

科技發展觀測平台「能源科技議題」年度報告

能源科技議題編輯小組

引言

為提供科技部及相關研究人員即時掌握國內外科技政策發展及最新研發資訊，國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心於 2015 年度開始建置科技發展觀測平台，持續蒐集與分析各種科技資訊，並依據科技應用領域、重要性、政策相關性等原則，將主要觀測範疇分為「政策動向」、「智慧科技」、「智慧醫療照護」、「能源科技」、「永續環境」、「農業科技」等六大議題。

能源科技為「科技發展觀測平台」重要議題之一。本議題之主要資訊來源包括：(1)各國政府官方網站所發布的政策、法規制度、策略規劃與研究報告；(2)國際知名能源科技研究組織與智庫機構之趨勢分析報告；(3)核心期刊發表之最新能源科技研發相關論文；(4)國內外主流媒體刊登之能源科技研發訊息以及其他資料庫等。

能源科技主要分為非再生能源、再生能源、能源管理三個次領域，其中非再生能源蒐集有關能源總論，以及化石能源、天然氣、核能等非再生能源相關資訊；再生能源則包括太陽能、風能、海洋能、地熱能、生質能...等；能源管理包含各式電池儲能與替代能源儲存技術、智慧電網等，收錄資訊為主要國家相關之政策和發展策略、現況調查、研發趨勢、技術創新與訊息等。

本文係將 2019 年收錄之能源科技相關重點加以綜整，內容首先針對主要國家能源轉型及再生能源政策發展進行比較分析，緊接著選定十一項主題，包含石油、清潔煤(Clean Coal)、核能發電、太陽能發電、風能發電、海洋能發電、生質能發電、地熱能發電、氫能發電、電池儲能及其他儲能系統、智慧電網，就總體與新興科技發展趨勢作概述，最後總結 2019 年能源議題主要發展重點，以為相關機構參考。

一、前言

自十八世紀工業革命以來，隨著工廠的生產行為加速及大眾運輸的普及等因素，導致全球二氧化碳的排放量日益增加。為緩解人類活動造成的溫室氣體過度排放問題，並確保經濟發展與環境永續兼容並蓄，聯合國於 1992 年 5 月於紐約總部通過國際《聯合國氣候變化綱要公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)，除了凝聚成員共識防止氣候變遷所造成的環境影響，並在符合公平原則的情況下承擔不同 CO₂ 減量責任。《聯合國氣候變遷綱要公約》僅透過定期集會共商可能的解決之道，並無就氣候變化問題制定具體可行的措施，爾後，於 1997 年 12 月針對公約的補充條款《京都議定書》(Kyoto Protocol) 也因各國以經濟發展為由無法形成有效的共識。

世界各國持續面臨全球暖化所帶來的氣候變遷問題，加上受到全球人民強力的聲浪及國際機構的反彈下，《巴黎協定》(Paris Agreement) 於 2015 年 12 月正式生效。此項協定雖確定了明確目標，然而並無設定強制的約束力，使得全球溫室氣體排放量仍逐年增加，根據聯合國環境署(United Nations Environment Programme, UNEP)於 2019 年 11 月發布的報告顯示，全球溫室氣體排放自 2009 年至 2018 年每年約成長 1.5%¹。

此外，根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)於 2019 年發布的「全球能源投資 2019」(World Energy Investment 2019)報告中亦顯示與 2017 年相比，2018 年不僅全球石油、天然氣及煤炭的供給投資支出增加，再生能源運輸及熱能相關的投資亦降低 1% (如圖 1)²。無論是聯合國環境署的研究，抑或國際能源總署的報告皆顯示，現今全球發展與《巴黎協定》的目標似乎背道而馳。

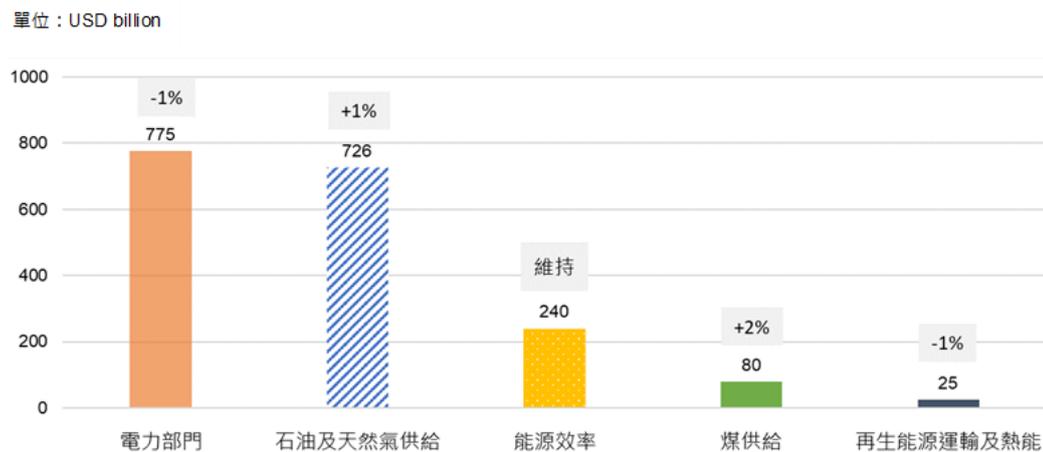


圖 1 2018 年全球能源投資概況

資料來源：International Energy Agency (2019), World Energy Investment 2019.

¹ United Nations Environment Programme (2019), UNEP Emissions Gap Report 2019.

² International Energy Agency (2019), World Energy Investment 2019.

而能源供應主要面臨的威脅有兩方面，第一，石油供給常受到沙烏地阿拉伯、伊朗及委內瑞拉等石油輸出主要國家政治因素影響，導致石油產量及價格充斥著不確定性；第二，根據國際能源總署於 2019 年 3 月發布的核能發電報告顯示，受到日本在 2011 年福島核災影響，各國對於核電安全性存有疑慮，使得全球對於核能發電的開發式微，將對減少二氧化碳排放目標帶來巨大的挑戰³。因此，為滿足全球能源需求與日俱增，並達到《巴黎協定》對於二氧化碳排放量的目標，除了需加速推動清潔化石燃料，再生能源的發展亦刻不容緩。

現今清潔化石燃料主要以清潔煤技術為主要發展重點，包含燃煤發電技術(coal-fired power generation technologies)、煙氣污染物控制技術(Flue Gas Pollutant Control Technologies)及碳捕獲及封存技術(Carbon Capture, Utilization and Storage Technology, CCUS Technology)，以減少污染物排放並提高煤炭生產及利用效率。再生能源中，則以能運用於電網系統及儲能電池的太陽能光伏(Solar PV)發電為近年來主要的發展技術；風力發電則由於浮動式裝置的發展，可使離岸風力發電不受地理環境限制並於偏遠海域中設置，成為近年來各國精進的技術之一。

除了太陽能光伏發電及風力發電外，尚有需多再生能源的發展速度持續成長，海洋能發電主要以潮汐能和波浪能為發展的主軸，為歐盟地區主要關注的技術之一；生物燃料(Biofuel)技術利用廢棄物作為燃料的原料，除了廢棄物再利用外亦可減輕環境負擔，為近年來生質能源發展的方向；地熱能發電則以具商業可行性的深層地熱為未來各國的發展重點；氫能發電則以降低水的電解成本作為未來發展目標。

此外，為解決再生能源在發展上易受到環境與時間的限制，例如太陽能發電受日照限制及風能受風力大小等環境限制，各國亦積極開發能源儲存技術，包含替代能源儲存技術及電池儲能系統，並結合新型架構的電力系統，包含微電網技術及分散式能源系統，致力減少對化石燃料的依賴以達成脫碳目標。

³ International Energy Agency (2019), Nuclear Power in a Clean Energy System.

