

關鍵議題評析：

2050 年再生能源路徑研究

—經濟成長與氣候目標可兼顧

謝雯凱

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

國際再生能源總署於 2018 年首次發布 2050 年再生能源路徑之推估研究，描述全球再生能源技術與政策之推展情境、經濟與社會影響，並於 2019 年更新修正報告，擴充並深化內容，對於未來發展更加樂觀。

「全球能源轉型：到 2050 年的路徑(2019 年版)」報告中指出，在其規劃的 Remap 情境下，巴黎氣候目標是可達成的。2050 年時儘管全球人口增長 17 億，用電量倍增，但電力占整體能源消費的比例，將從現今的 20% 提高到 49%，其中再生能源電力將占整體發電量的 86%，使得全球溫室氣體排放量不增反減，假使再計入能效提升的影響，能源相關溫室氣體排放將較現在降低 90% 以上。

除再生能源大幅增長，各能源消費部門的電氣化比重也提高，特別是公路運輸與供暖領域。藉由減少化石燃料發電、能源效率提升，可減少空氣污染、降低化石燃料補貼等多重效益。2050 年，能源轉型將使全球國內生產總值增長 2.5%。到 2050 年之前，減少的補貼、避免的環境與健康損失等，將可省下 65-160 兆美元之間，約為能源部門額外投入成本的 3-7 倍，足堪證明能源轉型具有經濟效益。

關鍵字：能源轉型、再生能源、綠色經濟

一、前言

國際再生能源總署 (The International Renewable Energy Agency, IRENA) 自 2013 年以來，陸續投入 2030 再生能源路徑研究計畫 (Remap 2030 - Renewable Energy Roadmaps)。此計畫邀集各國專家學者探求最終能源消費中，再生能源占比倍增之可能路徑[1]。研究考慮技術發展、市場機制、減碳趨勢，乃至於各消費端部門的能源使用情境，納入能源效率、國際合作等不同影響因素。

2016 年巴黎氣候協定 (Paris Agreement) 生效後，各國須上傳詳述減碳規劃的國家自訂貢獻 (Nationally Determined Contributions, NDCs)，並在聯合國氣候變遷綱要公約框架下，積極討論長期策略與願景，時程多訂於 2050 年。呼應此國際溫室氣體減量之籲求，IRENA 開始發展 2050 年的全球再生能源路徑規劃與推估，並於 2018 年 4 月發表「全球能源轉型：至 2050 年路徑」(Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050)(以下簡稱「至 2050 年路徑」)。

「至 2050 年路徑」以兩種情境做為內文討論主軸：

1. 「參考情境」(Reference Case)：亦即各國所提出的 NDC 規劃下順利推展之情況；
2. 「Remap 情境」(REmap case)：各國政策上積極節能減碳，低碳技術也順利推廣，並控制全球升溫不超過 2°C 的情況。

「至 2050 年路徑」推估，在參考情境中，全球升溫將達 2.6°C-3°C，但若積極節能減碳，仍有 66% 的機率可達成 Remap 情境，屆時再生能源占最終能源消費比例將從參考情境的 25%，提高至 Remap 情境的 65%，溫室氣體的累積排放量將減少 4,700 億噸 [2] [3]。

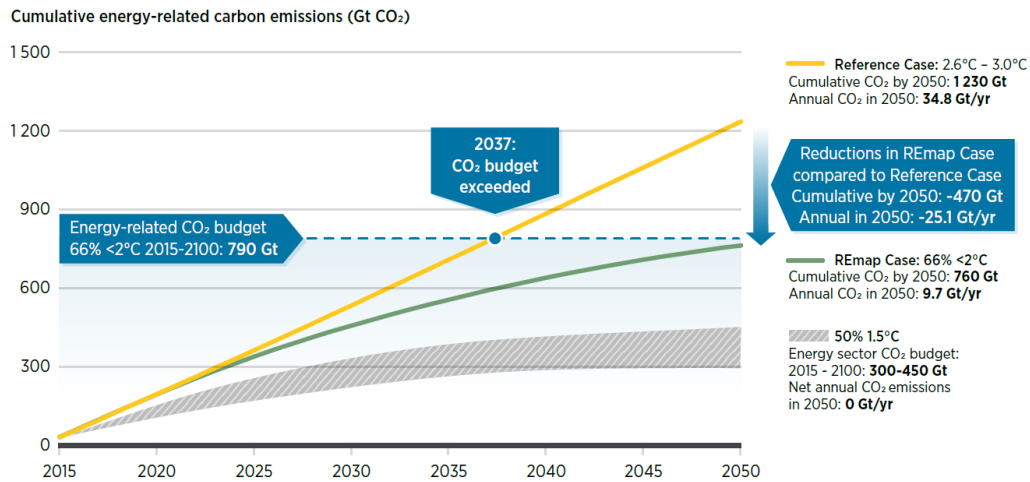


圖 1、Remap 2050 報告 2018 年版提出的減碳情境比較圖[3]

「至 2050 年路徑」也著重分析主要的能源終端消費部門(運輸、建築、住宅)與電力部門導入再生能源之不同特性，並提出能源消費電氣化、電力低碳化的未來趨勢。報告也強調 Remap 情境技術可行，雖需投入財務成本，但整體而言具有經濟效益，同時提高就業機會與社會福祉。此報告並提供政策決策者六個行動重點領域，包括 (1) 深入挖掘並放大能源效率與再生能源綜效；(2) 規劃能導入高比例再生能源的電力系統部門；(3) 提高運輸、建築與工業部門中的電氣化占比；(4) 促進系統層面的創新；(5) 社會經濟結構與投資，需和能源轉型步調一致；(6) 確保能源轉型的成本與效益能公平分配。

IRENA 於 2019 年 4 月再度發布同名報告的 2019 年版本，架構內容延續前一年度報告，內容均加以深化、更新，並就 REmap 情境之未來效益提出更精細的數據。以下章節摘述 2019 年版本內容進行說明。[4]

二、再生能源已是進行式 能源部門結構性改變

因再生能源技術進步、電網自動化、需量反應導入、風力、光電裝置成本降低等，均促成全球再生能源設置量進展加快(圖 2)。報告指出，各國政策與減碳願景應隨之加強，以加快再生能源佈署。

