

公務出國報告（出國類別：考察）

# 德國綠能科技績效管理制度 考察報告

服務機關：國家發展委員會

姓名職稱：傅傳鈞科長

派赴國家：德國

出國期間：2019年11月2日至11月10日

報告日期：2020年2月3日



## 摘要

本報告主要呈現考察德國綠能科技（離岸風電、太陽光電等）之發展及其績效管理制度之內容，就該國聯邦經濟事務及能源部（含其所屬聯邦電力天然氣電信郵電及鐵路網絡局）、聯邦環境自然保育及核能安全部、弗勞恩霍夫太陽能研究所，對於其能源轉型政策目標、綠能科技的發展現況、綠能產業扶助、環境保護及後續資源回收再利用等之運作經驗進行介紹，以供我國在推動能源轉型及綠能科技發展之借鏡，並提出改進建議，以期能逐步提升我國綠能發展之效率、效能及品質。



## 目次

壹、前言	1
一、考察緣起	1
二、行程紀要	2
貳、德國中央機關簡介	3
一、聯邦行政機關組成	3
二、德國公務人力概況	4
三、拜會機關（構）簡介	5
參、德國綠能科技發展與績效管理概況及廢棄物處理資源回收制度	8
一、德國綠能科技發展概況	8
二、能源基礎建設	18
三、績效管理機制	24
四、資源回收環境保護機制	25
肆、心得與建議	28
一、心得	28
二、建議	29
拜會照片	32

## 表次

表 3.1	德國預估截至 2020 年底薄膜光電模組廢棄物量 .....	26
表 3.1	歐盟未來的太陽光電模組廢棄量推估 .....	26

## 圖次

圖 3.1	德國核電廠分布 .....	10
圖 3.2	德國核電廠除役時程規劃 .....	10
圖 3.3	近 20 年德國溫室氣體減量情形 .....	11
圖 3.4	德國各種能源及再生能源供給現況 .....	13
圖 3.5	智慧電網虛擬電廠中控站示意圖 .....	19

## 壹、前言

### 一、考察緣起

蔡總統上任後，揭示 2025 年非核家園之能源政策目標，其能源配比為燃煤發電降至 30%、燃氣發電提升至 50%、再生能源提高至 20%。而為達該目標，政府推動能源轉型政策，其中再生能源以推動離岸風電及太陽光電為主。

德國是風力發電領域國際領導者，也是世界上最大裝機容量國家之一，儘管其在陸上風力發電方面經驗可以追溯到 1990 年代初期，但直到 2002 年才制定「離岸風電發展策略」作為基本方針，由資源調查、法規制定、環境評估、技術開發、小規模示範計畫等面向提出發展原則綱要。德國發展離岸風電過程嚴謹、按部就班，逐步化解開發過程遭遇的各種問題。該國第 1 個海上風電場 Alpha Ventus 於 2009 年啟動了測試模式，從那時起，德國海上風電行業迅速發展。雖然投資者最初避開高投資成本及海上風險條件，但價格下跌和技術進步使得海上風能成為越來越有吸引力的技術，2018 年發電量約為 18TWh（180 億度電）。預估到 2030 年德國海上風力渦輪機總裝機容量將達 15GW，為多達 1,500 萬家庭提供清潔電力，並可以為德國達到減碳氣候目標做出重大貢獻。離岸風電產業已提供了 2 萬個工作機會，根據 Stiftung Offshore Windenergie 組織的說法，早在 2010 年，德國價值鏈的營業額就達到了 59 億歐元，到 2021 年可達到 220 億歐元。

2018 年德國公用發電的部分，再生能源總合首度突破 40%，首度超越燃煤發電總合。2018 年德國太陽能發電約 45.7TWh（457 億度電）進入公共電網，產量與 2017 年相比增加約 6.3TW（增加 16%）。2018 年新增 3.2GW 太陽光電裝置容量，2018 年底總裝置容量約為 45.5GW，因此 2018 年是德國太陽能產業復興的一年。另一個太陽能產業復興的跡象是發電自用戶帶動的新一波商機，過去以躉購費率支撐的時代，太陽能板的裝設以併網售電為主，但隨著躉購費率逐年調降、零售電價的上升，發電成本不斷下降，安裝太陽能板以發電自用變成越來越熱門的選項，小型企業和住家開始大量安裝太陽能板發電自用，太陽能發電量不斷突破歷史紀錄，成為目前新建發電機組中之成本最低者。2018 年德國首度推出 2 次風光聯合競標（陸上風電及太陽能發電），得標者全都是太陽能業者。由於太陽能發電成本已大幅降低，風能業者根本無法開出足以競爭的價格，此結果讓許多觀察德國能源轉型專家倍感意外。