二、國際能源科技政策動向

(一)能源轉型指數

1.介紹

根據國際能源總署發布的「2018 年全球能源展望」顯示，全球能源需求在 2017 年成長了 2.1%，預計至 2040 年將再成長 25%，主要是由於新興經濟體在發展的過程中對能源的渴求⁴。能源需求的成長突顯了能源消耗與經濟成長之間的緊密關聯，然而如前述所提到，全球將面臨非再生能源需求持續攀升的威脅以及減少碳排放量的目標，顯示能源轉型的重要性。

為追蹤全球能源轉型的進展，世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)建構能源轉型指數(Energy Transition index, ETI)，衡量 115 個國家現今能源轉型程度，以提供世界各國能源轉型的基準與學習的目標，以利採取措施加速國家能源轉型，以促進全球達到減少碳排放量的目標。

能源轉型指數主要比較系統績效(System performance)及轉型準備度(Transition readiness)兩大類型指標。系統績效指標主要衡量現今國家能源系統的能力，透過能源三角(energy triangle)的架構以經濟成長與發展、能源普及與安全、環境永續性進行評分。轉型準備度指標則是衡量國家能源系統對未來能源轉型過渡期的準備程度，並透過資本及投資、監管及政治承諾、機構框架及政治局勢、基礎設施及創新企業環境、人力資本及消費者參與、能源系統結構六個指標進行衡量。

2.評比結果

(1)總體概況

根據世界經濟論壇於 2019 年發布的「推動能源系統有效轉型」(Fostering Effective Energy Transition 2019 edition)顯示，以能源轉型指數總體分數來看，由瑞典拔得頭籌位居第一，其次則為瑞士及挪威，排名前十位的國家幾乎多位於北歐及西歐地區(如表 1)，由於此區域的國家具有較嚴格的監管框架，透過大規模吸引資本、創造創新的商業環境及對於人民的高度承諾加速轉型發展。此次評比與去年相比並無顯著變化，表示過去表現良好的國家仍持續發揮領導作用⁵。

表 1 世界經濟論壇 2019 年能源轉型指標(ETI)評比

排名	國家	總體分數	系統績效	轉型準備度
1	瑞典	75%	81%	69%
2	瑞士	74%	78%	71%

⁴ International Energy Agency (2019), World Energy Outlook 2018.

⁵ World Economic Forum, WEF (2019), Fostering Effective Energy Transition 2019 edition.

排名	國家	總體分數	系統績效	轉型準備度
3	挪威	73%	82%	65%
4	芬蘭	73%	72%	74%
5	丹麥	72%	72%	73%
6	澳洲	71%	71%	71%
7	英國	70%	74%	74%
8	法國	69%	77%	77%
9	荷蘭	69%	71%	71%
10	冰島	69%	75%	75%

資料來源：World Economic Forum, WEF (2019), Fostering Effective Energy Transition 2019 edition.

(2)系統績效指標

系統績效主要由三項指標組成，第一，經濟成長與發展指標著重於能源供應競爭力、進出口能源對國內生產總值影響等衡量能源對國家經濟發展與成長的貢獻程度；第二，能源普及與安全著重於能源供應的持續性與價格的承受能力；第三，環境永續性則著重於汙染物排放量及能源系統的永續性。

總體來看，雖然從 2014 年至 2017 年系統績效指標分數持續成長，但是由於全球(尤其亞洲)持續使用煤炭發電且已開發國家在減少人均排放量並無太大的改善，使得環境永續性指標缺乏進展，因此造成 2018 年系統績效指標進展較為緩慢。

此指標由挪威拔得頭籌，挪威除了是世界第三大天然氣出口國(僅次俄羅斯與卡達)，亦是歐洲地區最大的石油生產國家，其電力供應幾乎全使用再生能源，主要為水力發電，並以風力發電為輔⁶。近年來致力於加強北歐電網供電安全性，與德國及英國進行海底電力連接計畫，使得其在系統績效指標上有優秀的成績。瑞典則於系統績效指標評比位居第二，主要以核能發電及水力發電作為電力供應主要來源，自 2000 年以來瑞典於生物質能發電、風力發電及太陽能發電的能力皆逐步提高，使其不僅在能源供應上更具多樣性外，再生能源供應比例亦有成長的趨勢⁷。此外，瑞典議會於 2017 年通過了國家氣候政策框架(National Climate Policy Framework)，其中包括 2045 年溫室氣體淨零排放的目標；在 2019 年 1 月協定中，新政府除了同意增加環境稅外，也承諾在 2030 年之後停止銷售使用汽油及柴油的新車，可見瑞典政府對於環境永續性的重視⁸。值得注意的是，哥斯大黎加為中南美國家中再生能源供應電力幾乎為 100%，使得其在環境永續性上有亮麗的表現。(表 2)

⁶ International Energy Agency. International energy data and analysis, Norway.

⁷ World Energy Council (2019), World Energy Trilemma Index.

⁸ International Energy Agency (2019), Energy Policies of IEA Countries: Sweden 2019 Review.

表 2 系統績效排名前十大國家各維度分數及排名

排名	國家	經濟成長與發展		能源普及與安全		環境永續性	
		分數	排名	分數	排名	分數	排名
1	挪威	89%	1	87%	28	70%	6
2	瑞典	74%	10	92%	2	78%	1
3	瑞士	73%	21	87%	25	74%	3
4	法國	70%	23	92%	4	69%	9
5	烏拉圭	67%	35	81%	46	76%	2
6	哥斯大黎加	74%	9	81%	49	70%	5
7	冰島	81%	5	84%	37	59%	28
8	英國	68%	29	91%	10	64%	18
9	紐西蘭	69%	27	88%	23	63%	21
10	立陶宛	63%	55	90%	18	64%	20

資料來源：World Economic Forum, WEF (2019), Fostering Effective Energy Transition 2019 edition.

(3) 轉型準備度指標

轉型準備度主要由六項指標組成，第一，資本及投資著重於國家投資自由、信貸機會及再生能源吸引資本及投資的能力；第二，監管及政治承諾著重於衡量國家減排承諾的兌現能力、政策穩定性及能源效率；第三，機構框架及政治局勢著重於各國機構的可信度，作為投資者信心及能源轉型籌募資金的重要因素；第四，基礎設施及創新企業環境著重於創新業務環境、技術可用性、物流與運輸基礎設施的評比；第五，人力資本及消費者參與著重於人力資本的發展及能源系統管理與營運專業知識的培養；第六，能源系統結構則著重於人均能源消費水平、煤炭發電、化石燃料發電與再生能源發電的比例。

在 2018 年轉型準備指標評比的結果顯示，轉型準備排名較前面的國家於能源系統結構項目的分數皆較低，主要是由於排名較前的國家多屬於高收入且高度發展的國家，導致人均能源消費量較高，而部分國家則是由於煤炭占能源系統的比例較高，導致能源系統結構分數較低，如英國及荷蘭。

芬蘭及丹麥為轉型準備指標排名第一及第二的國家，兩國於能源安全性及永續性上投入大量的資金，為使能源系統中再生能源占比提高，兩國亦提高人力資本的投入。而新加坡為東亞唯一排名前十名的國家，在機構框架及政治局勢與基礎設施及創新企業環境有優異的表現，透過經濟發展局(Economic Development Board, EDB)及建屋發展局(Housing Development Board, HDB)規劃於政府部門建築物及空間中設置太陽能光伏系統，而建築施工管理局(Building Construction Authority, BCA)及新加坡能源市場管理局(Energy Market Authority, EMA)等機構

則持續進行投資及研發，以加速太陽能光伏系統的發展⁹。(表 3)

表 3 轉型準備度排名前十大國家各維度分數及排名

排名	國家	資本及投資		監管及政治承諾		機構框架及政治局勢		基礎設施及創新企業環境		人力資本及消費者參與		能源系統結構	
		分數	排名	分數	排名	分數	排名	分數	排名	分數	排名	分數	排名
1	芬蘭	76%	4	69%	11	82%	10	81%	7	83%	1	52%	69
2	丹麥	73%	7	68%	12	85%	3	78%	9	81%	2	49%	75
3	澳洲	73%	8	67%	14	82%	12	75%	12	67%	8	60%	52
4	瑞士	69%	12	75%	2	83%	9	83%	3	55%	18	58%	55
5	瑞典	62%	24	66%	18	84%	7	81%	6	62%	10	57%	57
6	盧森堡	64%	20	67%	15	85%	5	73%	14	57%	16	56%	59
7	英國	82%	1	66%	16	80%	14	77%	10	46%	36	46%	83
8	荷蘭	63%	22	71%	5	81%	13	83%	1	51%	25	44%	85
9	新加坡	52%	41	71%	6	89%	1	81%	5	43%	41	55%	61
10	挪威	61%	26	69%	10	89%	2	71%	17	47%	31	55%	63

資料來源：World Economic Forum, WEF (2019), Fostering Effective Energy Transition 2019 edition.

