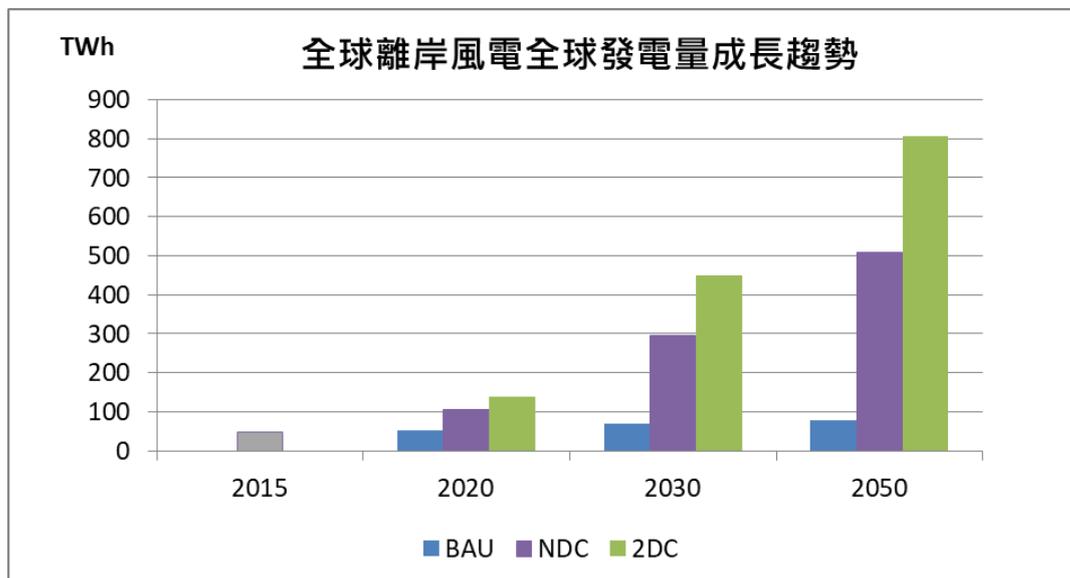


圖 10：離岸風電全球發電量成長趨勢

由圖11的總發電量來看市場規模，本研究在BAU情境下離岸風電的發電量與WEO2017 CPS情境相近。NDC情境下之離岸風電全球發電量與IRENA2019 GET報告之 reference case很接近，並介於ETP2017 RTS 情境及WEO2017 NPS 情境 (IEA 2017c) 之間，主要貢獻來自再生能源目標明確的歐洲及中國。2DC情境的全球離岸風電市場發電量更加明顯成長，浮現之市場為北美及其它亞太地區。如前所述，因為本研究透過統一碳價來達成減碳，越嚴格的減碳情境，碳價越高，進而造成能源使用效率提高及能源需求降低，再加上經濟嚴重受到衝擊，總發電量減少，故離岸風電的發電量也較ETP 2017 2DS報告略低。不過若比較EPPA-Taiwan 2DC情境與WEO 2017 SDS情境下2040年各地區的離岸風力占比 (如圖12)，可發現中國和歐洲仍是最大的市場，北美及其它亞太也應是重要之市場。換言之，短期內若產業要進行技術佈局，應先以歐洲及中國為主，當國際倡議之減碳目標越趨嚴格，市場成長之動力將來自北美及其他亞太地區。

4.5 對高度依賴能源進口國之經濟衝擊及電力需求影響：以台灣為例

如前所述，本研究2DC情境乃依據IPCC提供2100年前2°C情境的碳預算，線性分配逐年全球可排放的排碳總額，由於碳價通常被視為成本最小之工具，故以全球一致的內生碳價為工具決定各區域的碳排分配，而非依據NDC之承諾幅度等比例加重來達成更積極的2°C全球