透過考察德國綠能科技（離岸風電、太陽光電等）發展趨勢，供我國於離岸風

電及太陽光電後續推動發展參考，包括：適合離岸風電場域或太陽光電所需之小區域氣象觀測與量測設備、電力調度準備、儲能設備與轉換系統相關研究及有效性驗證、相關設計原則與技術準則及程序需求標準規範、綠色金融商品等等。另本會列管 5+2 產業-綠能科技政策及相關政院管制計畫，其技術與產業政策發展經驗，可供本會提供深度管考及政策管考參考。

## 二、行程紀要

本次行程主要考察德國政府相關機關及研究機構，包括聯邦經濟事務及能源部（含其所屬聯邦電力天然氣電信郵電及鐵路網絡局）、聯邦環境自然保育及核能安全部、弗勞恩霍夫太陽能研究所，相關行程及考察對象說明如下：

- (一) 11 月 4 日（星期一）：上午拜會位於柏林（Berlin）之聯邦經濟事務及能源部（Federal Ministry for Economic Affairs and Energy，簡稱 BMWi），德方由該部國際化石燃料及核能處（International, fossil fuels and nuclear energy）副處長（Deputy Director-General II A）Ursula Borak 女士、國際能源合作處（International Cooperation on Energy）Toni Glaser 博士、再生能源電力處（Renewables in the Electricity Sector）Marius Backhaus 等三人接待，該部並邀請離岸風電世界協會（World Forum Offshore Wind）主席 Martin Skiba 教授共同與會，駐德國代表處由經濟組何組長元圭、楊秘書禮騰陪同。
- (二) 11 月 5 日（星期二）：上午拜會位於德紹羅夫勞（Dessau-Roßlau）的聯邦環境自然保育及核能安全部（Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety）所屬環境局（German Environment Agency，簡稱 UBA），該局由產品責任科的 Axel Strobel 專員，以及負責「包裝法」、「電氣和電子設備法」和「電池法」的 Isabel Wagner 律師/專員與談，駐德國代表處由經濟組楊秘書禮騰陪同。
- (三) 11 月 6 日（星期三）：上午拜會位於波昂（Bonn）的聯邦電力天然氣電信郵電及鐵路網絡局（Federal Network Agency for Electricity, Gas, Telecommunications, Post and Railway，德文 Bundesnetzagentur，德文簡寫 BnetzA，以下簡稱網絡局），該局由國際能源協調組的經濟學家 Stefan Arent 博士/專員與談，駐德國代表處由楊秘書禮騰陪同。
- (四) 11 月 8 日（星期五）上午拜會位於弗萊堡（Freiburg）的弗勞恩霍夫太陽能

研究所 (Fraunhofer Institute For Solar Energy System, 簡稱 ISE), ISE 由公關及出版品部的 Ann Kovach-Hebling 博士進行該所導覽及介紹所內專業作品展出; 光電事業部 Harry Wirth 博士及負責能源系統和能源經濟學、能源系統分析的 Philip Sterchele 博士分別進行太陽光電專題介紹及相關議題的研討。

## 貳、德國中央機關簡介

### 一、聯邦行政機關組成

#### (一) 立法部門

1. 聯邦議會 (Federal Diet)
2. 聯邦參議院 (Federal Council)

#### (二) 行政部門

德國的中央政府由聯邦總理和聯邦部長組成聯邦政府內閣。除了總理制定政策準則的權力外，原則上部長們還獨立運作其各部，但集體原則也適用於內閣間之紛爭，即聯邦政府通過多數決定解決爭端。聯邦內閣由 14 名部長和聯邦總理府首長組成。部長是聯邦有關部門的最高行政首長。「基本法 (The Basic Law)」賦予總理一職特殊的角色：聯邦總理應確定並負責一般政策方針。聯邦總理府和聯邦政府各部僱用約 1 萬 8,000 名工作人員，外交部和國防部員工的薪資較其他部會為高。8 個部設在柏林，6 個部設在波恩聯邦市，所有部會在該 2 個城市皆設有辦事處。