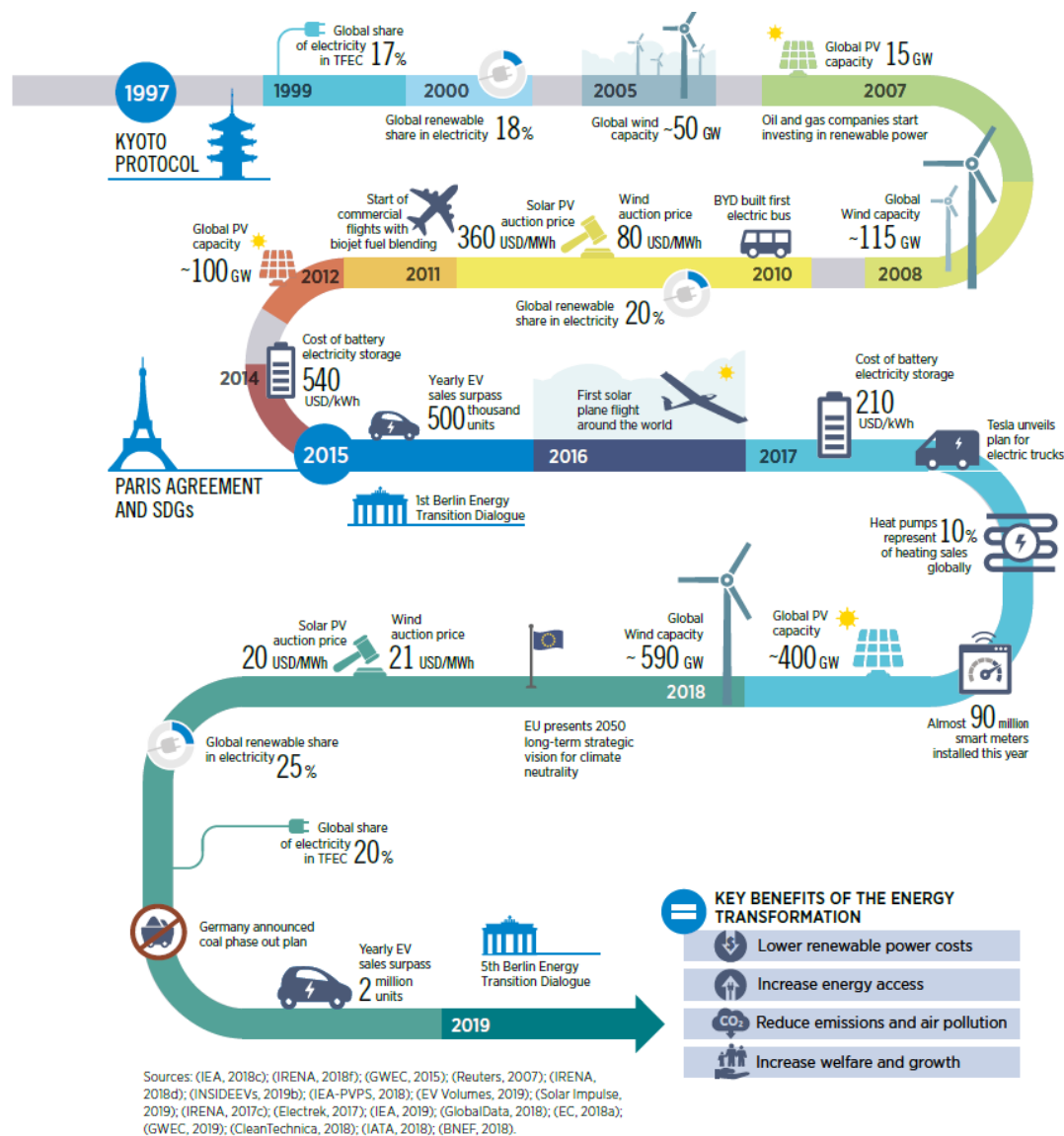


圖 2、近 20 年再生能源進展里程碑[4]

觀察近二十年的全球再生能源發展趨勢可發現，自 2010 年以來，再生能源電力每年以 8-9% 速度增長，過去 7 年來新增裝置容量均超過燃煤火力發電與核電，其中又以中國大陸的再生能源裝置容量新增量占比最高。新增再生能源以風力與太陽光電為主，其成本在許多國家與區域都有明顯下降，在歐洲，離岸風電成本甚至可在市場上競爭。企業對再生能源電力的需求也與日俱增，IRENA 推估光是此塊市場在 2017 年便達到 4,650 億度，相當於整體電力需求的 3.5%。

至於終端消費部門的用電型態現狀分析，「2019 年版報告」指出公路運輸與供暖的電氣化有所進展，包括：

1. 電動運具在 2018 年賣出 200 萬輛 (含純電動車與可充電油電混合車)，較前一年成長 58%，至 2018 年底全球共有 560 萬純電動小客車上路。電動公車數量亦成長顯著，特別是在中國大陸。
2. 供暖電氣化部分仍待加強，部分國家有較強的政策推力，如丹麥 2018 年時宣布在全國設置 13 處區域電熱泵計畫。

因應再生能源發展與全球電力需求成長，2019 年版報告所推估的趨勢，在既有政策參考情境下，全球化石燃料消費將在 2030-2035 年之間到達峰值，但若要達到巴黎協定目標，必須在 2020 年之前便達到峰值，爾後開始降低。這意味許多國家的能源政策，並不符合巴黎氣候目標 (控制全球升溫不超過 2°C，同時盡力限制升溫在 1.5°C 以內)，還會使全球增溫 2.6°C，請參見圖 3。