減碳目標，因此2DC情境下有些國家的減量幅度遠大於NDC情境下的承諾幅度，因此也有些國家的減量幅度反而較NDC來得低，台灣即是一例。

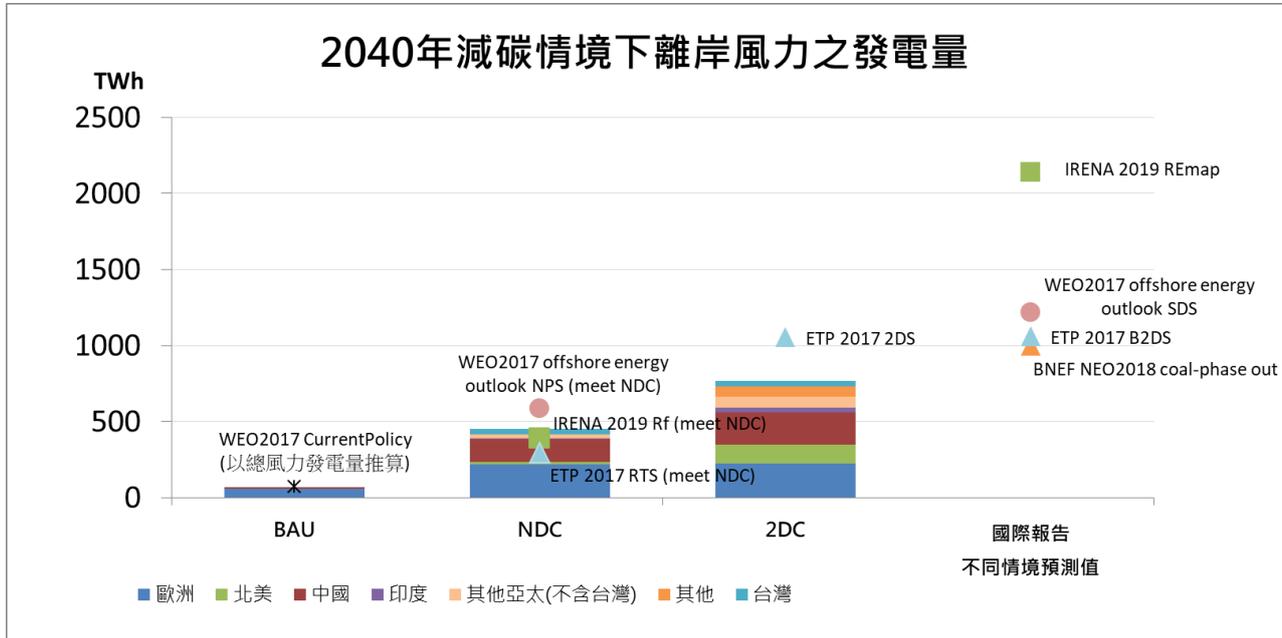


圖 11：離岸風電發電量與其它報告比較

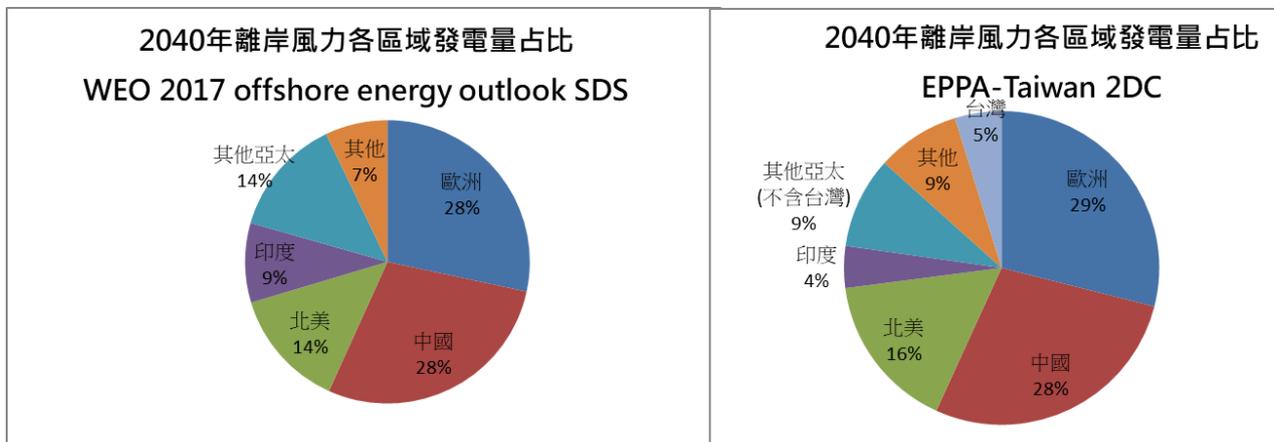


圖 12：離岸風電各區域發電量與 WEO 報告比較

由圖13可看出2DC情境下，以全球單一碳價求解各國/區域之減碳幅度，台灣2030年之減碳幅度較NDC來得少，但2050年則與NDC相近；從碳價也可看出，NDC情境下2030年台灣要達成減碳目標所需的碳價，比2DC全球單一碳價來得高出一倍，2050年則二個情境下都面臨很高的碳價。