德國總理下轄 14 個部會：

1. 聯邦財政部 (Federal Ministry of Finance)
2. 聯邦內政、建築和社區部 (Federal Ministry of the Interior, Building and Community)
3. 聯邦外交部 (Federal Foreign Office)
4. 聯邦經濟事務與能源部 (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy)
5. 聯邦司法部和消費者保護 (Federal Ministry of Justice and -Consumer Protection)
6. 聯邦勞動和社會事務部 (Federal Ministry of Labour and Social Affairs)
7. 聯邦糧食和農業部 (Federal Ministry of Food and Agriculture)

8. 聯邦國防部 (Federal Ministry of Defence)
9. 聯邦家庭事務部，老年人，婦女和青年部 (Federal Ministry of Family Affairs, Senior Citizens, Women and Youth)
10. 聯邦衛生部 (Federal Ministry of Health)
11. 聯邦運輸和數字基礎設施部 (Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure)
12. 聯邦環境、自然保護與核安全部 (Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)
13. 聯邦教育與研究部 (Federal Ministry of Education and Research)
14. 聯邦經濟合作與發展部 (Federal Ministry for Economic Cooperation and Development)

### (三) 司法部門

1. 聯邦憲法法院 (Federal Constitutional Court)
2. 聯邦法院 (federal courts)

## 二、德國公務人力概況

依德國聯邦統計局統計數據<sup>1</sup>，截至 2018 年 6 月 30 日止，該國公務人力總數約為 480 萬人，約占全國總受僱人口 4,420 萬人之 10.9%，較 2017 年同期增加 6 萬 500 人 (+1.3%)，主要增加警察、兒童日托中心及高等教育學校等人力。此外，契約人員約占公務人力總數的 6 成，如以受僱單位類型區分，聯邦政府內常任公務人員 (含法官)、軍職人員及契約人力各約占 1/3，然而越至地方基層單位，其契約人力占比越高，邦層級政府契約人力約占其總公務人力之 50%，邦之下之地方政府及社會保險機構則近 9 成人力均為契約人員。顯見機關屬性越趨執行性質者，進用契約人力之比率相對較高，聯邦政府層級因涉及政策規劃及公權力行使程度較高，進用常任公務人員比例與契約人力相當。

另德國政府體制為聯邦制，除文化、教育、地方廣播電視、地方警察、公共設施、社福健康服務、城市規劃、基礎建設等民眾服務事項由各邦及其下之地方政府掌理外，地方政府仍須落實執行聯邦相關法令政策，因此，就公務人力數量而言，

---

<sup>1</sup> [https://www.destatis.de/EN/Press/2019/06/PE19\\_234\\_741.html](https://www.destatis.de/EN/Press/2019/06/PE19_234_741.html)

主要集中在地方政府，聯邦政府公務人力約占全國公務人力總數 1 成<sup>2</sup>。

### 三、拜會機關（構）簡介

#### （一）聯邦經濟事務與能源部(BMWi)

聯邦經濟事務和能源部（德語：Bundesministerium für Wirtschaft und Energie，簡稱 BMWi），是德意志聯邦共和國的內閣級部會，以社會市場經濟原則創造更大的就業及投資，確保德國的競爭力和高就業水平是該部的永久目標。職掌摘述如下：

1. 制定政策及計畫保持中小型企業蓬勃發展和創新，對成長階段的新創企業和年輕公司提供融資、進行投資、提高競爭力，創造持久繁榮和改善生活品質。
2. 改善商業和投資環境，將管理負擔降至最低，並進一步改善年輕公司獲得風險投資的機會。
3. 促進工業公司和中小企業內部的數位化，保持德國工業實力，從能源密集型材料行業到高科技成品的整個價值鏈，維護德國價值鏈的完整性；促進高績效的小型、中型和大型公司與研究機構之間自然形成的群聚；支持工業 4.0、人工智慧和關鍵支持技術。
4. 能源供應以能夠負擔得起、安全且環保為原則，在不損害德國工業競爭力的前提下推動能源轉型，並成為現代化、創新和數位化的驅動力。
5. 穩定公共財政，建立有吸引力的投資環境和開放的市場，透過德國在能源、工業、創新、競爭、中小企業和歐洲政策領域的立法、行政和協調，來實現發展歐洲經濟貨幣聯盟目標。