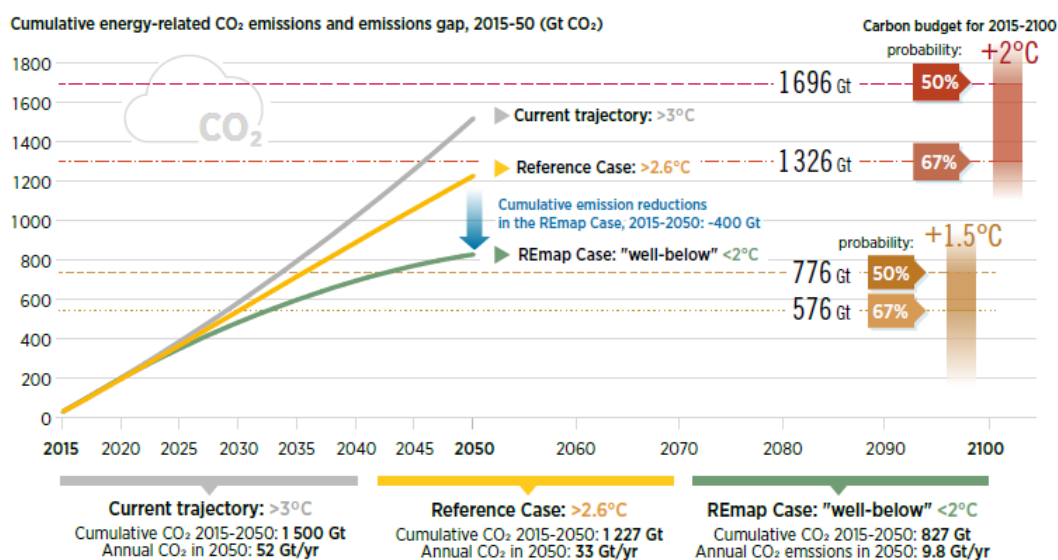


圖 3、兩種情境能源相關碳排放趨勢比較[4]

「2019 年版報告」所揭示的 Remap 情境推估，2050 年時，電力占整體能源消費的比例，將從現今(2016 年)的 20% 提高到 49%，屆時因為新興的電氣化，全球整體電力消費將需增加一倍，如電動運具增加至 10 億輛、電熱暖氣廣泛採用，與利用再生能源產製的氫能。與此同時，再生能源電力將占整體發電量的 86%，目前僅約為 25%。

Remap 情境下，風力與太陽光電大幅成長，水電亦倍增。圖 4 呈現全球 2050 年時的發電結構推估，屆時煤炭大幅減少，燃油發電將減少趨近於零，天然氣與核能發電發電量約持平並略微減少，但占比大幅降低。圖 4 左側電力消費端參考情境與 Remap 情境的主要差距，包括總用電量 Remap 情境因高度電氣化而較多，運輸部門的電氣化程度也高出許多。

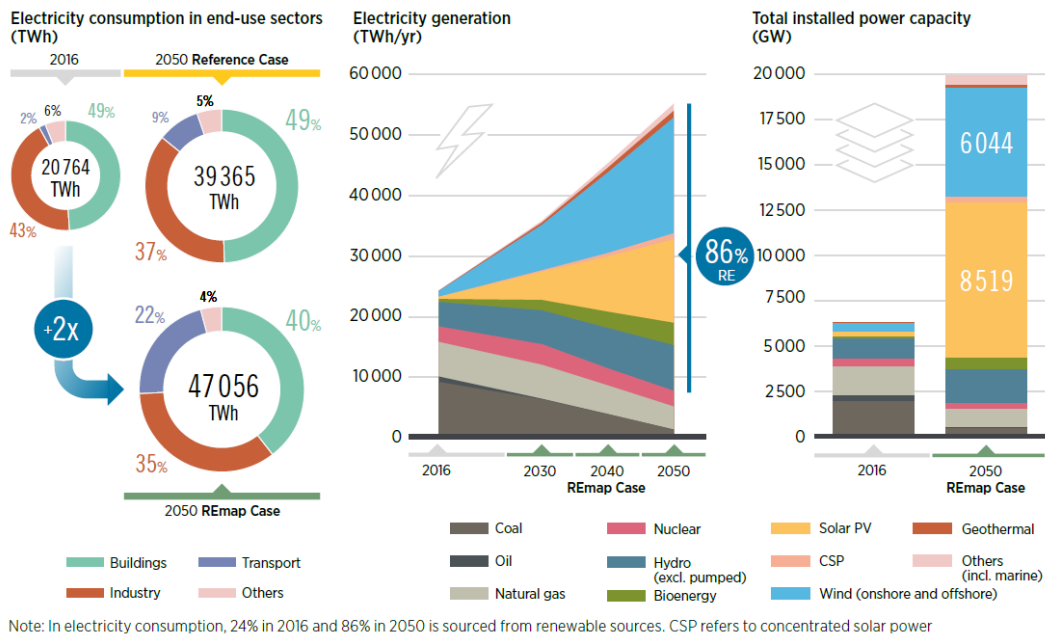


圖 4、Remap 情境下，全球電力結構變動趨勢[4]

發電方式大幅度轉向再生能源，將使能源相關的溫室氣體排放降低 60%。若考慮供暖與運輸電氣化的成果，削減的排碳量可達到 75%。假使再計入能效提升的影響，能源相關溫室氣體排放將較現在降低 90% 以上。

主要的減碳貢獻來自於以再生能源電力導入電氣化的領域，此外加上生質燃油、生質能區域供熱等非電力方式直接使用再生能源，總計再生能源的減碳貢獻度達 75%，如圖 5 所示，影響範圍涉及各消費部門。

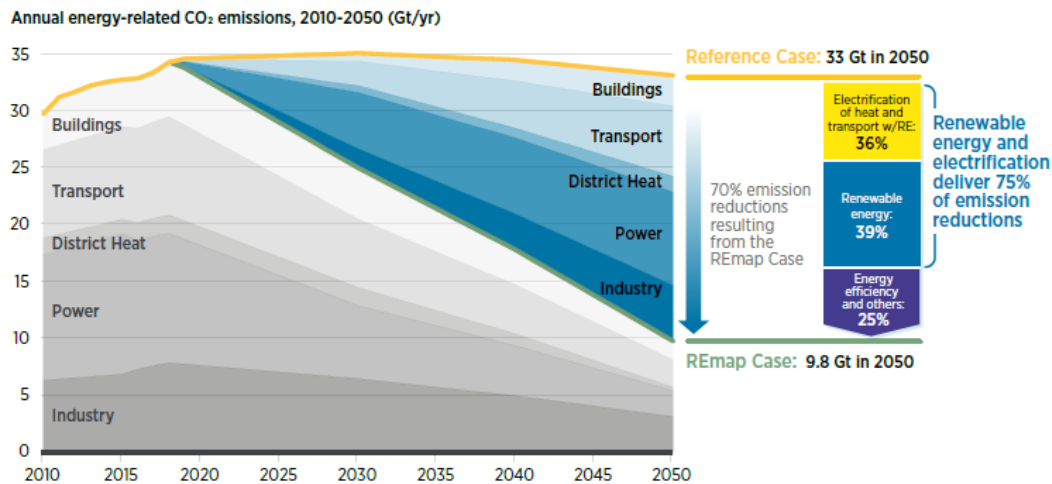


圖 5、再生能源與能源效率創造 9 成的溫室氣體減量[4]