透過以上世界經濟論壇於 2019 年發布的結果可了解各國於能源轉型上的優勢與領先領域之間的差異，期望以此結果提供全球國家能源轉型框架，並鼓勵國家與公部門及私部門利益相關者合作，以幫助全球國家決策者有效進行轉型措施。

(二) 主要國家再生能源政策

為了解全球各區域國家於再生能源發展的趨勢，本報告參考國際能源總署於 2019 年發布的《2019 年至 2024 年再生能源分析及預測》，整理概述亞洲(中國大陸、日本及韓國)、北美洲(美國及加拿大)，及歐洲(德國、西班牙、法國及荷蘭)主要國家再生能源政策¹⁰。(表 4)

1. 電價制度：躉購制度及競標制度

以電價制度來看，主要國家電價制度可分為兩類，分別為躉購制度及競標制度。在躉購制度下，政府依據再生能源成本等因素訂定固定價格或費率及收購年限，以提供再生能源發電業者長期電力收購協議以促進再生能源發展，實施躉購制度的主要國家有日本；而競標制度則是政府透過招標制度，依據特定裝置容量或發電量進行競標，並由廠商以每單位電力價格進行投標，以透明化的價格提供

⁹ Association of Southeast Asian Nations (2019), Research and Development Renewable Energy in ASEAN.

¹⁰ International Energy Agency (2019), Renewables 2019 Analysis and Forecast to 2024.

予消費者購買，實施競標制度的主要國家有中國大陸、德國及法國。近年來隨著再生能源的成本價格一再下降，許多國家皆從躉購制度轉為競標制度，以貼近再生能源真實市場價格，現今主要實施躉購制度的日本已於 2016 年將部分再生能源專案改為競標制度，並將於 2020 年重新進行電價制度的修訂¹¹。

2. 鼓勵性政策

目前全球主要國家以發展風力發電及太陽能光伏發電為主體，為刺激再生能源發展，各國除了擴大建設規模外，亦提出許多鼓勵性政策。亞洲國家除前述提到透過將定價制度由躉購制度轉為競標制度以擴大發電規模(如中國大陸及日本)，韓國亦以再生能源憑證鼓勵其於商業應用上的部署。美國及澳洲均針對住宅太陽能光伏發展提出獎勵制度，前者以聯邦稅收優惠、州級回扣計畫及年度淨值計畫等多項規劃提升其發展，後者則是採取聯邦回扣計畫。歐洲地區主要國家則針對太陽能光伏發電採行相關政策，如德國實施《綜合能源法》及西班牙擬於《國家整體能源和氣候計畫》增加設置規模；此外，由於過去此區域電價遠高於發電成本，引發消費者抗議，各國亦對此更改鼓勵機制，如德國降低太陽能光伏發電的補貼及法國降低其能源關稅。然而，不論是在電價制度上的規劃，亦或者增加再生能源部署並採用鼓勵性政策，各國仍需對各項制度進行全面性的檢視，除針對鼓勵政策衡量利益相關者的損益及發電量是否過剩外，亦需提高競標制度下消費者的議價能力，以達到透明化及合理化訂價的效果。

表 4 主要國家再生能源政策

地區	國家	政策
亞洲	中國大陸	1.以風能及太陽能為發展主體，並增加太陽能光伏發電及陸上風力發電的部署 2.再生能源電價由躉購制度轉為競標制度 3.建造輸電線路和電力需求警示系統
	日本	1.主要採用躉購制度及擴展公共事業規模 2.將再生能源供應商拍賣項目的容量門檻由 2MW 降至 500kW
	韓國	1.透過再生能源配額制度(RPS)確保發電目標量 2.透過再生能源憑證鼓勵再生能源商業應用的部署
大洋洲	澳洲	1.採取聯邦回扣計畫、技術證書及地方獎勵 2.擴大住宅太陽能光伏市場
北美洲	美國	1.透過聯邦稅收優惠、州級回扣計畫及年度淨值計畫刺激住宅太陽能光伏市場的成長 2.降低風力發電及太陽能光伏發電投資成本
	加拿大	1.主要發展陸域風力發電及水力發電兩種再生能源

¹¹ 經濟部能源局「第 15 屆台日能源合作研討會」報告。

地區	國家	政策
		2.增加亞伯達省、安大略省及魁北克省再生能源的部署
歐洲	德國	1.對公共事業規模及分散式能源技術採支持性政策 2.實施《綜合能源法》並批准 8GW 的太陽能光伏發電及風力發電之拍賣
	西班牙	1.向上修訂再生能源年度拍賣，透過拍賣機制確保最低投資回報率 2.《國家整體能源和氣候計畫》擬增加太陽能光伏發電及風力發電的安裝
	法國	1.針對公共事業規模及大型商業系統推動競標制度 2.鼓勵分散式太陽能光伏發電於住宅系統的發展
	荷蘭	1.提升生物質熱能及沼氣發電的發展 2.降低太陽能發電成本並擴大其在電網的容量

資料來源：International Energy Agency (2019), Renewables 2019 Analysis and Forecast to 2024.

三、能源科技重點發展趨勢

(一)石油

石油為化石燃料中主要的碳排放來源之一，在 2017 年至 2018 年間，人們對於全球經濟的前景，中美貿易戰高升、中國經濟與貿易指標低於預期、美國利率上升及新興經濟體借貸成本上升等多項因素抱持負面的看法，使得總體石油需求前景蒙上一層陰影，加上美國頁岩油產量超出預期與其對伊朗實施制裁，影響石油輸出國家組織(Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC)主要石油生產國家對於原先減產的政策，造成石油供給面的不穩定性升高，使得布蘭特原油價格(Brent Price)呈現大幅度的波動。

隨著全球人口持續增加及開發中國家的經濟成長，未來能源需求勢必繼續增加，各界對於氣候變遷日益關注，即使市場上有越來越多的替代品被應用於各個領域上，然而其發展規模並不足以完全取代石油，預期 2050 年石化製品的需求將會再成長 50%¹²，因此探究未來石油廠商供給及消費需求仍是相當重要的。

短期來看，石油市場供給主要受到伊朗和委內瑞拉政治局勢衝擊，而其需求則受到全球經濟趨緩影響。牛津能源研究所透過即時預測情景(real-time forecast scenarios)模型，並搭配 2019 年油價四項主要風險(伊朗地緣政治風險、委內瑞拉地緣政治風險、美國頁岩油成長風險和全球經濟成長風險)，預測 2019 年全球原油市場的價格顯示，2019 年油價主要傾向向下調，若有上調的可能性大多將落在下半年¹³。

而以長期來看，國際能源總署以 2019 年為基礎預測至 2024 年石油市場展望，並以供給面及需求面進行分析。以供給面來看，美國持續主導將全球石油生產能力提高 5.9 mb/d(每日百萬桶)，然而美國制裁使伊朗的有效產能受到侵襲，造成石油輸出國家組織成員國的反彈幅度不大，使得預估至 2024 年全球產能僅增加 0.4mb/d。總體而言，非石油輸出國家組織總體的石油供應總量將從 2018 年的 62.6 mb/d 成長到 2024 年的 68.7 mb/d 共增加 6.1 mb/d；而石油輸出國家組織方面則將從 2018 年的 26.6mb/d 成長到 2024 年將達到 31.3 mb/d，共提升 4.7 mb/d(如圖 2)。

¹² Barclays Research (2019), Oil in 3D: The Demand Outlook to 2050

¹³ Oxford Institute for Energy Studies (2019), Oil Price Paths in 2019: Navigating Volatile Markets.

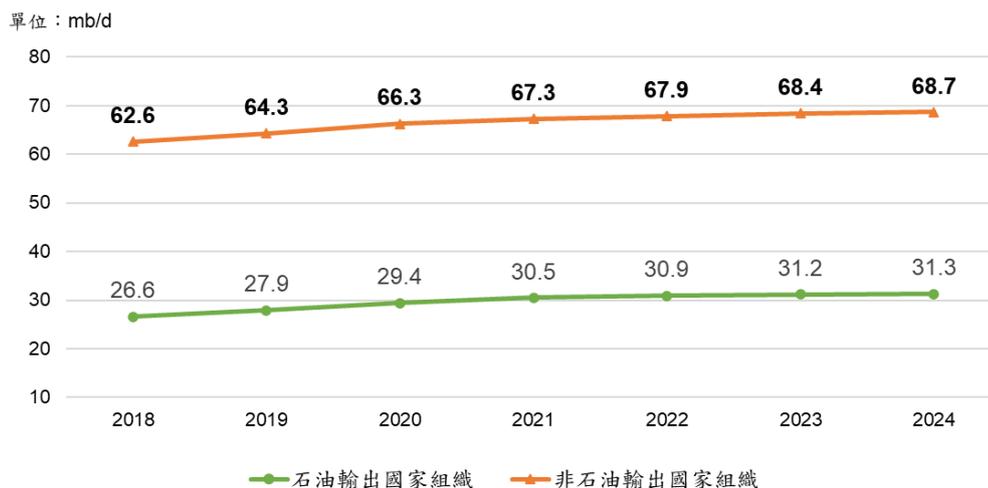


圖 2 石油供應總量預估趨勢

資料來源：International Energy Agency (2019), Oil 2019: Analysis and Forecasts to 2024.