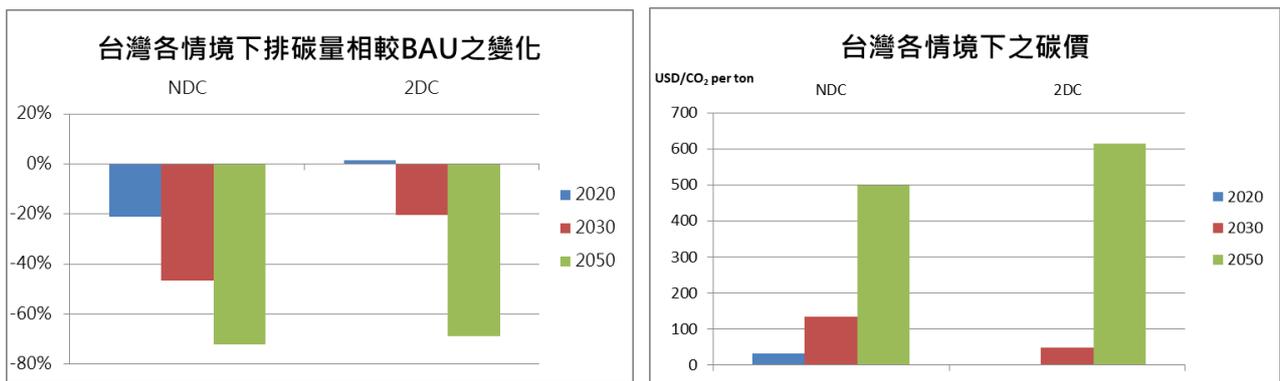


圖 13：台灣之碳排放量及碳價

而GDP的變化也值得注意，2DC情境下，2030年全球減量幅度目標是34%，因為台灣的減碳幅度相較許多國家低，約20%，因此2DC情境下在2030年的GDP相較BAU反而是正向變化的，而2050年全球減量幅度目標是75%，台灣之減量幅度也增加了，因此2050年才有較明顯的負面衝擊，但負面衝擊仍較NDC情境來得輕一些 (圖14)。其原因來自於台灣是能源進口國，且台灣製造業的碳排放密集度相較許多國家來得低，(如Chai et al., 2019研究中的圖D4)。因此2DC情境下，國際較大的製造業出口國，如中國和印度，相較NDC面臨極高的減碳責任時，出口競爭力明顯下降，此時台灣的出口將取代上述出口大國，對GDP形成正向貢獻，使得台灣在2DC下的經濟衝擊小於NDC。不過2050年的全球高碳價，服務業也受到很大衝擊，上述製造業出口正面效果也被抵消，GDP和用電量都減少很多，2DC情境下，全球經濟受衝擊，我國電力彈性係數 (以電力消費年成長率除以GDP年成長率) 則出現負彈性之狀況，即類似2008金融風暴期間，GDP小幅正成長，但用電消費量負成長(圖15)。

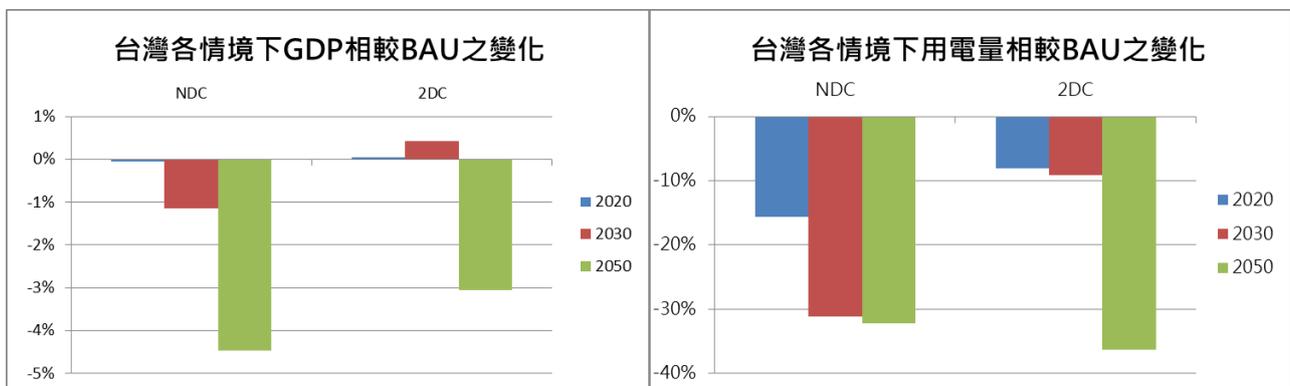


圖 14：台灣之 GDP 及用電量變化

藉此分析便可推知，2DC情境下，當減碳機制不同、各國之減碳責任改變，減碳技術若沒有太大的變化（如成本快速降低、設施快速建置完成等），在短時間內對各國的用電需求會有相當的衝擊，再生能源之發展也可能受到拖累而減緩，因此以經濟模型更可深究各別經濟體受到的影響及再生能源技術的市場潛力。