依照參考情境之推估，再生能源占整體能源消費比例，每年僅增加 0.25%(相較於 2016 年)，但 Remap 情境中，每年須增加 1.5%，為參考情境之 6 倍，如圖 6 所示。如前所述，Remap 情境不僅是再生能源電力比例增加，消費端直接使用再生能源的比例也需提高，特別是運輸部門的生質燃料，與區域供熱的生質能和廢熱等。

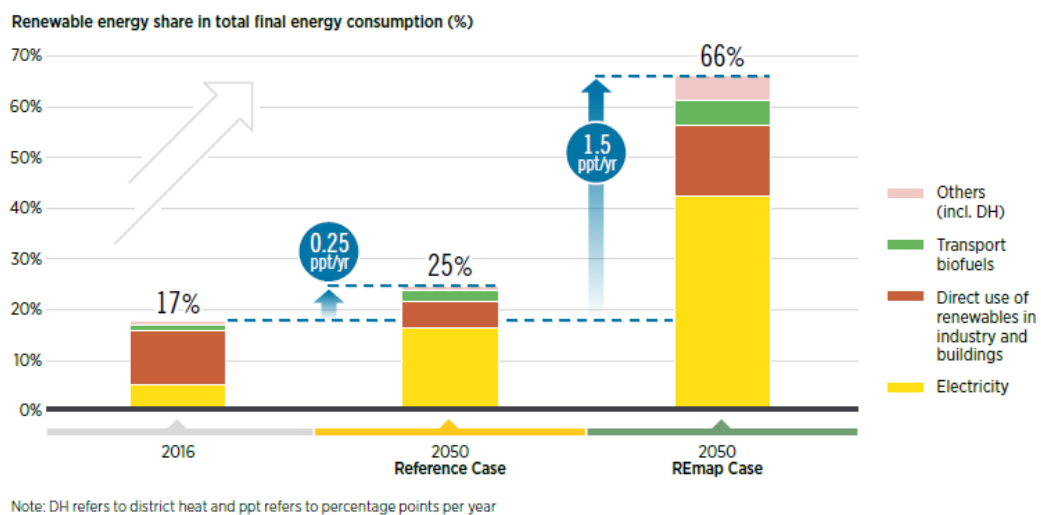


圖 6、兩種情境下再生能源占整體能源消費之比重[4]

Remap 情境中呈現的再生能源比例，均較其他國際研究報告的推估樂觀，可參見圖 7，Remap 2050 情境低於國際能源總署的「世界能源展望」

(World Energy Outlook, WEO) 2018 年版，或是 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 於 2017 年發表的「全球升溫 1.5°C 特別報告」。圖 7 同時驗證，當再生能源占比較高時，整體的能源需求量也較低，意謂全球能效提高。

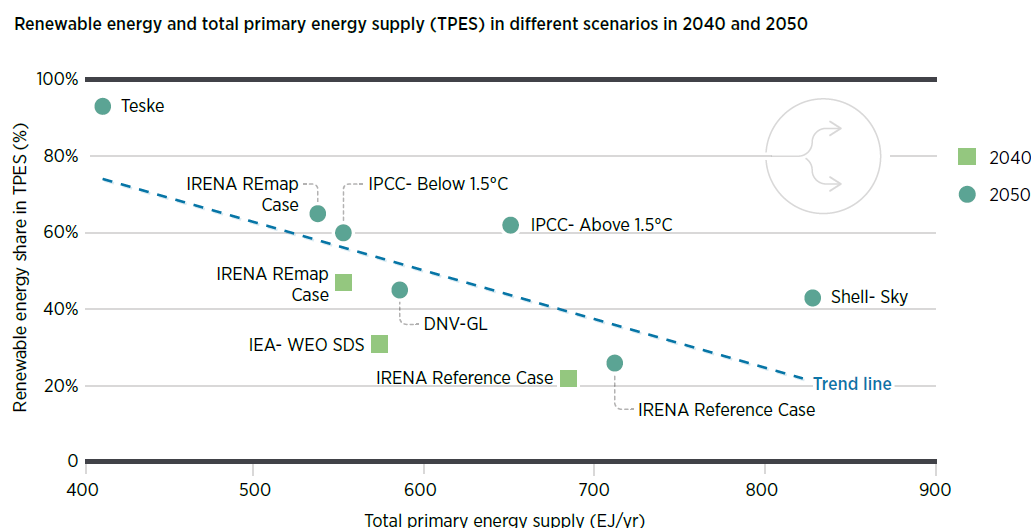


圖 7、不同報告所推估再生能源情境之占比之比較[4]

因應高再生能源占比，各國需強化電力系統彈性的投資與法規環境，例如應用數位技術管理電力供需，或以法規容許電力消費者可同時兼營再生能源發電(Prosumer)，與各領域電氣化趨勢，亦即從技術、法規環境乃至消費市場全面性的革新。

三、能源消費走向電氣化 消費總量亦降低

Remap 情境下，能源相關減碳量主要來自於能源消費端的電氣化，以及發電方式轉換成以再生能源為主，輔以能源效率，最終為能源終端消費的樣貌帶來巨幅改變。

因積極導入電氣化，並納入能源效率因素，Remap 情境中所描繪的建築、工業與運輸三個終端能源消費部門，再生能源利用比例都較參考情境要高，而整體能源消費量都能抑低，如圖 8 所示。在 Remap 情境中，2050 年時：