以需求面來看，受石化市場需求的增加與石油價格的下降影響，預估到 2024 年，非石油輸出國家組織的需求將成長 2.3%，其中受到中國大陸與印度需求迅速成長的影響下，亞洲將成為成長速度最快的地區。其他國家需求亦有成長的現象，拉丁美洲以每年 1.2% 成長，非洲以每年 2.3% 成長，預估前蘇聯(Former Soviet Union, FSU)與拉丁美洲在 2018 年到 2024 年間將增加約 0.5mb/d 的世界石油需求。此外，隨著國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 船用燃料法規的實施，中東的需求在 2019 年到 2021 年亦將有所回升¹⁴(如圖 3)。

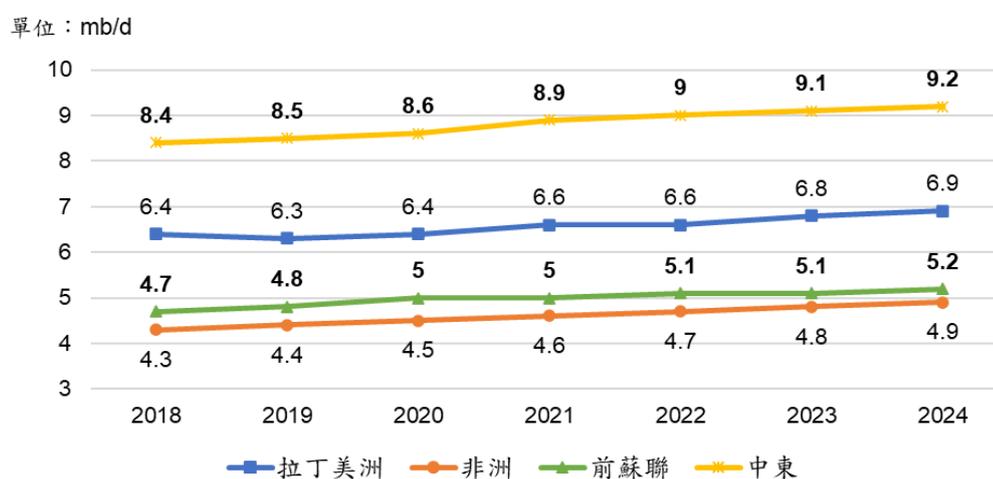


圖 3 國家石油需求總量預估趨勢

資料來源：International Energy Agency (2019), Oil 2019: Analysis and Forecasts to 2024.

¹⁴ International Energy Agency (2019), Oil 2019: Analysis and Forecasts to 2024.

(二)清潔煤

為了減少全球二氧化碳排放量以解決全球暖化問題，近年來各國致力發展非再生能源領域中清潔煤技術。清潔煤為減少污染物排放並提高煤炭生產及利用效率的技術，為煤炭加工、轉化、燃燒及汙染控制技術的總稱，一般可分為四類，第一類為燃燒前的煤炭加工技術，第二類為高效的清潔燃煤發電技術，第三類為煤炭轉化技術及第四類為燃燒後汙染物控制和資源回收。透過清潔煤技術具有良好的可用性、可靠性、穩定性及較長的壽命設備，因此較能於大規模商業應用中使用，現今商業化燃煤發電的單位容量已從 10MW 至 1000MW 以上，清潔高效的燃煤發電技術機組已可作為許多地區的核心動力來源，並滿足各地區的電力負荷要求。

目前重要的清潔煤技術已廣泛於各國使用並有重大的突破，如現今超臨界及超超臨界燃煤發電技術(Supercritical(SC) and Ultra-Supercritical(USC) coal-fired power generation technology)已進入成熟應用的階段，除了過去使用此項技術進行燃煤發電外，現今歐盟、美國及澳洲將煤炭及生物質能共同燃燒進行耦合發電(coupled generator)；另煙氣汙染物控制技術(Flue Gas Pollutant Control Technologies)包含除塵、脫硫及反硝化技術，現今美國約有 47%的燃煤電廠使用反硝化方式進行選擇性催化還原法，以減少燃煤過程中煙氣汙染物的排放；而碳捕獲及封存技術一直是各國持續關注的技術，近年來對於碳捕獲技術主要常與熱電聯產技術(又稱汽電共生，Cogeneration, Combined Heat and Power)相結合，許多熱電聯產項目主要作為碳捕獲技術的輔助，並透過搭配富氧燃燒提高空氣中的含氧量作為助燃氣體，以增加燃燒後產生二氧化碳濃度進而搭配碳捕獲技術，達到降低污染的效益¹⁵。

(三)核能發電

除了石油及煤炭等化石燃料外，核能發電亦為非再生能源領域重要的能源類別，根據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)研究顯示，核能發電至 2018 年 12 月 3 日達到約 4 兆瓦¹⁶。然而受到日本福島核災影響，使得日本、德國及法國皆對於核電安全問題存有疑慮進而進行減產，根據國際能源總署於 2018 年發佈的新政策情景(New Policies Scenario, NPS)顯示，預計至 2030 年初期，全球核能發電機組的裝機容量將大幅減少，預估再生能源將加速取代核能發電，其在 2040 年所占比例將達到 40% 以上，高於核能發電四倍之多¹⁷。

¹⁵ Asia-Pacific Economic Cooperation (2019), Exchange and Training on Clean Coal Technology and Clean Energy Policy.

¹⁶ International Atomic Energy Agency (2019), IAEA Annual Report for 2018.

¹⁷ International Energy Agency (2018), World Energy Outlook.

現今國家針對核能發電政策主要分為三類，第一類為減少或逐步淘汰核電國家，例如德國、法國、韓國、比利時及瑞士，此類國家皆逐步排除核能發電的使用，並利用再生能源代替其缺口，例如德國主要以風力發電及太陽能發電替代，法國及比利時則以離岸風力發電為主進行替代；第二類則為採取溫和手段使核能發電減緩的國家，例如美國、日本、加拿大、英國及瑞典，美國雖於核能發電廠有嚴重的虧損，然而其對再生能源有效率的佈署使其擁有相對便宜的再生能源，日本則是在福島核災後核能發電產量大幅減少並提高再生能源產量，加拿大、英國及瑞典預計在未來逐步降低對核電的依賴。第三類則是擴大發展核能發電的國家，例如中國、印度、阿拉伯聯合大公國及沙烏地阿拉伯，此類國家除了發展核能發電外，亦同時加強再生能源的貢獻¹⁸。

然而受到電力系統靈活性問題影響，風力發電及太陽能發電並非核能發電完美的替代品，兩者皆可能受到天氣及位置影響發電穩定性。為使電力系統在再生能源能完全穩定電力供給前，除了加速儲能系統與電池儲能的發展外，維持核能發電投資亦是無法避免的。有鑑於過去核能發電發展經歷許多安全性問題(如日本福島核災)，為解決核能發電在此因素的顧慮，全球政府皆對核能發電的投資進行介入性政策干預，透過長期投資政策合約、價格保證及國家直接投資來克服核能發電融資障礙，以延長核電廠壽命並降低清潔能源轉換的經濟成本¹⁹。

(四) 太陽能發電

為實現《巴黎協定》的目標，世界各國積極推動能源轉型，而減少二氧化碳的排放即為能源轉型的核心，使得各國以精進再生能源技術為能源發展的首要重點。再生能源技術主要以太陽能發電及風力發電為發展的核心，這兩項技術亦是最具發展性的再生能源發電。根據國際能源總署研究顯示，與過去四年相比全球太陽能光伏發電預計於 2019 年將以最快的速度成長²⁰。

全球政府為鼓勵分散式太陽能光伏發電的發展提出許多激勵措施，其一為採取直接性財政鼓勵措施的形式以降低投資成本，例如一次性固定補貼和現金回饋政策(Grants and rebates)，以及根據投資比例的稅收抵免(Tax credits)政策；其二則為針對電力消費及銷售的措施，例如以減少帳單費用鼓勵消費者自行設置太陽能光伏發電，實施此項政策的國家有巴西、土耳其及荷蘭。然而，為避免鼓勵政策下造成發電過剩並造成中央及地方的稅收損失，政府應持續衡量政策效益。

此外，近年來浮動式太陽能光伏發電(floating solar photovoltaic, FPV)亦是全球發展的重點技術之一，與陸地式太陽能光伏發電相比，此項技術除了可解決人

¹⁸ Renewable Energy Institute (2019), The Rise of Renewable Energy and Fall of Nuclear Power: Competition of Low Carbon Technologies.