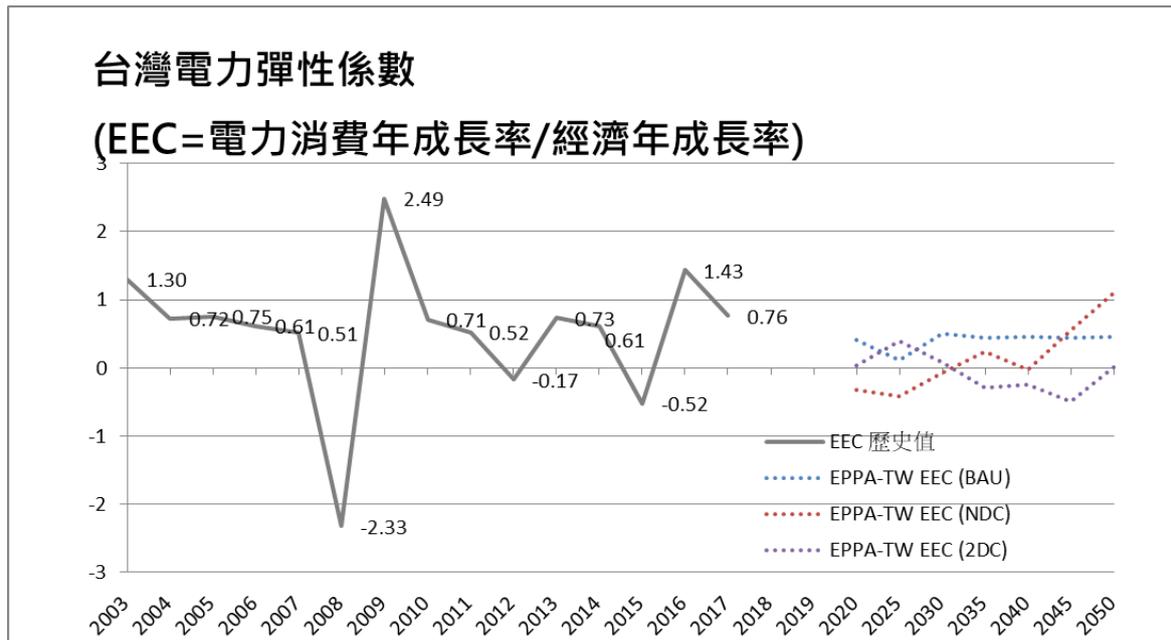


圖 15：台灣之電力消費彈性變化

伍、結論

我國再生能源產業之長期擴展需倚重國際市場，因此在研擬技術佈局或產業策略時，國際研究機構出版的能源展望報告或市場分析報告皆是重要的依據。由於降低溫室氣體排放量與新/再生能源技術發展進程有極大的關係，如NDC、2°C或更積極的減碳願景都將影響再生能源技術之市場成長及分佈。本研究發現許多國內普遍參採之國際報告，如IEA 出版之WEO、ETP報告或IRENA出版之 GET 報告，主要假設透過自然之技術進步或是額外增加的能源技術投資來達到減碳目標，雖然有著不同程度的外生碳稅假設，但碳稅並不高，在較積極的減碳情境下似乎對經濟也沒有明顯的衝擊，因此對以碳稅為主要減量工具下之市場規模可能較為樂觀。

本研究以EPPA-Taiwan進行推估，BAU下的全球太陽能總發電量及離岸風電發電量與WEO2017 CPS下的總發電量相近。NDC 情境下太陽能總發電量貼近ETP2017 RTS情境，略低於WEO2017 NPS情境，離岸風電發電量貼近IRENA2019 GET下之 reference case，並介於ETP2019 RTS情境與WEO2017 NPS情境之間。

除了NDC情境外，本文依據IPCC提供2100年前2°C情境的碳預算，線性分配逐年全球可排放的排碳總額，並以全球一致之內生碳價決定各區域的碳排分配，達成全球減碳目標。碳價在2030年約在50美元/公噸左右，2040年近200美元/公噸，2050年需提高到600美元/公噸，短期略低於Nordhaus (2010) 透過RICE模型研究欲溫升小於2°C所得之碳價，長期則略高於其研究。本研究顯示在2°C情境下，全球太陽能及離岸風電總發電量都較NDC情境成長，發電占比也將提高，但與國際報告EPT2017比較，都比其2DS情境下的推估來得低，原因在於除了已知的再生能源規畫外 (根據WEO 設定再生能源占比目標)，本研究主要以碳價達到減量目標，對依賴全球貿易之國家，經濟衝擊會更明顯，因此2°C下之整體用電需求將下降。

根據本研究模擬結果來看，在可預期實現之NDC情境下，若要進行技術及市場佈局，中國和印度是太陽光電需求最大的市場，長期隨著減碳越趨積極，如以2°C為目標，北美和非洲市場的重要性便逐漸浮現，其成長性則會較易受全球經濟左右的中國及印度更為明顯。而離岸風電方面，仍先以歐洲及中國為主要市場，當國際倡議之減碳目標越趨嚴格，市場成長之動力將來自北美及其他亞太地區。

本研究已依國際報告對各地區不同發電技術設定不同成本參數，若未來太陽能及離岸風電之設備及運維成本可再進一步降低，便可以較低之碳價來抑制排碳能源之使用，2°C情境所需之碳價便可能減低，經濟衝擊減少，太陽能及離岸風電總發電量亦可能隨之增加而更趨近於其它國際預測。而本研究發展之量化分析工具可進行不同情境或技術之自主分析，除了與國際報告互補外，也可和國內智庫豐富的質化分析資訊相輔，提供技術研發單位及產業界在不同減碳路徑下之國際佈局資訊。

致謝及說明

感謝科技部提供本研究之計畫經費 (計畫編號MOST 108-3111-Y-042A-111)，謹此誌謝。惟文中論述不代表科技部及作者任職單位之立場，如有疏誤之處，當屬作者之責。