1. 即使人口約增加 17 億，全球能源需求仍將略低於現在，主要是因為再生能源產製電力較化石燃料發電過程的能源損耗要少，若是車輛與暖氣電動化，也會比直接燃燒燃料要更有能源效率。
2. 因應未來都市化程度更加提高，降低空汙的需求也將提高。屆時全球電動車將超過 10 億輛，70% 的汽車、公車、卡車與二輪、三輪運具都改為電動化，加上軌道為主的大眾運輸、單車使用占比提升，降低私人運具使用，導入大數據、共享服務、自動駕駛、能源管理等智慧城市的新興技術，可進一步降低運輸的能源消費。
3. 航空、航運領域將應用永續來源的生質燃料，可大幅降低碳排放。
4. 由再生能源產製的氫氣未來會扮演較重的角色，產製過程將占電力消費的 8%，但氫能的多元應用將進而降低化石燃料的使用。
5. 工業與建築部門的電力使用占比將倍增，未來溫帶與寒帶的新建築將需朝向淨零耗能設計，以減少暖氣能耗。

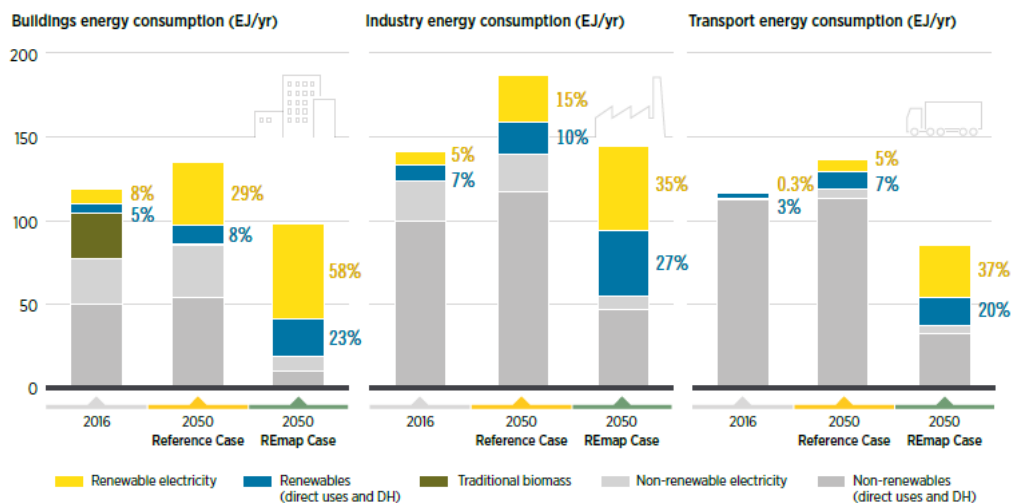


圖 8、建築、工業與運輸部門導入再生能源之占比推估[4]

2050 年時 49% 的能源使用形式為電力，其中有 86% 電力產自再生能源。此外，77% 的區域供暖由再生能源產製，先進生質燃料也提高到 16%。相對而言，汽油、煤炭的使用均大幅降低，有效減少空汙與碳排放。整體的能源使用，則從 395EJ 降低至 351EJ。

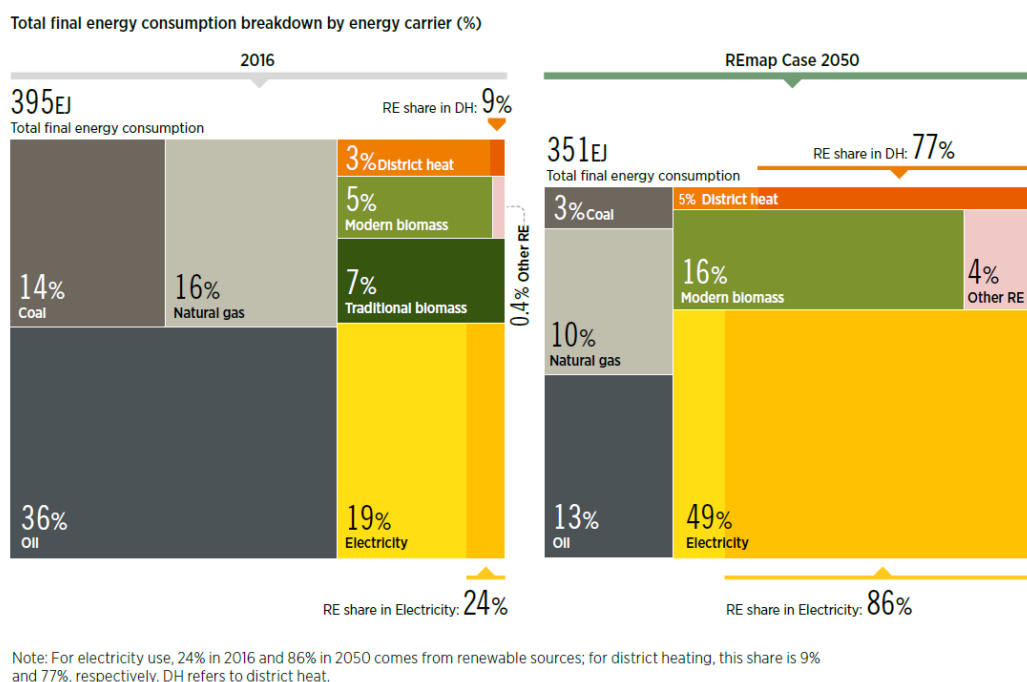


圖 9、Remap 情境下，2050 年能源消費形式將以電力為主[4]

Remap 情境的能源效率表現較參考情境要高，圖 10 呈現 2016 至 2050 年間各種情境的能源密集度年改善率，參考情境與現狀近似，但 Remap 情境則較參考情境每年高 0.8%。拆解能效改善的個別貢獻因素，除了能效措施外，電氣化與再生能源占比提高都有助於能效提升。