¹⁹ International Energy Agency (2019), Nuclear Power in a Clean Energy System.

²⁰ International Energy Agency (2019), Renewables 2019 Analysis and Forecasts to 2024.

口眾多國家發電的土地困境，亦可透過浮動式太陽能光伏發電安裝於水庫，就近利用水力發電廠的電力傳輸設備及運用水冷卻效果以提升發電效率。此外，根據日本的經驗顯示，此項技術可減少水中藻類生長，降低水質優養化的可能性，且其組裝及設置皆具便利性及高度模組化，使得其可達到極高的安裝效率(如圖4)。現行浮動式太陽能光伏發電於內陸水域的發展較為純熟，海域方面仍處於起步階段，未來將針對海上的惡劣天氣(如強風、大浪)及具鹽分與侵蝕性的環境等方向加強其設備的抵禦性，以提升發電穩定性²¹。

浮動型太陽能光電	VS.	陸地型太陽能光電
截至2018年底的累計容量 > 1.3 GWp	累計發電容量	截至2018年底的累計容量 > 500 GWp
通常關鍵組件保固年限為 5~10年	耐用性	發電組件平均使用壽命超過20年
可就近利用水力發電的電力傳輸設施	電力系統	建立傳輸電力的電網成本相當高
利用水的冷卻效果提升發電效率	發電效率	易受周圍環境陰影干擾而降低發電效率
方便取水進行清潔，需留意生物汙染的問題	發電組件的維護	易於清潔，但容易受植物生長影響
模組化的平面設計，需定期維護錨定電纜	太陽能板的設計	設計必須適應地形和區域限制
缺乏明確、具體的許可法規和程序	法規與許可權	有成熟的許可法規和程序
因建置在水域上，需特別留意絕緣的問題	安全性	一般而言安全性很高
不需整地，組裝容易	安裝與建置	需要重新整地並評估土壤性質
不與農業、工業或住宅用地競爭土地	土地的使用	與城市住宅，工業發展和農業競爭土地
發電組件和建置成本較高，具規模經濟效益	成本	建置成本較低，無規模經濟效益
減少藻類生長，降低水質優氧化的可能性	環境影響	可能破壞生物的潛在棲息地

圖 4 浮動式與陸地式太陽能光伏發電比較

資料來源：World Bank Group, ESMAP and SERIS (2019), Where Sun Meets Water : Floating

太陽能熱發電技術與聚光太陽能熱發電技術(CSP)亦是太陽能發電的發展重點，太陽能熱發電技術透過捕捉太陽能光及太陽能熱，並將其轉化為熱能，其中聚光型太陽能技術透過透鏡或反射鏡將大孔徑的太陽光聚焦至較小區域，有效的利用高溫熱量避免熱損失，並透過發電機上集光區受太陽照射溫度升高，進而將光能轉換為熱能驅動發電機發電。現今普遍將太陽能熱發電技術運用於家用熱水器，約可供應 2 至 6 平方公尺的家用熱水器 30% 至 100% 的需求；歐洲亦有許多國家將太陽能熱發電技術運用於空間供暖系統，以降低化石燃料的消耗。

聚光太陽能熱發電技術則透過聚集太陽光線來加熱流體，直接或間接運行渦輪機和發電機，與太陽能光伏技術最大的不同在於其僅透過直接輻射的方式轉換

²¹ World Bank Group, ESMAP and SERIS (2019), Where Sun Meets Water : Floating Solar Market Report.

太陽能，因此易受到天氣及區域的限制，現今許多工廠透過其蓄熱能力及燃料動力備用能力，提高其電力調度能力²²。

另外，值得關注的是太陽能電池已進入第三代研發進程，目前第一代矽晶太陽能電池仍在商業應用中居於龍頭寶座，然而第三代薄膜電池因使用以地球儲量豐富的元素，例如銅鋅錫硫(copper zinc tin sulfide, CZTS)、鈣鈦礦太陽能電池(perovskite solar cells)、奈米材料(nanomaterials)的有機太陽能光伏(organic solar PVs)與量子點太陽能電池(quantum dot solar cells)，使其前景備受關注，未來將著重於高轉換功率、降低生產成本與材料使用及減少製造複雜性等項目發展²³。

(五)風能發電

風力發電與太陽能發電同為最具發展潛力的再生能源發電，根據國際再生能源組織的報告顯示，至 2018 年全球陸域風力(Onshore wind)總發電裝置容量已達 542 GW，然而為達成碳排放量減量的目標，至 2050 年總裝置容量需達 5,044GW(如圖 5)，換而言之，未來三十年陸域風力發電的年複合成長率需超過 7%，因此現今陸域風力發電主要針對增加風機尺寸及額定功率、優化轉子葉片的設計、材料的創新及強化電力及電子零組件等多項風機優化項目發展。此外，隨著大數據及人工智慧的發展，現今已有智慧化風力發電機的使用，透過預測風力發電機中的感測數據來監控磨損情況，以降低風力發電機故障的成本，並透過智慧化自動調節風機的變槳控制及偏航控制以提高整體風力發電的能量輸出，例如德國公司 Semikron 預計透過演算法預測並監控風力發電零組件的健康狀況，以降低修繕與維護的成本²⁴。

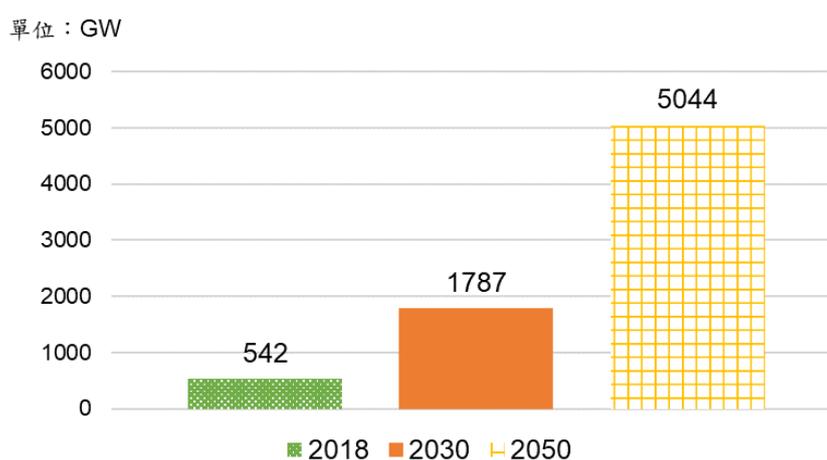


圖 5 陸上風力發電累積裝機容量

²² International Energy Agency (2019), Solar Energy: Mapping the Road Ahead.

²³ United Nations Conference on Trade and Development (2019), The Role of Science, Technology and Innovation in Promoting Renewable Energy by 2030.

²⁴ International Renewable Energy Agency (2019), FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.

資料來源：International Renewable Energy Agency (2019), FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.

然而，陸域風力發電的設置亦面臨許多挑戰，例如在土地及電力傳輸量限制下，使得人口稠密地區不易發展陸域風電，進而使離岸風力(Onshore wind)發電不受空間限制的優勢受到關注。根據斯特拉斯克萊德大學(University of Strathclyde)發布的報告提到，預估全球於浮動式風力發電的裝置容量將由 2019 年的 57MW 達到 2030 年的 4.3GW(如圖 6)，顯示此技術未來尚有巨大的發展潛力，其中又以可設置於偏遠海上的浮動式離岸風力發電(Floating Offshore Wind Turbine, FOWT)最為熱門²⁵。

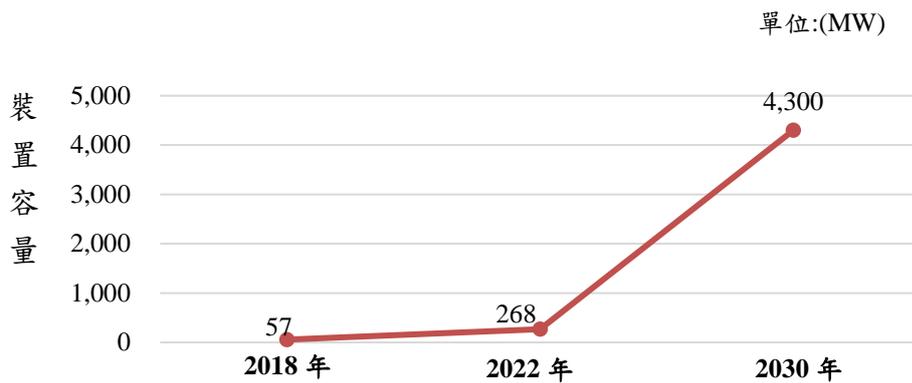


圖 6 全球浮動式離岸風力發電的潛在部署

資料來源：University of Strathclyde, Glasgow (2019), Offshore wind, ready to float Global and UK trends in the floating offshore wind market.