參考文獻

一、中文部分：

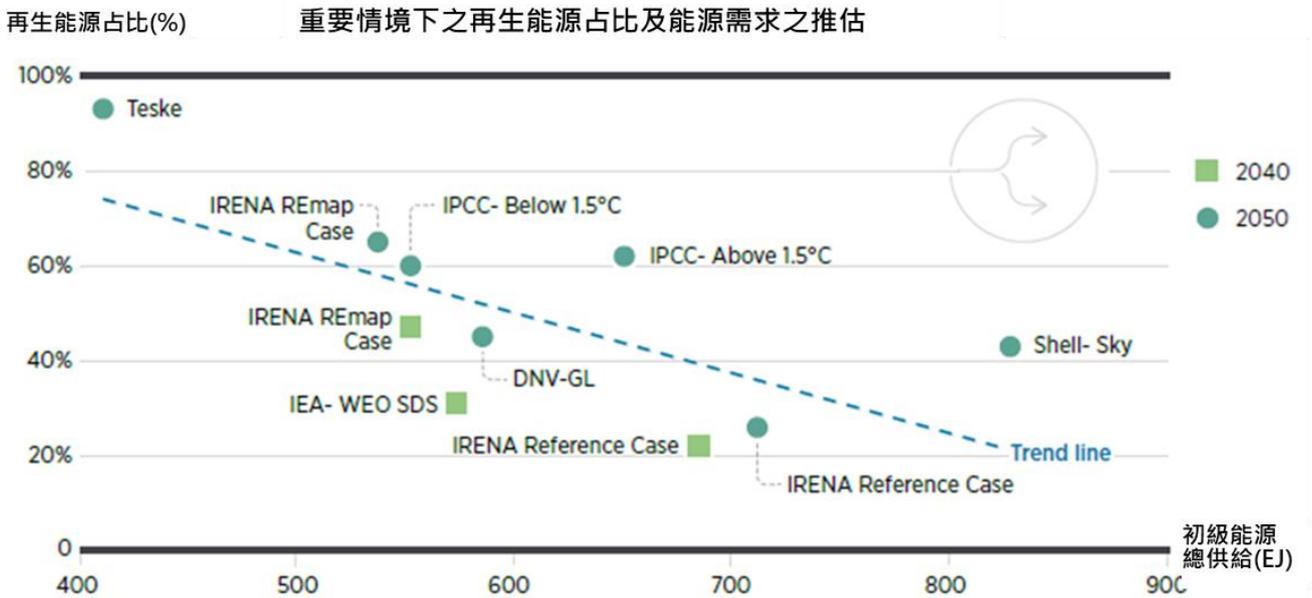
1. 李秉正 · 2000 · The economic impacts of global warming mitigation policy on the Taiwan economy. 農業與經濟 · 24 · 95–123。
2. 袁正達、洪瑋嶸 · 2017 · 「EPPA-Taiwan模型電力部門拆解與模擬」 · 核能研究所報告 · INER-14299。
3. 柴蕙質、洪瑋嶸 · 2017 · 「EPPA-Taiwan (靜態版) 模型說明手冊」 · 核能研究所報告 · INER-OM-2240。

二、英文部分：

1. Bloomberg New Energy Finance (2019), *New Energy Outlook 2019*, BloombergNEF, New York.
2. Chai, H.-C., W.-H. Hong, J.M. Reilly, S. Paltsev and Y.-H.H. Chen (2019), Will Greenhouse Gas Mitigation Policies Abroad affect the Domestic Economy? The Case of Taiwan. *Climate Change Economics*, online first (doi: 10.1142/S2010007819500179).
3. Chen, Y.-H.H. (2013). Non-nuclear, low-carbon, or both? The case of Taiwan. *Energy Economics*, 31, 53–65.
4. Chen, Y.-H.H., M. Babiker, S. Paltsev and J. Reilly (2016), *Costs of Climate Mitigation Policies*. MIT Joint Program Report 292.
5. Chen, Y.-H.H., S. Paltsev, J.M. Reilly, J.F. Morris and M.H. Babiker (2015), *The MIT EPPA6 Model: Economic Growth, Energy Use, and Food Consumption*. MIT Joint Program Report 278.
6. DNV GL (2018), *Energy Transition Outlook 2018: A global and regional forecast of the energy transition to 2050*, DNV GL, Oslo.
7. Garcí a-Casals, X., R. Ferroukhi, B. Parajuli (2019), Measuring the socio-economic footprint of the energy transition Energy, *Energy Transitions*, 3, 105-118.
8. International Energy Agency (2017a), *Energy Technology Perspectives*, OECD/IEA, Paris.
9. International Energy Agency (2017b), *World Energy Outlook 2017*, OECD/IEA, Paris.
10. International Energy Agency (2018), *World Energy Outlook 2018*, OECD/IEA, Paris.
11. International Energy Agency (2017c), *Special Report: Offshore Energy Outlook*, OECD/IEA, Paris.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report*, IPCC, Geneva.
13. Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), *Global Warming of 1.5°C*. IPCC, Geneva.
14. International Renewable Energy Agency (2019), *Global Energy Transformation: A roadmap to 2050*, IRENA, Abu Dhabi.

15. Jacoby, H.D., Chen, Y.-H., Flannery, B.P. (2017), Informing transparency in the Paris Agreement: the role of economic models, *Climate Policy*, 17(7), 873-890.
16. Landry, E., C.A. Schlosser, Y.-H.H. Chen, J. Reilly and A. Sokolov (2019), *MIT Scenarios for Assessing Climate-Related Financial Risk*, MIT Joint Program Report 339.
17. Lin, S-M, J-C Feng and F-K Ko (2012), Assessing Taiwan's energy security under climate change. *Natural Hazards*, 62(1), 3–15.
18. Lin, S-M, J-X Lin, H-P Su, F-K Ko and L-R Lu (2009), The potential of renewable energy and energy efficiency improvement in reducing CO₂ emissions in Taiwan, *International Journal of Global Energy*, 32, 119–138
19. Cramton, P., MacKay, D.J., Ockenfels, A., and Stoft, S. (2017). *Global carbon pricing: the path to climate cooperation*. The MIT Press.
20. Nordhaus W. D. (2010), Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment, *PNAS*, 107 (26), pp.11721-11726.
21. Reilly, J, S Paltsev, E Monier, H Chen, A Sokolov, J Huang, Q Ejaz, J Scott, J Morris and CA Schlosser (2016), *Food, energy, water and climate outlook*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
22. Reilly, J., R. Prinn, H. Chen, A Sokolov, X. Gao, CA. Schlosser, J. Morris, S. Paltsev, H. Jacoby (2018), *Food, energy, water and climate outlook*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
23. Shell (2018), *Shell Scenarios Sky: Meeting the Goals of the Paris Agreement*, Shell.
24. Sokolov, A., S. Paltsev, H. Chen, M. Haigh, and R. Prinn (2015), *Climate Stabilization at 2°C and Net Zero Emissions*. MIT Joint Program Report 309.
25. Teske S. (2019), *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*, UTS-ISF, Sydney
26. United Nations Environment Programme (2018), *Emissions Gap Report 2018*.