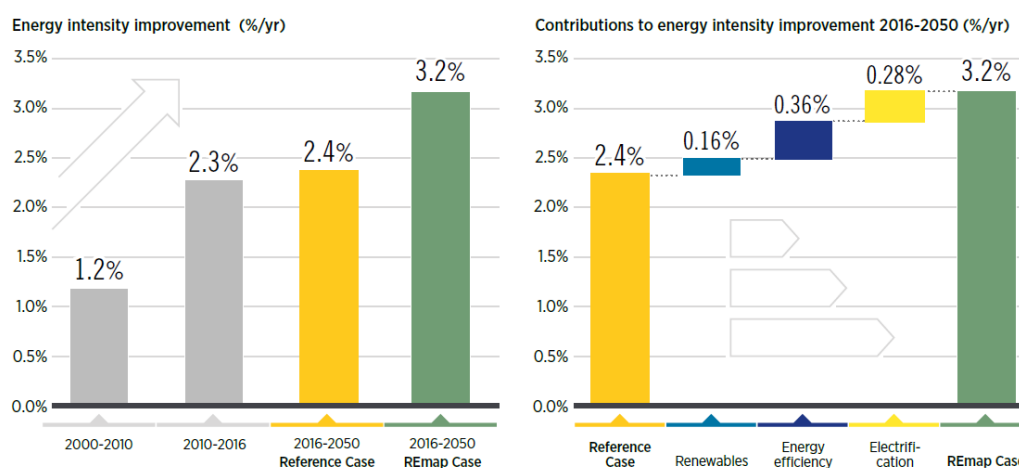


圖 10、不同情境能源密集度年改善率比較與因素分解[4]

四、能源投資版圖改變 綠能具有經濟效益

國際再生能源總署的 REmap 系列研究著重於評估再生能源發展所帶動的相關經濟效益，特別是投資與就業兩項指標。

報告推估，2050 年之前全球將投資在能源部門上(基礎設施與能效)的經費規模，參考情境下是 95 兆美元，而 REmap 情境則須達 110 兆美元。光是投資在再生能源、能效與電氣化技術上，總額即超過約 90 兆，繼續投資在化石燃料、核能與碳排放捕捉技術等的金額也較參考情境大幅減少 (圖 11)。再生能源市場規模也順勢成長，2018 年包含大型水電建設，全球再生能源投資額約 3,320 億美元，2030 年將達每年 7,300 億，2050 年略減為每年 6,800 億美元，仍為現在年投資額的兩倍。

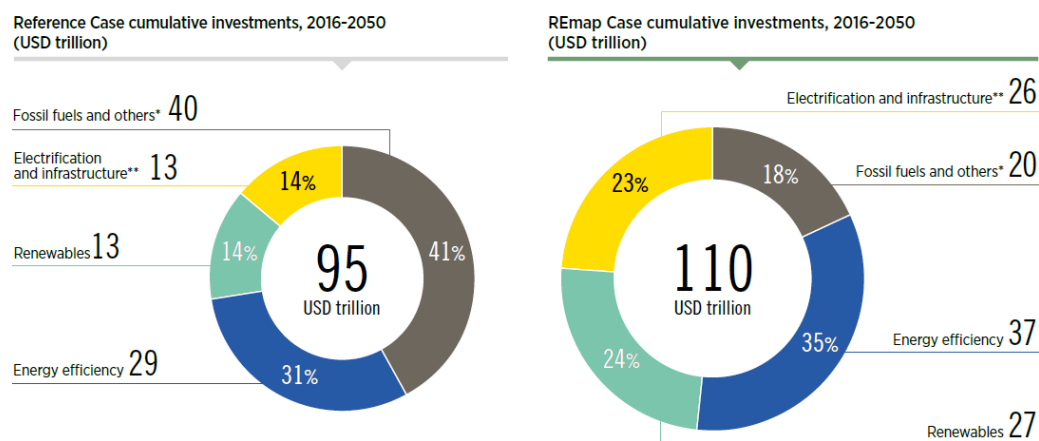


圖 11、不同情境能源部門投資結構推估[4]

REmap 情境下，2050 年，能源轉型將使全球國內生產總值(GDP)增長 2.5%，總就業人數增長 0.2%。減少的空汙、溫室氣體同時將帶來正面的社會綜效。報告發現，從現在到 2050 年間的 30 多年內，減少的補貼、避免的環境與健康損失等，將可省下 65-160 兆美元，約為能源部門額外投入成本的 3-7 倍，亦即每投入 1 美元於能源部門轉型，將可獲得 3-7 美元的回報。圖 12 中顯示不同情境下投資能源轉型所節省的成本比較，都以降低室內空氣汙染所避免的外部成本最多。

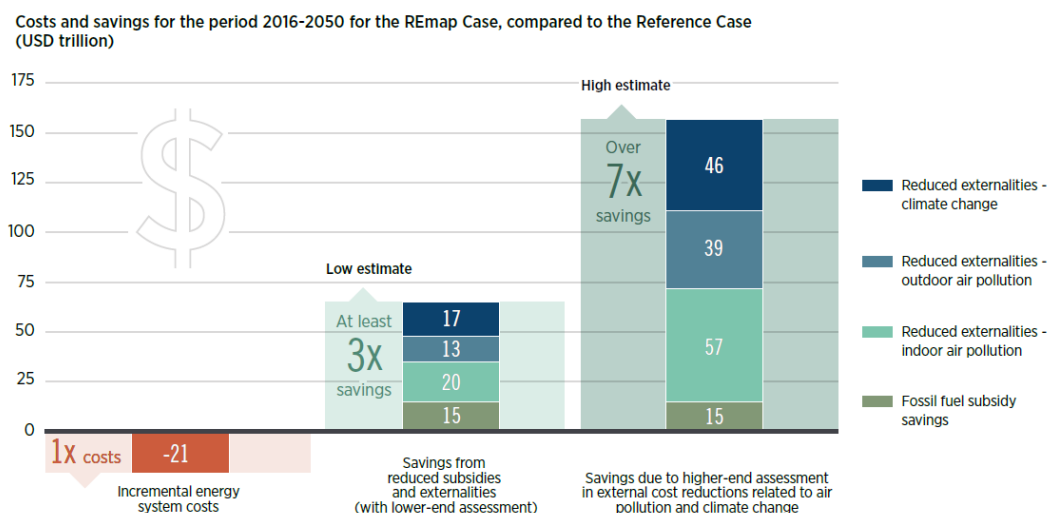


圖 12、不同情境下投資能源轉型所節省的成本比較 [4]