浮動式離岸風力發電最為重要的技術即為浮動式基座的設計，現今主要的浮動式基座有三種類型，分別為半潛式及駁船(Semi-submersible and barge)、深水浮筒式(Spar)及張力腿平台(Tension Leg Platform, TLP)，三者主要皆是利用浮力結構使平台可於海上達到靜態平衡。而過去深水浮筒式為浮動式基座中最常被使用的，隨著半潛式浮動式基座的發展，預計至 2022 年將位居市場領導地位，市場占比約為 62%；此外，雖然張力腿平台目前於市場上的滲透率較低，但與其他裝置相比其具有較佳的靈活性，可安裝在較淺或較深的水域中，其安裝複雜且具有較高的繫泊安裝成本，未來將著重在降低安裝成本方向發展。總體來看，預估未來浮動式基座的發展方向將是在單一基座上安裝多個不同類型的渦輪機，並結合其他形式的再生能源(如波浪能發電及太陽能發電)。

此外，近年浮動式離岸風力發電於渦輪機容量、渦輪機殼高度、浮動式設置距離及深度皆有重大的進展，渦輪機容量由 2008 年 0.75MW 成長至 2018 年 2.34MW，成長幅度達兩倍以上；渦輪機高度則由 2008 年 33 公尺成長至 2018 年 63 公尺，成長幅度約為一倍；平均深度亦增加了 7%，達到 65 m；浮動式裝置

²⁵ University of Strathclyde, Glasgow (2019), Offshore wind, ready to float Global and UK trends in the floating offshore wind market.

由 2008 年到 2018 年離海岸平均距離增加了一倍，達到 11 km，並預估 2030 年可達到水深 250m 及離岸 25km(如圖 7)。發展大規模的浮動式風力發電場將是未來的首要目的，除了需持續精進渦輪機的尺寸外，提高渦輪機的輸出功率亦是至關重要的任務。

項目	平均 (2008-2013年)	平均 (2013-2018年)	變化程度
渦輪機容量(MW)	0.75	2.34	↑ 212%
渦輪機高度(m)	33	63	↑ 91%
基座數量	1	1.4	↑ 40%
深度(m)	61	65	↑ 7%
距離(km)	5	11	↑ 120%

圖 7 浮動式離岸風力發電未來趨勢

資料來源：University of Strathclyde, Glasgow (2019), Offshore wind, ready to float Global and UK trends in the floating offshore wind market.

整體來看，未來無論是陸上風力發電或離岸風力發電，為使風力發電的輸出功率提升並降低其發電成本，渦輪機皆將朝大型化的方向發展，透過增加渦輪機的離地高度，使其在風速越強的環境下發電以降低地表摩擦的影響。當渦輪機朝大型化發展，為提高渦輪機獲取風力的能力，其葉片長度亦會隨之增加，因此減輕葉片的重量及提高其硬度為未來風力發電至關重要的發展項目，例如可透過複合材料的使用降低負荷峰值及轉動力矩，以減少渦輪機的負擔並提高發電效率。此外，採用 3D 列印模具製造主要零件(如葉片、機艙及輪轂)亦是未來的發展重點，透過 3D 列印可將零件原型分段輸出並組合成完整模具，不僅可縮短開發時間及降低成本，並可解決零件尺寸過大造成不利運送的困境。

為降低大型渦輪機的故障風險，於渦輪機上安裝感測器並結合無人機巡檢，以即時監控渦輪機的狀況；並透過大數據的概念即時記錄渦輪機運行的相關資訊，以利評估其故障的可能性，提供更精準的渦輪機管理機制。此外，無論是現行渦輪機或未來發展的大型渦輪機，穩定的風向與風速皆有利於發電效率，透過將大氣科學原理應用於能源管理，例如數值天氣預報(numerical weather prediction, NWP)，提供短期預測及長期評估所需的數據資訊，以提升渦輪機發電的穩定性²⁶。

(六)海洋能發電

海洋能源亦為近年來受關注的技術之一，尤其是在歐盟地區，其擁有全球潮

²⁶ International Energy Agency (2019), Results of IEA Wind TCP Workshop on a Grand Vision for Wind Energy Technology.

汐能和波浪能發電量的 78%，現今歐盟地區海洋能源主要以潮汐能源和波浪能源為發展的主軸，並期望兩項技術總發電容量於 2020 年可達到 2,250 MW。現今潮汐能源中水平軸渦輪機是最先進的潮汐能轉換器，從 2008 年至 2018 年間，海洋能源貢獻於電網中的電量主要即是由水平軸渦輪機產生的，近年來許多公司致力開發其他替代裝置技術，例如潮汐風箏裝置及垂直軸渦輪機等。然而潮汐能源在發展上面臨的主要困境為平均能源成本較高，目前較難以廣泛運用在商業上，現今主要透過優化水平軸渦輪機中的動力分導系統，有望將平均能源成本由 400 EUR/MWh 降低至 320 EUR/MWh。

海洋能源中另一項能源技術為波浪能，現今技術發展趨勢以優化吸收器(point absorbers)及發展多樣化的波浪能轉換器(converters)為主，並透過開發浮動式震盪水柱搭配設備使用以提升效率及降低成本，例如浮動式震盪水柱搭配渦輪機使用，以提高其可承受的最大浪高，除可降低 30% 的能源成本外，搭配新型雙徑渦輪機使用效率亦可提升 50%；而浮動式震盪水柱搭配吸收器以供評估系統生存能力及可靠性，並運用介電彈性體(Dielectric Elastomer)改善發電的功率輸出，可使成本大幅降低 60%²⁷。

(七) 生質能發電

近年來先進生物燃料技術為生質能源發展的新方向，透過將林業殘留物、生物廢料及固體廢物等作為燃料的原料，除了廢物再利用外，對土地利用變化幾乎毫無影響，先進生物燃料技術中主要有生化技術(Biochemical technologies)、熱化學技術(Thermochemical technologies)及油脂化學技術(Oleochemical technologies)三項技術。其中生化技術近年來主要針對生物質的預處理技術進行優化；熱化學技術項目則以提高費托合成氧化生物質(Fisher-Tropsch for BtL production)轉化為合成氣體比率為發展重點，例如透過淨化合成氣體以去除焦油、顆粒物質及雜質等，以提高技術使用效率、品質及降低熱能損失；此外亦致力於生化技術中水熱液化(Hydrothermal liquefaction, HTL)將藻類轉化為其他有機成分的研究；並透過油脂化學技術中廢棄油脂轉酯反應(Transesterification of residual/waste oil and fats)尋求可用廢棄原料資源，以提高生成物的產量²⁸。

(八) 地熱能發電

相較於其他再生能源有難以預測及間歇性的特質，地熱發電為具備相對穩定的供電能力，是當今最適合做為基載電力的再生能源。其原理為使用地熱加熱地

²⁷ Joint Research Centre, European Commission (2019), Ocean Energy Technology Development Report.

²⁸ Joint Research Center, European Commission (2019), Sustainable Advanced Biofuels Technology Development Report.