BMWi 有 6 個所屬機關：

1. 聯邦卡特爾辦公室（Bundeskartellamt，位於波昂）
2. 聯邦經濟事務和出口控制辦公室（Federal Office for Economic Affairs and Export Control, BAFA，位於伯恩）
3. 聯邦電力天然氣電信郵電及鐵路網絡局（Federal Network Agency for Electricity, Gas, Telecommunications, Post and Railway，簡稱 BNetzA，

---

<sup>2</sup> 施能傑、王崇斌、簡琬璧、陳依盈、謝依霖，行政院人事行政總處，德國聯邦政府運用契約性人力、中央與地方政府員額管控機制及行政法人考察報告，公務出國報告資訊網，民國107年11月25日。

位於波昂)

4. 聯邦材料研究與測試研究所 (Federal Institute for Materials Research and Testing, 簡稱 BAM, 位於柏林)
5. 德國國家計量學會 (German National Metrology Institute, 簡稱 PTB, 位於柏林)
6. 聯邦地球科學與自然資源研究所 (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, 簡稱 BGR, 位於柏林及漢諾威二地)

## (二) 網絡局(Bundesnetzagentur 或 BnetzA)

網絡局隸屬於 BMWi, 負責聯邦電力、天然氣、電信、郵政和鐵路網絡, 總部位於波昂, 透過法規的訂定與執行, 確保電信、郵政、能源在解除管制與自由化之後, 使用者以公訂價格公平的取得所需的資源, 確保系統運作的效率, 以落實執行「電信法 (TKG)」、「郵政法 (PostG)」和「能源法 (EnWG)」及相關從屬規範。從 2006 年 1 月 1 日起, Bundesnetzagentur 還承擔了鐵路監管的責任, 與以往所負責的其他職能一致, 確保在透明化的基礎上進行業務監管。

Bundesnetzagentur 職掌範圍如下:

1. 電信和郵政領域, 確保全國公平、可行的競爭: 以可負擔的價格在全國範圍內提供基本的電信和郵政服務 (通用服務); 促進公共機構的電信服務, 高效且無干擾地使用頻率, 並維護公共安全利益。
2. 能源領域: 為大眾提供最安全、低價、對消費者友善、高效能和環境可持續的電力和天然氣供應; 確保電力和天然氣廠商的公平競爭, 維護能源供應系統的長期有效和可靠運行; 實施和執行關於能源供應必須共同遵守的法律, 以及有效的審批程序; 使德國網路供應在速度與負荷量上得以穩健的成長; 再生能源的使用。
3. 鐵路監理領域: 檢查路網和服務設施並提出報告; 審查使用基礎設施和相關服務的費用及其結構, 確保公平的使用鐵路基礎設施 (分配程序和結果) 和相關服務。

## (三) 聯邦環境局 (BMU)

聯邦環境局為聯邦環境自然保育及核能安全部 (The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 簡稱 BMU) 的所屬機關。BMU 總部在波昂, 在柏林設有第二辦公室, 負責聯邦環境自然保育及

核能安全相關的政府政策，該部會已成立了 30 多年，在上一個立法期間，該部的員工約為 1,000 名，2018 年的總預算為 19.78 億歐元。BMU 下轄聯邦環境局、聯邦自然保護局及聯邦輻射防護局；該部成立的宗旨在保護民眾免受環境毒素和輻射的侵害，並且建立智慧有效的方法善用原物料、自然資源、阻止氣候變遷，以保護生物多樣性並保護棲息地。BMU 主要業務職掌包括：

1. 最主要職責是立法，為達成政策目標塑造相關領域的法律框架，這包括研議監管法規並將歐盟法令轉化為國家法律。BMU 為聯邦政府起草法律，然後將其提交給聯邦議院。此外 BMU 還負責發布法定條文與相關執行細則。
2. 支援研發創新所需的資金，使得創新技術的市場開發得以落實。BMU 除了訂定法律之外，BMU 還得以活用經濟資源以達成目標，例如支持計畫的資金來自於稅收和允許限制型排放廢氣交易所獲得的收入。如此藉由政策與資金運籌帷幄，將使得大眾、協會、公司和政府當局的成員可以獲得特定項目的財務支持。
3. 進行國家或國際層級的密切合作。德國是由 16 個聯邦州組成的國家，為歐盟和眾多國際組織的成員，BMU 在國家或國際層級的密切合作上扮演重要的角色，包括對內為德國聯邦政府與各州問題協調，對外在歐洲聯盟和國際組織（聯合國、經合組織、世貿組織）中代表德國，將許多環境和氣候問題透過深入的國際合作來解決，並落實在各聯邦中推動。
4. 溝通及接受公眾意見並進行交流。BMU 透過網站全面開放相關諮詢服務與資料公佈，使其活動和計畫相關措施透明化，公眾可以透過網站或印刷出版物來了解 BMU 的最新消息。在積極經營公共關係的過程中，擴大民眾參與度並增加大眾對政策的認知，有助於目標的達成。