能源系統原本就會因為用電消長、電網更新等因素而需要維護成本，報告推估，2050 年當年度 REmap 情境將較參考情境多支出 1 兆美元成本，累積成本則約 21 兆。但從節能減碳、減少化石燃料投資、空汙改善進而減少醫療支出等方面來計算，2050 年時每年將節省 5.3 兆的成本。

過去對於化石燃料的不當補貼也可趁此修正。2015 年，全球能源對能源部門的補貼總額 6,050 億美元，其中 74.4% 為化石燃料補貼，總額為 4,500 億，再生能源發電部分僅獲得 1,100 億，液態生質燃料則獲得 250 億。現有政策的參考情境並未能扭轉此過高的化石燃料補貼，2050 年當年度的化石燃料補貼規模將達 8,650 億美元，但 REmap 情境下，將能降低至每年 4,700 億美元，補貼將轉往能效與再生能源等其他領域。

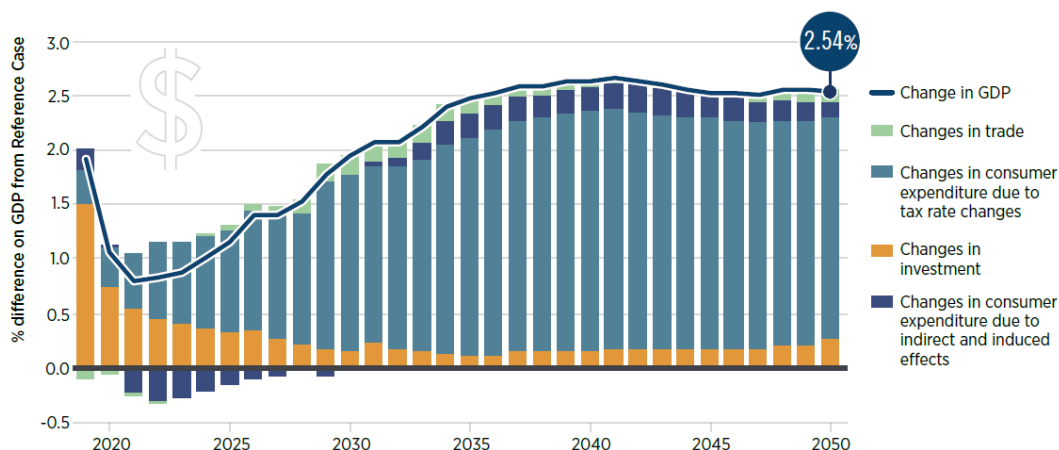


圖 13、由 GDP 相關因素比較兩種情境 2019-2050 年間差距[4]

圖 13 顯示，Remap 情境下推估 2050 年時 GDP 較參考情境高 2.5%，但兩種情境年度增長率差距不大。IRNA 經濟推估的模型主要考慮貿易、投資量、稅率變化導致的消費支出，以及因能源轉型直接或間接影響的消費支出變化。短期間，主要的 GDP 消長驅動力來自於再生能源裝置容量與能源效率的先期投資，但長期影響則以稅率變化為主，主要指碳稅引入或化石燃料補貼政策減少，可能影響家庭可支配所得。貿易量變動受到能源轉型影響並不大。

前述的 GDP 預估納入了氣候變遷帶來的損害影響，在 2050 年的參考情境與 Remap 情境中，全球 GDP 分別減少 15.5%與 13.2%。如果能避免氣候衝擊，2050 年度全球 GDP 最高將可增長 5.3%。

在就業方面，全球在化石燃料相關領域的職位將會減少，但會被更多來自再生能源、能效、能源彈性相關的新增職位所補上。不過，整體經濟中的就業人數僅成長 0.2%，加上職位新增與減少各有其地理區域分布，與時間上的落差、技能教育上有待銜接等因素，因此政府應提出政策妥善協助由化石燃料產業退下的勞工，減少整體經濟中因能源轉型而導致的失業或轉職的時間、人數。

能源轉型背後，社會經濟結構也在改變，報告建議應考慮公平與公正轉型(just transiton)概念，同時促使各國或區域政府提高節能減碳的目標企圖，

帶動投資，進而產生社會與經濟效益。各國也可協助低收入國家順利轉型，例如確保其獲得足夠資金、政策能兼顧政策成果或經濟衝擊公平分配，以減少對這些國家的負面影響。

五、各國政府應提高再生能源目標 並投入行動

2019 年版本報告同樣在文末整理出給決策者的建議，鼓勵各國政府立刻投入行動：

1. 電力部門需待轉型，以因應不斷增長的變動性再生能源比重

- 開發具備高度技術彈性的電力系統（藉由彈性供電、傳輸、配電、儲存、需量反映、電力轉換至其他形式(Power to X)、電動車等），同時操作上也應具彈性。
- 市場信號機制需強化，讓彈性的技術資源能進場，以因應變動性再生能源的不確定性與變動。例如，包含即時變化的定價機制，或更短的交易間隔時間。
- 電力市場將需重新設計，以促成對高占比變動性再生能源電力系統的最佳投資方式，並得以跨部門耦合(sector coupling，意為不同部門彼此聯結，可為某件事情帶來加乘或整合上的益處，如本報告指稱之再生能源)。

2. 數位化是進一步擴大能源轉型的關鍵要素

- 應用各種數位技術，可將智慧創新轉換為智慧解決方案。數位創新（諸如人工智慧、物聯網、區塊鏈等）正持續增加，並可能會以許多不同且積極的方式影響電力系統。
- 隨著電力部門中變動性再生能源的占比開始上升，整體系統的彈性將需提升。其中一個較大潛力的彈性調度方式，將是能夠把電力需求轉移到電力供應也很大的時段；智慧電表、數位網路，與連網電器設備，都有助於促進這類使用時間上的轉移。