下水形成蒸汽來推動渦輪機發電，並將地熱轉換為機械能，再把機械能轉換為電能。開發地熱能需具備三大地質條件，包含熱源(如火山)、地熱流體(抽出或流出地殼之地下熱水或蒸汽)與裂隙(以提供熱液通道)，依地熱深度又可區分為淺層地熱(地下深度 3 公里以內)和深層地熱(深度超過 3 公里)，前者除了可作為發電之來源外，亦可運用於建築物冷暖空調、乾燥、溫室種植與人工養殖等項目，為現今地熱發電主要的來源；後者則透過地底高溫加熱地下水並產出蒸氣以用來發電，由於不受季節影響與具商業可行性，使得其被各國視為未來地熱發電的發展重點。現今常見的地熱系統有傳統熱液型地熱發電系統(Hydrothermal Geothermal Systems)，包含乾蒸汽式/閃發式發電廠(Dry Steam and Flash Plants)與雙循環式發電廠(Binary plants)，以及加強型地熱系統(Enhanced Geothermal Systems, EGS)。傳統熱液型地熱發電系統主要透過蒸汽渦輪發電機組發電，對地熱場址的蒸汽量及溫度條件要求皆較高；而加強型地熱系統則較適合於深層地熱開發，透過外力破壞無隙岩層形成裂隙，並將水由注入井(injection well)引入熱交換區並在生產井(production well)中將熱水汽化以產生蒸氣進行發電²⁹。

(九) 氫能發電

氫能發電的發展亦為減少溫室氣體排放帶來一股嶄新的機會，各國已開始重視此項技術並逐步推動氫能發電的部署。其原理為以氫作為能源載體，並透過轉換設備將氫、水、生質作物與化石燃料轉換為電能及熱能，結合再生能源整合應用使其被視為深具發展潛力的技術³⁰。現今主要的氫能發電技術有蒸汽甲烷重整(Steam Methane Reforming, SMR)、煤氣化(Coal Gasification)、水電解(Water Electrolysis)及生質氣化(Biomass Gasification)，前兩者技術較為純熟，未來可與碳捕獲及封存技術相結合，水電解則屬發電成本較高的技術³¹。因此，未來氫能發電的發展將著重在突破水電解成本困境，欲透過降低使用稀有金屬催化劑製氫，並開發直接從石化資源中分離氫和碳的技術，以改善水電解耗電及高成本的缺點。此外，由於氫原子是以氣態的形式存在，使得其在儲存及運輸皆面臨穩定性不足的問題，未來技術趨勢將以開發新的合成技術(如有機氫化物)、輕量與高容量的儲氫材料及在溫度和壓力較低的情況下合成氫載體，以改善氫能發電的安全性問題。

(十) 電池儲能及其他儲能系統

為改善環境汙染與碳排放急遽上升的問題，全球愈加重視再生能源發電，由

²⁹ Joint Research Center (2019), Geothermal Energy Technology Development report.

³⁰ Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan (2019), The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells- Industry-academia-government action plan to realize a “Hydrogen Society”.

³¹ Anthony Kosturjak, Tania Dey, Michael D. Young, Steve Whetton/Future Fuels CRC (2019), Advancing Hydrogen: Learning from 19 Plans to Advance Hydrogen from Across the Globe.

上述內容可知，現今太陽能發電及風力發電隨著技術的純熟，這兩項再生能源的成本皆已大幅降低，然而此類型再生能源發電亦受到天氣因素影響，常取決於光與風的密度，屬於間歇性的再生能源，使得能源系統的穩定性及彈性受到考驗。為滿足用戶對於能源的需求並提高能源使用效率，除了持續精進再生能源的發展外，亦需於電網架構中加入電池儲能及其他儲能技術，以提高電網系統的安全性及可靠性。

儲能電池為現今全球致力發展的技術，儲能電池不僅可於電網中部署以達成能源供應及需求的平衡，在離網領域亦被廣泛使用，例如太陽能電池板、混合動力汽車及火車等多項領域。當今常見的儲能電池有鋰離子電池(Lithium-ion Battery)、固態電池(Solid State Battery)及鉛酸電池(Lead Acid Battery)等。

鋰離子電池是目前最常見的儲能電池技術，根據洛磯山脈研究所(Rocky Mountain Institute)的研究顯示，許多天然氣工廠可透過鋰離子電池儲能技術提升能源使用效率外，低成本的鋰離子電池將有助於電動汽車需求快速的成長，因此至 2025 年其將持續於化學儲能市場保持最前沿的地位。然而由於鋰離子電池電解質具易燃的特質，使其在使用上須面臨熱失控的風險，加上現今安全法規上禁止於飛航中使用鋰離子電池，使其面臨運輸上的限制，因而產生其他電池技術與其競爭的機會，其中固態電池技術最受矚目。由於固態電池價格較低廉，約為每千瓦時(kWh)30 至 40 美元，加上擁有不可燃之特性，且可適應寒冷及炎熱的氣候特性使其壽命較長，較適合運用在電動汽車及電網平衡上，因此許多製造固態電池的公司為達成建立電動汽車商業生產線的目標，計劃將固態製程整合至鋰離子電池製造的流程中，以利結合不同電池技術之優勢。而鉛酸電池由於具有反應時間較快速且穩定等優點，因此常作為電網中頻率調解的電池，並應用於風力發電及太陽能光伏發電技術上，然而其壽命較短，與鋰離子電池相比較不易使用在電動汽車上³²。

事實上，過去電池儲能系統投資成本較高，各國政府對於其在電網中的接受度與實施較為嚴謹，然而，隨著電池儲能技術進步與材料成本下降，目前已逐漸被運用在電網系統中，國際分子多樣性保護組織和多學科數位出版研究所(Molecular Diversity Preservation International and Multidisciplinary Digital Publishing Institute, MDPI)對此提出三項電池儲能運用於電網上將面臨的挑戰及因應之道。

第一、針對技術層面，電池儲能系統對電網的影響取決其與電網的連接效率，若電池儲能系統在時間及操作控制方面有所失誤，則將對消費者及公共事業在技術與經濟上造成大規模的損失。因此，透過系統優化及機器學習方式控制充放電的週期以延長電池壽命，並利用完整的檢測標準與防震防爆技術改善電池安全問題，以控制電池儲能系統為未來最關鍵的任務。第二、針對經濟層面，電池儲能

³² Rocky Mountain Institute (2019), Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification.

技術的化學材料將直接影響電池的投資成本，需透過低成本材料取代高成本材料的方式大幅降低成本；此外，電池儲能系統的使用壽命較太陽能電板及風力渦輪機短，重新安裝電池將產生額外成本，故於安裝區域進行審慎的評估為必要進行事項。第三、針對監管層面，為鼓勵企業設置大型儲能電廠並投入相關研究，政府需透過稅收抵免政策鼓勵大規模儲能項目發展，如美國針對特斯拉在澳洲投資電池系統給予 20% 的稅收抵免；此外，電池中的化學物質對環境的影響是另一項監管問題，控制電池回收過程中對環境造成潛在的污染勢在必行，現今歐盟及美國已制定電池回收的相關法令，如歐盟的廢棄電子電機設備指令(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)³³。

此外，除了上述提到的儲能電池外，尚有超級電容器(Supercapacitor)、飛輪儲能(Flywheel energy storage)、超導磁能儲存(Superconducting magnetic energy storage)及抽水蓄能技術(Pumped storage technology)³⁴的儲能技術亦不容小覷。

超級電容器技術又可稱為雙層電容器，採用特殊的電極結構使電極的表面積增加數萬倍，進而產生巨大的電容量，由於其可用於短時間內有高能需求及高功率的項目，因此對電動汽車及備用電池產業帶來重大的衝擊。近年來其功率密度已提升數千至數萬倍，未來有望運用於運輸、電網儲存及消費性電子產品上。而超導磁能儲存為透過零電阻的超導磁體形成超導圈以產生電感，從而產生充電後線圈周圍的磁場，將電能以磁能的形式保存在系統中，儲存的能量亦可透過逆變器傳輸回電網中，然而其於安全性及可靠性上仍有疑慮，未來將持續針對此問題進行改善。飛輪儲能技術則為另一項純熟的技術，此技術透過電動機驅動飛輪以極高的速度旋轉，並將飛輪產生的動能轉化為電能形式儲存，常用於工業及不間斷電源系統(Uninterruptible Power System, UPS)中配電系統運行的頻率調節器，以緩解電力傳輸壅塞的情形，另外亦可與電池儲能系統及超級電容器等其他形式的儲能技術搭配使用。抽水蓄能技術為搭配水力發電的儲能技術，其在電網處低負荷的期間利用電力將水由下方蓄水池抽至上方，再將水由上方釋放至蓄水池，透過高低差發電並儲存電力，以供電網處高負荷期間使用，為一種將電網電力重新分配的技術。此項技術為電網帶來彈性及可靠性，主要常運用在能源管理及系統備用電源上，位於台灣南投縣明潭水力發電廠即是水力發電搭配抽水蓄能技術的案例之一。

(十一)智慧電網

不論是非再生能源領域、再生能源領域，又或者電池儲能及儲能系統皆於近幾年有重大的突破及進展，然而隨著上述技術的發展逐漸成熟，傳統的電網技術

³³ Molecular Diversity Preservation International and Multidisciplinary Digital Publishing Institute (2019), Assessment of Battery Storage Technologies for a Turkish Power Network.