BMU 的所屬機關聯邦環境局（UBA）成立於 1974 年，總部自 2005 年以來一直位於德紹羅夫勞（Dessau-Roßlau），約有近 1,600 名員工，全國 13 個辦公據點處理噪音、空氣、飲用水、氣候變化、土壤保護、廢物管理等環境問題，例如 BMU 的生態和政治科學建議、調查和評估國家環境數據、向公眾及歐盟提供有關環境問題的資訊（如執行環境法律、排放權交易等等）。UBA 下轄 EAR 基金會，電子電氣產品製造商向基金會註冊其生產的產品，如果電子電氣製造商違反產品註冊有關義務，或未盡義務提供公共廢棄物處理的容器進行廢棄物或資源回收處理，UBA 負責行政違法行為的裁罰。

#### (四) 弗勞恩霍夫太陽能研究所 (ISE)

德國為加強該國和歐洲經濟並與全世界進行國際合作，共有 72 個研究機構和研究單位，總員工人數約 2 萬 5,500 人，年度研究預算達 23 億歐元，其中 ISE 是德國第二大的研究所。ISE 成立於 1981 年，位於弗萊堡，目前員工約 1,200 人，2018 年預算（包括投資額）約 9,430 萬歐元；ISE 的內部單位除管理部門外，尚有能源技術和系統部、光電事業部、能源儲存部、新聞和公共關係室，並在德國境內設有 3 個分支機構從事太陽能電池和半導體材料的研發工作：蓋爾森基興的實驗室和服務中心 (LSC)、弗賴貝格的半導體材料技術中心 (THM) 和弗勞恩霍夫矽光伏中心 (CSP) 在哈雷。此外 ISE 在美國波士頓、智利等地分別設有 3 個海外的研究中心。

ISE 研究重點涵蓋能源效率、能源生產、能源分配、能源節約等領域，專長於太陽光電材料、設備模組生產、並協助電力公司及電網運營商進行研發，以及協助相關產業進行研發工作，例如追蹤器、逆變器生產商的產品研發，也是歐洲最大的太陽能研究機構；服務對象不僅包括德國境內的企業及政府機關，並包括新興或發展中國家及已開發國家的公民營企業。在太陽光電領域中，基於輻照度和太陽光電功率的預測，ISE 研發天氣監測儀器及結合衛星資料開發相關系統，分析局部雲和輻照狀況，使傳統發電與再生能源各發電系統之電力供應及時調節，穩定供電。

ISE 與經濟、政治及社會領域的客戶及合作夥伴共同研究使多項技術解決方案在實際應用中達到具體可行，提升客戶於市場的競爭力，並在其業務領域中，著重針對材料、元件、系統及運行進行相關研發。ISE 的一切研究及發展活動以現代化先進設施為基礎，致力於強化基礎研究及產品導向的技術評估，各個部門都擁有認證產品與技術品質的測試器材與專業能力，部門實驗室均可提供檢驗及認證服務。

### 參、德國綠能科技發展與績效管理概況及廢棄物處理資源回收制度

#### 一、德國綠能科技發展概況

德國能源解決方案由德國經濟事務和能源部 (BMWi) 協調和資助各種能源計畫，提升德國技術的國際營銷和對外貿易。例如 dena 再生能源解決方案計畫 (dena RES Programme) 和個案開發計畫 (Project Development Programme, PDP)。dena RES

計畫增進德國的旗艦計畫與當地計畫的合作夥伴一起推動，PDP 建立在現有發展援助措施的基礎上，並促進商業夥伴關係以及本地和德國公司之間的經驗和專業知識的交流。PDP 為市場持續發展建構了重要基礎，該計畫針對德國的 Mittelstand 中小型企業（small and medium-sized enterprises, SME），負責德國與合作夥伴國家之間進行國際合作的技術和技術轉讓；國際上對這些公司在可持續能源解決方案領域的技術和專業知識需求相當高。