3. 加速運輸和供熱部門的電氣化，對下一階段的能源轉型至關重要

- 應需支持電動汽車充電基礎設施之設置。隨著上路的電動汽車數量不斷成長，應該在已建立優良案例之後，開始設計充電設備的激勵措施，開啟這塊市場。
- 應推廣替代性供熱技術，如應用於工業(用於低溫設備)與建築物的熱泵。
- 電力部門與終端消費部門需耦合。電氣化策略必須仔細規劃，且顧及更廣泛的社會變遷。以電動車為例，智慧充電設施可強化電力系統的彈性，在優化整合變動性再生能源，同時避免電網雍塞上，具有重要角色。

4. 再生電力產製的氫氣有助於減少對化石燃料的依賴

- 首要建立穩定和支持性的政策架構。為使快速規模化，需要一套全面性的政策，鼓勵廠商適切地在整個氫能供應鏈中投入經費（包括設備製造商、設施維運商、氫能運具製造商等等）。
- 需提出特殊工具以降低基礎設施投資風險，並提高供應鏈的經濟效益。
- 以再生能源電力產製氫氣應有認證，認證體系可在上游促使盡其潛能以再生能源電力產製氫能，因為此制度有助於登錄電力用途，進一步強調水電解製氫方式的附加價值。

5. 要滿足需求日益增長的永續生質能源，供應鏈是關鍵

- 須以環境、社會和經濟上永續的方式生產生質能源。不須侵占雨林，在既有的農地與牧草地上生產生質能源已有非常大的潛力，即使糧食種植需求持續成長，仍可獲滿足。
- 生物質產業(Biomass-based industries)會衍生即用型的生物質廢渣（如紙漿與紙廠、木材與製材廠、與食品廠），是能源轉型的基礎。

- 在航空、航運與長途公路運輸等領域，生物燃料可能是在未來幾年內，去碳化(decarbonisation)主要且唯一的選擇。這些領域需被賦予特別的關注與特定政策，來發展先進生質燃料及其相關生質燃料供應鏈。

6. 全球能源系統去碳化需要快速果決的政策行動

- 政策制定者需建立長期的能源規劃策略，確定目標並制定政策法規，推廣並打造去碳的能源系統。
- 普遍共識認為，減少能源部門碳排放是關鍵，而再生能源與能源效率則是其中主軸。然而，能源和氣候政策之間需強化彼此的協調。制定既考慮氣候又考慮能源需求的能源轉型長期策略相當重要，並要同時顧及電力部門與每個終端消費部門的行動計劃（與永續發展目標和國家 NDC 結合）。
- 政策不應只針對能源效率和再生能源發電創造合適的投資環境，也應投入到重要輔助性基礎設施，例如電網、電動車充電設備、儲電、智慧電錶等。
- 密切的公私協力合作將成為關鍵，而私部門更將成為能源轉型的重要驅動力。例如，企業採購綠能可提高再生能源需求、對電動車充電基礎設施佈建的投資等。因此，讓公共政策與私部門行動保持一致是重要的。
- 建立法規環境推動系統性創新相當重要，以利藉由數位化(如人工智慧、物聯網、區塊鏈)推動智慧能源系統，藉由更廣泛電氣化與分散式能源趨勢來推進部門間的耦合。創新需要從技術層面，延伸到市場、法規、電力部門的嶄新營運作業方式，以及新的商業模式。
- 藉由循環經濟，可驅使能源需求與其碳排放大幅降低，並且是目前便可付諸實行。整體而言，應針對水、金屬、資源、廢料(residues)與原物料加強再利用、循環再生或減少使用。
- 能源稅應反映成本，避免無效果的補貼，隱性成本與負面的外部性應

內部化。法規應允許時間與空間上的變動性與調整空間，例如費用隨時段調整。

- 應促進財務機制，以加快再生能源佈建，以及供應端與需求端的能源效率措施。潛在的擱置資產(stranded assets)應透過整體風險評估而內部化。
- G20 集團論壇、聯合國永續發展目標、與各國 NDC 審查，都提供時機推進行動，並結合長期的能源與氣候策略。此外，在國家與國內不同層級的行動，特別是城市與私部門，也將會是成功關鍵，因為國家與地方都可自發性採取行動。

六、結論與建議

Remap 系列報告具體描繪出未來能源版圖的變動，說明高再生能源占比的社會是可行的。報告倡議的不僅止於再生能源技術的普及與推廣，更著重於整體能源系統的轉變，因此凸顯「電氣化」、電網、電動車充電與儲電的輔助型基礎設施佈建等，乃至建議電力市場須重新設計、強化彈性調度，目的為提醒各國政府在硬體與軟體上都應有相關政策的準備，並對再生能源發展路徑有更整體全觀的視野，此為系列報告中較為特殊的部分。

在投資方面的論述，Remap 著重於將化石燃料投資轉移至再生能源與能源效率領域，並以外部成本降低，來驗證這種投資轉移的確具有經濟利益。然而這樣的論述在各國政治現場可能較難被既得利益者與政策決策者買單，需要增加更多共同效益與經濟誘因，以及更多的法規、財政工具的導入，如能源稅等。

另一方面，Remap 強調能源轉型的同時也帶動社會轉型。報告將 GDP、綠能就業與社會福祉作為衡量社會經濟足跡 (Socio-economic footprint) 的核心議題，並呼籲各國應注重能源轉型過程中確保公平，也提防在相關政策施行後對弱勢者的衝擊過大。

台灣正值能源轉型的過程，依照 Remap 之建議，我國需加快腳步補足基礎建設，強化未來高再生能源比重的電力市場所需之環境。我國雖因電價較低，對社會福祉衝擊力道看似較小，然而卻成為變相補貼能源消費大戶的外部成本，因而在社會公平性的政策制度上亦有修正空間。

參考文獻

- [1] Remap 2030: A Renewable Energy Roadmap, IRENA, June 2014.
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_Report_June_2014.pdf
- [2] IRENA 「全球能源轉型：至 2050 年路徑」重點摘要，能源知識庫，2018/6/4。
https://km.twenergy.org.tw/KnowledgeFree/knowledge_more?id=3415
- [3] Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050, IRENA, August 2018.
<https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>
- [4] Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 (2019 edition), IRENA, April 2019.
<https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- [5] Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018/12/19.
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>