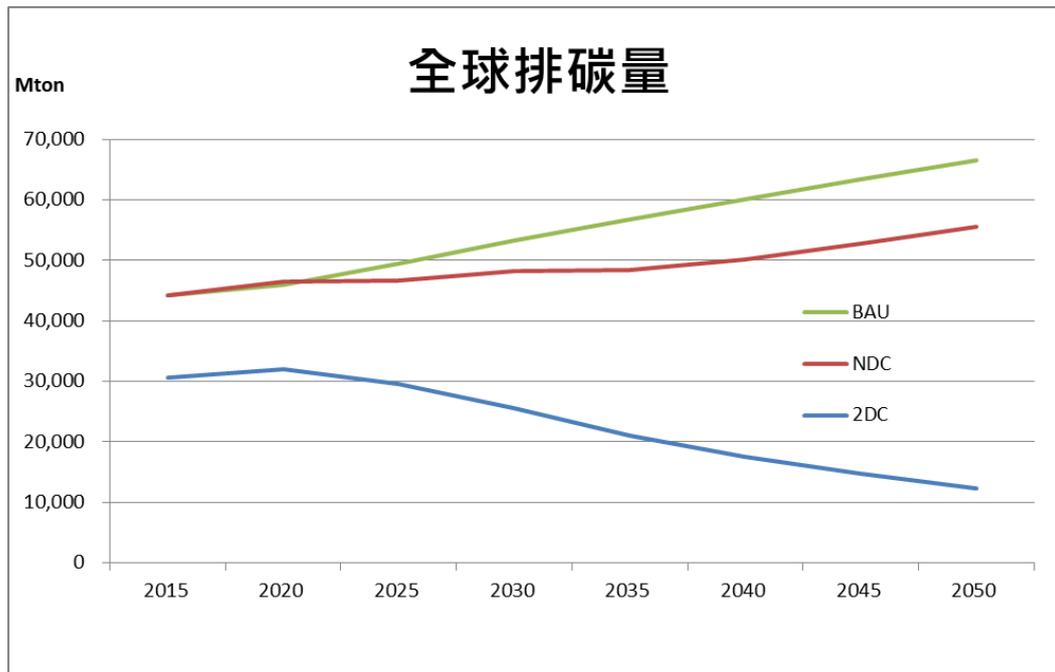
附件：其他參考資料



註: (1)IRENA REmap Case: IRENA (2019) 出版全球能源轉型報告之再生能源地圖情境 (2)IRENA Reference Case:IRENA (2019) 出版全球能源轉型報告之參考情境 (3)IPCC Below/Above 1.5°C: IPCC (2018) 分析地球暖化1.5°C以內之情境分析，Above 1.5°C係指早期溫度衝破 (overshoot) 但2100年仍回到1.5°C目標 (4)IEA-WEO SDS:IEA (2018) 出版的世界能源展望報告之永續發展情境 (5)IRENA Reference Case :IRENA (2019) 出版全球能源轉型報告之參考情境 (6)Teske: Teske (2019) 分析達巴黎協議目標且再生能源高占比情境(7)Shell-sky: Shell (2018) 分析2070年達到能源使用零排碳之sky情境。(8)DNV-GL: DNV-GL (2018) 分析能源轉型之情境。