在過去的 20 年中，德國的水力發電裝置容量保持相對穩定，約為 5.1GW-5.6GW。由於德國的地形條件限制了水力發電的進一步發展，並且預計未來不會顯著增加；在化石燃料的使用方面，德國主要依賴進口（褐煤除外），但自從再生能源法（Renewable Energy Sources Act, EEG）於 2000 年生效加強推動綠能之後，它為再生能源、優先調度以及優先傳輸和分配建立了保證的電網權限（即網絡運營商有義務加強和擴展其電網以適應不斷增長的再生能源），逐漸使用再生能源和提升能源效率的情況下，這 20 年德國已經降低了對能源進口的依賴。德國的能源轉型政策反映對巴黎協定（Paris Agreement）的貢獻，包括迅速淘汰化石燃料補貼、嚴格的低碳和能源效率要求，加強支持再生能源。依據聯邦經濟事務及能源部簡報，德國的能源轉型政策是以能源效率良好、直接使用再生能源、再生能源的電能夠媒合轉移到其他部門（供熱、製冷、運輸）從而減少所需的化石能源等為主軸，逐步降低核能發電及燃煤發電比重。

德國核電廠分布如圖 3.1，規劃從 2000 年到 2022 年關閉 21.5GW 的核能發電量，因此能源轉型須加強開發再生能源，以補足核電缺口，同時須興建北電南送的輸配電網。截至 2017 年 12 月，福島核災難後已關閉了 8 座核電廠，其餘的 7 個核電廠將在 2022 年之前逐步淘汰，除役時程規劃如圖 3.2。德國在傳統核電廠除役後，綠能系統如遭遇無太陽也無風之情況下，一般鼓勵就近供電及加強備用電力來源，其中天然氣發電廠可快速啟動發電，燃煤廠則要 3 天，德國網絡局的管理重點在於依據需求面用電量進行發電，藉以達供需平衡。例如慕尼黑附近的一家燃煤電廠有意關廠，然鑒於再生能源供電不穩，且該電廠屬於備用電力廠，因此遭網絡局駁回。



圖 3.1 德國核電廠分布

(資料來源：聯邦經濟事務及能源部簡報)

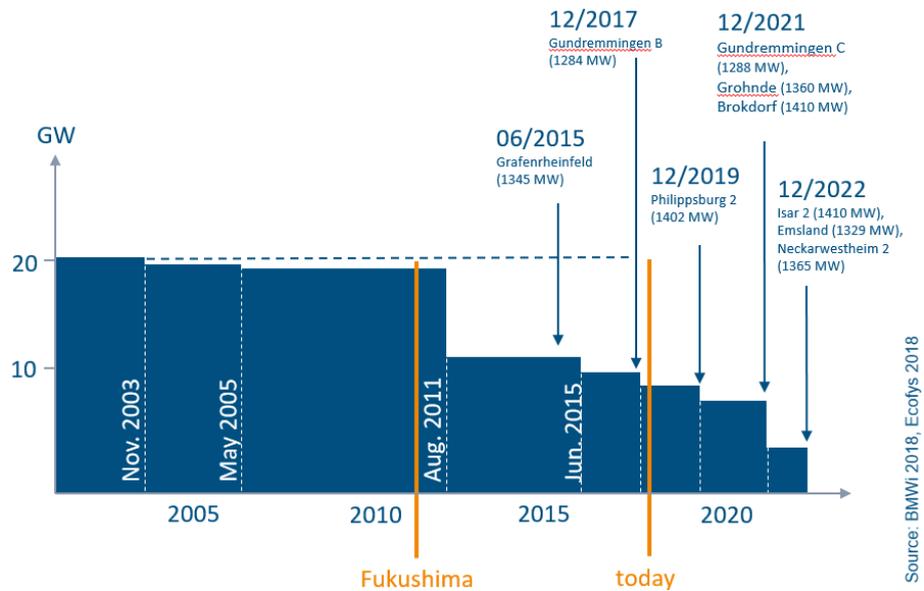


圖 3.2 德國核電廠除役時程規劃

(資料來源：聯邦經濟事務及能源部簡報)