³⁴ APEC Energy Working Group (2019), Research on Integrated Multi energy System to Improve Energy Efficiency and Enhance Technological Progress of Renewable Energy in the APEC Region.

及架構已不足以應付現今的電力系統，為此需透過開發新型態的電網架構，以提升未來電力系統的供電效率與安全性。為此歐洲能源轉型智慧網路科技與創新平台(European Technology & Innovation Platform of Smart Networks for Energy Transition, ETIP SNET)整理目前的發展趨勢，詳加介紹了四項新型態電網架構的概念與優點如下³⁵。

細胞網絡(Web of Cells, WoC)是由歐洲資助的智能電網綜合研究計畫(European Liaison on Electricity Committed Towards long-term Research Activity, Integrated Research Program, ELECTRA IRP1)提出，並以未來電力系統屬高度分散且再生能源占比的概念下開發，為一項新型態的電網控制架構。透過細胞網絡架構可以分散控制的概念於電網中部署監測系統和感測器，有助於整個電網在成本較低的條件下實現有效的電壓及頻率控制系統。

此外，由於現今分散式間歇發電量的提高改變了電力系統的運行，使得電力控制系統從傳統的集中式轉變為分散式，IDE4L(Ideal Grid for All)分層與分佈式電網架構亦因應而生。其透過自動化系統的概念建立監控、控制、商業案例及智慧電網技術模型(Smart Grid Architecture Model, SGAM)，更有效率地利用小型的分散式能源(Distributed Energy Resource, DER)進行傳輸和分配系統的管理，增強了配電網絡的可觀察性和可控性，以提升營運成本的效益。

而智慧型網絡(SmartNet)則在物理、市場參與者和資訊及通訊科技(Information and Communication Technology, ICT)三層架構下，以集中式輔助服務(the Centralised Ancillary Services, AS)市場模型、Local AS 市場模型(Local AS market model)、共享平台責任模型(the Shared Balancing Responsibility model)、一般傳輸系統運營商和配電系統運營商市場模型(Transmission system operator and Distribution system operators market model, TSO-DSO market model)和整合彈性市場模型(the Integrated Flexibility market model)架構而成，主要目的在協調地方電網營運商之間的利益，並透過資訊交換以達到監控及獲取輔助的服務。

最後一項為節點連接整體架構(Link-Based Holistic Architecture)，透過將整個系統劃分為明確定義的節點，並重新組織電網、電力生產、儲能系統及消費者管理，每個節點除了有自己的控制系統外，亦有與其相鄰節點的接口和市場。此項架構有助於整個電網系統在高、中及低電壓水平下建立服務模式，亦有助於模擬廠商與電網系統運行過程，如負載產生平衡(load-generation balance)、電壓評估、動態安全流程、價格和緊急需求反應。

透過上述新型態的電網架構將有助於未來電網系統結合再生能源及多項儲能技術的發展，除了可抵禦電網遭受外部威脅並確保數據隱私安全外，亦為電力部門提供經濟實惠且有效率的處理方式。

³⁵ European Technology and Innovation Platform of Smart Networks for Energy Transition (2019), White Paper: Holistic Architectures for Future Power Systems.

此外，電力系統數位化亦是未來備受關注的項目，透過數位化方式將再生能源發電以更具連貫性、智慧性、可預測性及永續性的方式與電力系統相互結合，並與其他部門相互合作，例如智慧電網除具有整合間歇性電力的能力外，亦可結合電動車的儲能優勢將其併入電網，以激勵電力儲存技術的應用並促進智慧化交通運輸的發展³⁶。

³⁶ United Nations Conference on Trade and Development (2019), The Role of Science, Technology and Innovation in Promoting Renewable Energy by 2030.

四、結論

自全球政府及人民意識到溫室氣體過度排放造成全球暖化後，為解決此項棘手且迫切的問題陸續通過許多國際公約及協定，如 1992 年的《聯合國氣候變化綱要公約》、1997 年的《京都議定書》及 2015 年的《巴黎協定》，以期達成減少二氧化碳排放量及能源轉型的目標。然而，由於全球經濟發展致使各國對於能源需求增加，化石能源使用的需求隨之增加，導致全球二氧化碳減排進度停滯不前，也使得清潔化石燃料、核能發電及再生能源等發電技術的發展持續受到重視。

目前備受關注的發電技術主要有三項，分別為清潔煤技術、分散式太陽能光伏發電技術及浮動式離岸風力發電技術。清潔煤技術已廣泛被各國使用，其中超臨界及超超臨界燃煤發電技術已進入成熟應用的階段，除了燃煤發電外亦可與生物質能搭配進行耦合發電。分散式太陽能光伏發電則持續於光伏發電占極高比例，其可靈活安裝的優勢使用戶端自行於所在地建造發電設備，使全球政府亦提出激勵政策鼓勵此項技術的發展。浮動式離岸風力發電於基座的設計上有重大的突破，預計至 2022 年半潛式浮動式基座將會取代深水浮筒式，成為市場上使用占比最高的基座。

除了清潔煤技術、分散式太陽能光伏發電技術及浮動式離岸風力發電技術外，亦有其他值得關注的再生能源發電。海洋能發電主要針對潮汐能源和波浪能源兩項技術發展，近年來潮汐能源發展主要以開發潮汐風箏裝置及垂直軸渦輪機等替代裝置作為發展主軸。波浪能源則以精進吸收器與波浪能轉換器作為發展目標。而生質能發電方面為提高技術使用效率及品質，近期主要朝生物質的預處理技術發展。地熱發電相對穩定的供電能力使其備受重視，現今主要以淺層地熱作為地熱發電的主要來源，未來將以不受季節影響供電的深層地熱發電做為發展的核心。氫能發電則為深具發展潛力的再生能源發電，透過氫氣作為能源載體並結合其他再生能源整合應用進而轉換為電能及熱能，為近年來各國逐步進行部署的技術，其中蒸汽甲烷重整及煤氣化為氫能發電較為純熟的技術，未來氫能發電將針對降低水電解的成本及解決耗電問題作為發展主軸，並開發新的合成技術、儲氫材料及氫載體以改善其安全性問題。

此外再生能源發電占比逐年提高，為了提高能源系統的穩定性及安全性，除了於電網架構中加入電池儲能技術外，亦持續發展其他儲能技術。現今常見的儲能電池為鋰離子電池，現今鋰離子電池已被大量運用在商業上，然而考量到安全性因素，固態電池將會是可與鋰離子電池相匹敵的競爭對手。而超級電容器為其他儲能技術中最常見的，近年來其功率密度已有大幅度的提升，未來將可運用在運輸及消費性電子產品等領域。

隨著上述技術的發展與突破，開發新型態的電網架構亦是勢在必行的，現今已有多項技術持續受到關注，例如細胞網絡技術、IDE4L 分層結合分佈式電網、

智慧型網絡等，如何取代傳統電網架構並結合清潔能源與儲能系統，將會是未來全球市場持續關注的焦點。

【附錄】

2019 年科技發展觀測平台收錄能源科技相關之文獻總共 1,302 篇，依國家別、文獻類別及領域別之收錄篇數統計如表 5 至表 7 所示，國家別與次領域別之統計均包含複分計數，故篇數總計均多於文獻類型別的收錄總計。

表 5 2019 年能源議題收錄文獻篇數統計－國家別（含複分國家）

亞太地區	澳洲	中國大陸	歐盟	芬蘭	法國	德國	全球	日本	加拿大
49	50	63	94	4	12	34	359	32	15
韓國	荷蘭	新加坡	瑞典	瑞士	臺灣	英國	美國	紐西蘭	其它
11	13	132	10	11	68	90	201	19	46

表 6 2019 年能源議題收錄文獻篇數統計－文獻類別

政策文件	法規/規範	研究/分析 報告	研討會論文	期刊論文	新聞/訊息	簡報資料	總計
94	20	523	15	55	579	16	1302

表 7 2019 年能源議題收錄文獻篇數統計－次領域別（含複分領域）

能源科技總論	能源科技政策	非再生能源	再生能源	能源管理	其它
182	147	297	494	192	14