資料來源: IRENA (2019) 。

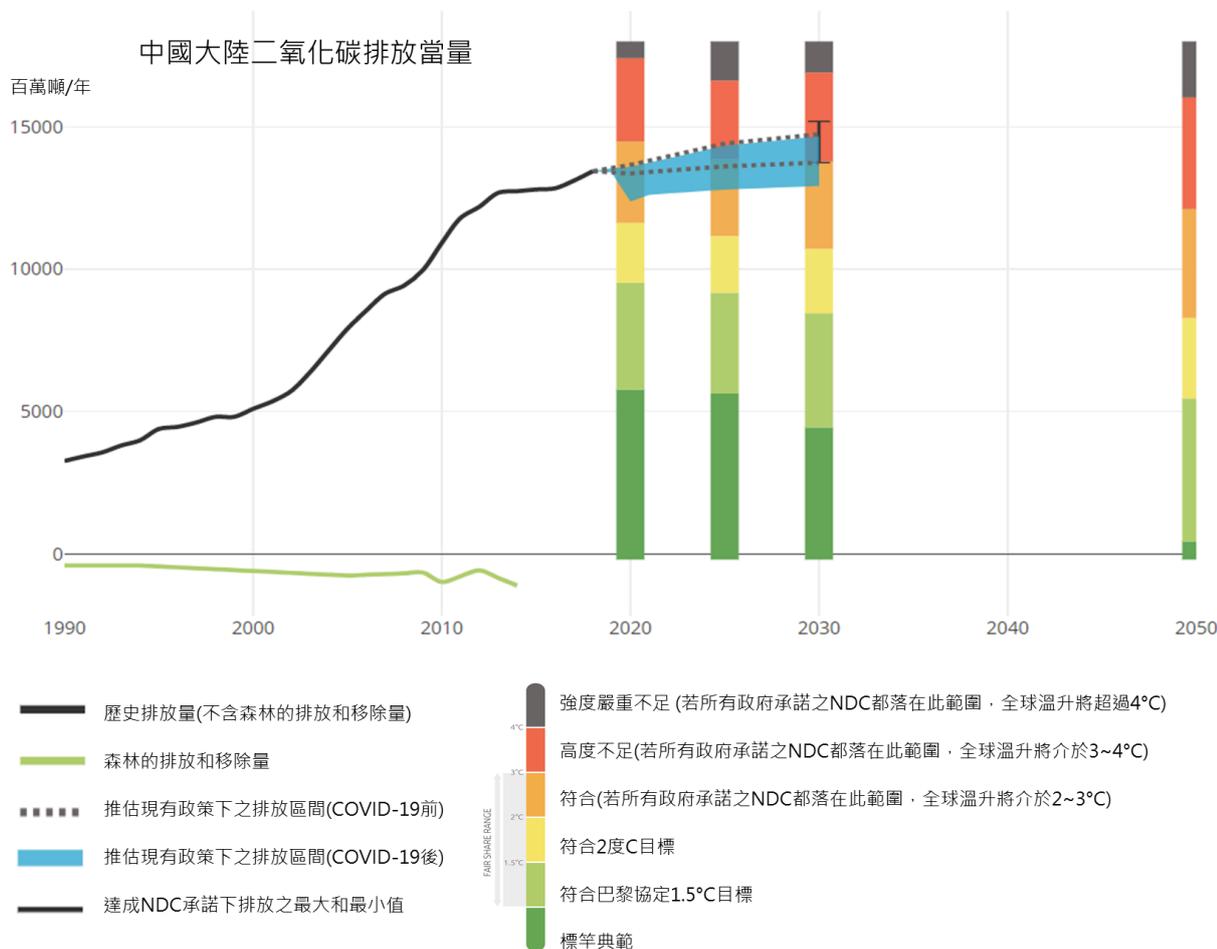
圖 A.1：IRENA GET 報告再生能源占比與其它報告之占比比較



註：BAU 為模擬結果，NDC 及 2DC 情境為外生設定條件

資料來源：本研究設定及模擬結果。

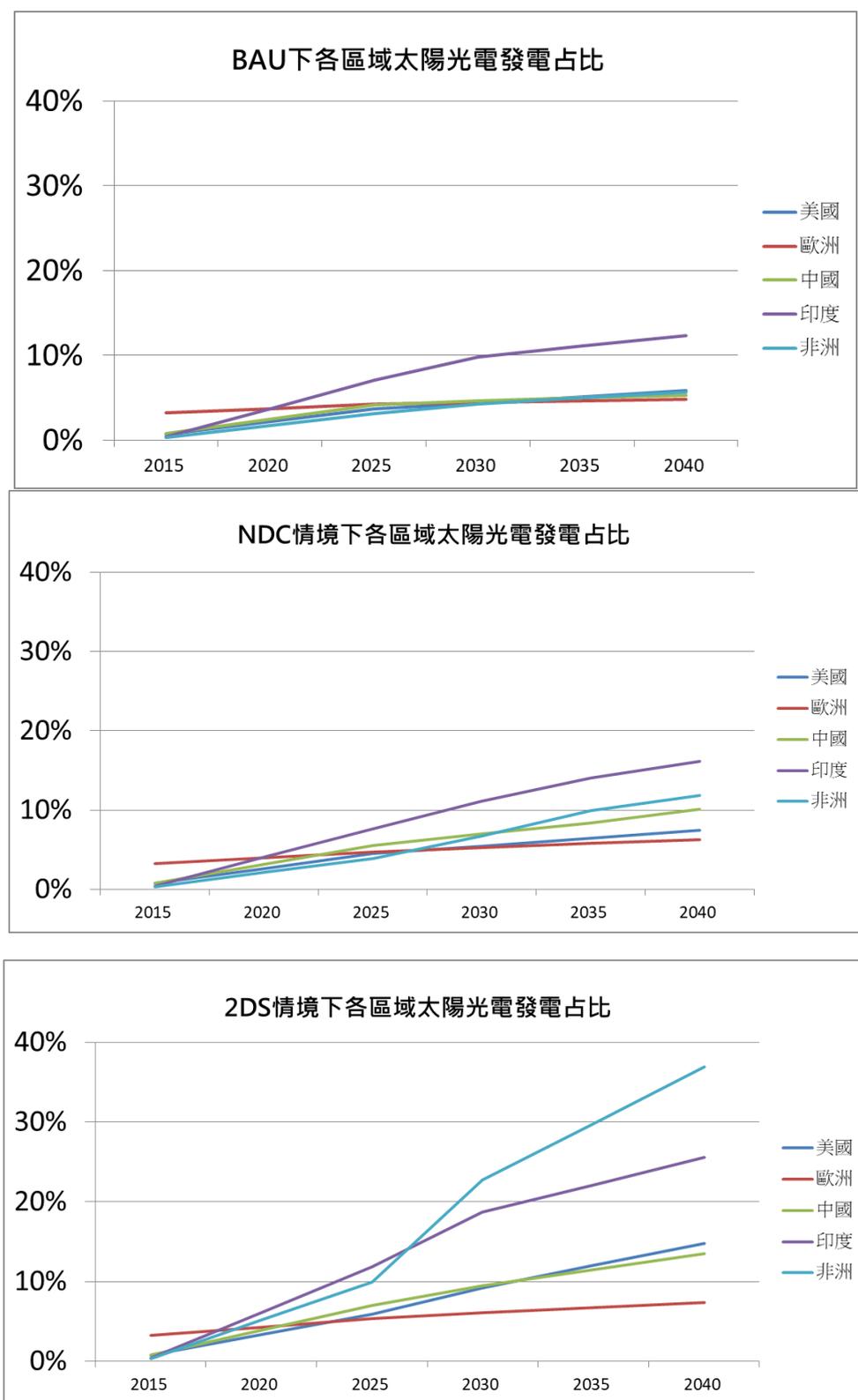
圖 A.2：各情境下之排碳量或排碳限制



註:二氧化碳排放當量,表示包含二氧化碳以外之溫室氣體排放對暖化的影響轉換成相同當量的二氧化碳

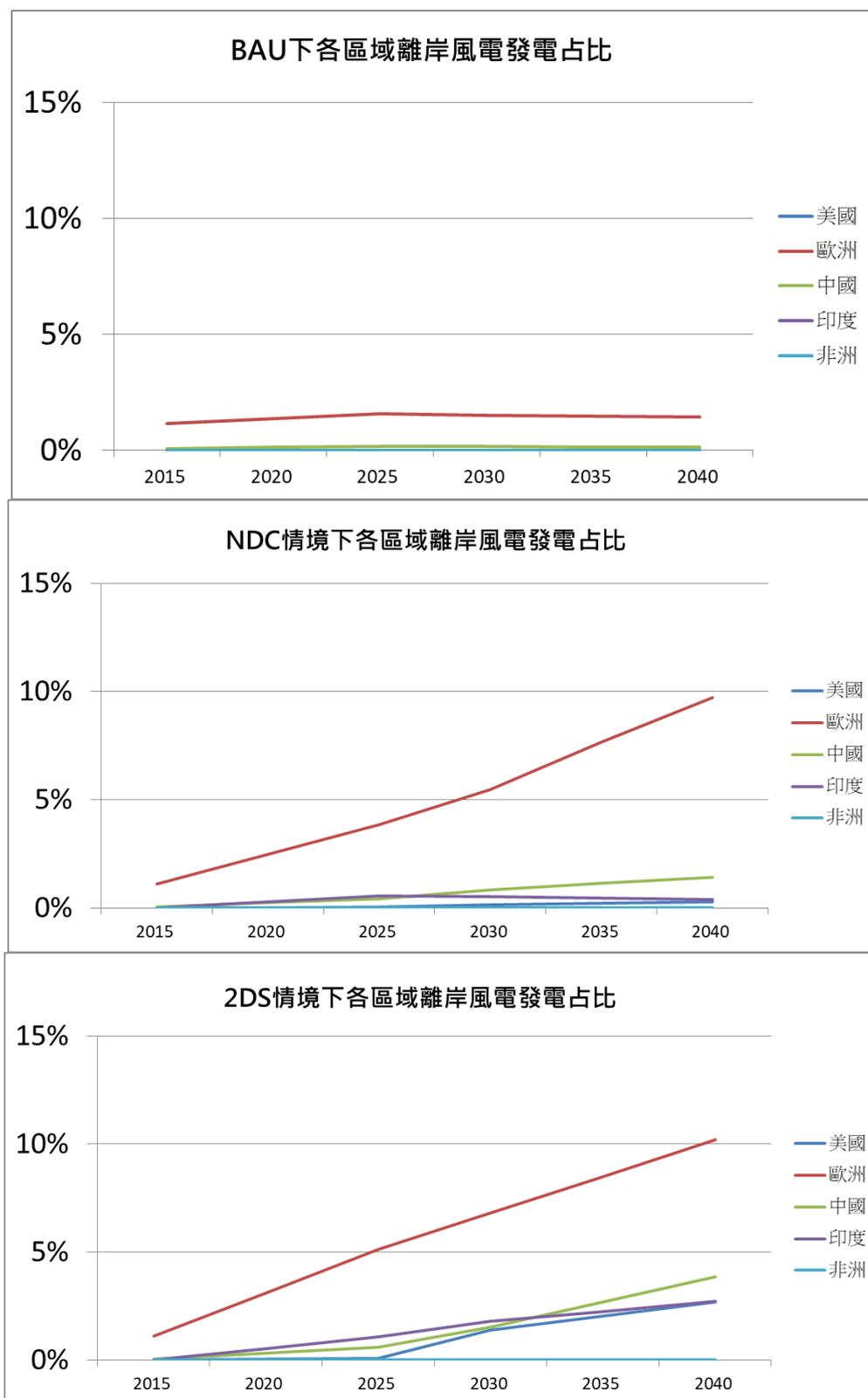
資料來源: The Climate Action Tracker (CAT) (2020), 取自: <https://climateactiontracker.org/countries/china/>

圖 A.3 : 中國大陸排碳可能路徑及 NDC 下之可能排碳量



資料來源：IEA(2017b)及本研究推算。

圖 A.4：各區域太陽光電於該區域發電占比趨勢



資料來源：IEA(2017b)、IEA(2017c)及本研究推算。

圖 A.5：各區域離岸風電於該區域發電占比趨勢