德國的家戶用電約佔整體最終能耗的 35%，因此再生能源不僅可用於提供電力，還提供家戶大部分能量用於提供熱量和熱水。德國計畫在加熱和冷卻方面大量運用綠能，例如推動使用市場激勵計畫（Market Incentive Programme, MAP）來支持安裝使用再生能源的供暖系統。在過去的 10 年中，可再生能源在供熱網絡中所佔的比重已大大提高，從 2006 年的 9.2% 上升到 2016 年的 19.8%。

從 2017 年到 2018 年，德國整體的能源消耗下降了 3%，化石能源載體（例如煤、天然氣和礦物油）的使用大大減少，而再生能源佔比則繼續上升。另一個積極的發展是，更高的能源效率也導致了消費量的下降，能源效率在德國創造越來越多的就業機會，尤其是在商品生產製造業和服務業，以及在建築節能改造方面創造了就業機會。

德國的科學家們努力確保能源消耗保持可持續、安全和負擔得起的發展，且正在德國的五個模型區域中實踐測試能源的解決方案，如果實驗成功，這些解決方案將在全德國境內實施。SINTEG 計畫（SINTEG funding programme）匯集了來自 300 多家公司、研究機構和市政當局的合作夥伴，並得到了聯邦經濟事務和能源部的支持，該部將在 2021 年前提供約 5 億歐元的資金。

因應氣候變化最好且最便宜的方法首先是減少能源需求，這也是為什麼實施能源轉型還涉及更有效地使用能源並減少消耗能源的原因。聯邦政府推動建築物的節能改造、工商業的節能措施，以及公司、市政當局和私人家庭的能源諮詢，每年提供約 35 億歐元的資金。

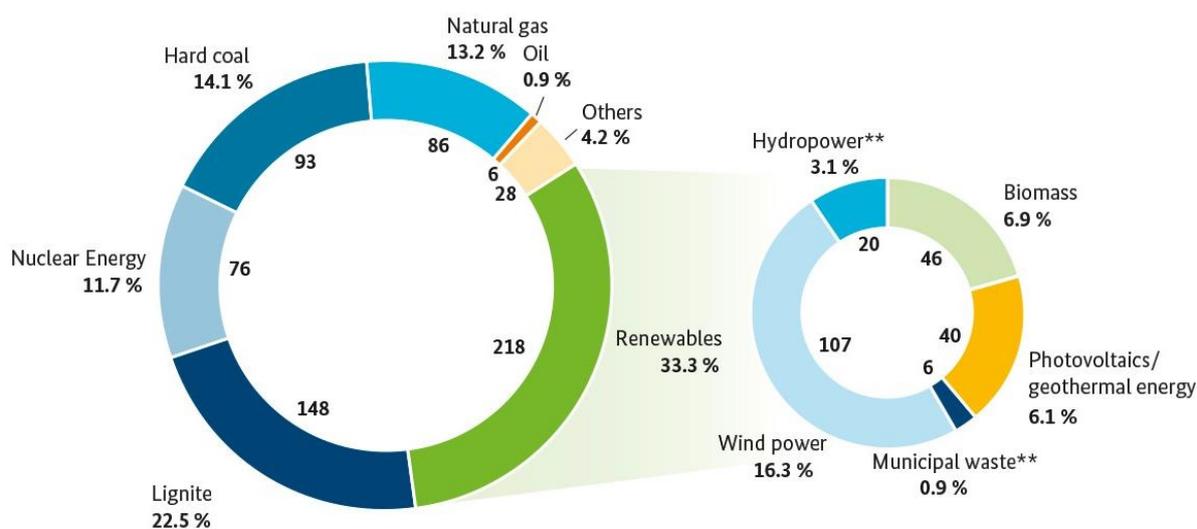
德國再生能源蓬勃發展的同時，再生能源的電力供應也面臨著新的挑戰：大部分電力是由分散的設備產生的，一旦送入電網，就必須進行長距離運輸，例如將德國北部產生的大量風能輸送到南部使用。因此，能源轉型的成功，將取決於擴展大區域輸電電網以及本地配電網的能力，擴大電網的工作必須與加強需求側管理並使一般發電廠更加靈活的調度齊頭並進，導入智慧電錶將有助於將能源轉換數位化，平衡供需關係，不過德國在智慧電錶的推動速度非常緩慢，甚至低於鄰國義大利等國家，仍有相當大的改善空間。

近年德國再生能源發電的裝機容量穩步增長，2013 年至 2018 年期間，太陽光電的裝機容量從 36.7GW 增長到 45.3GW，增長了 23%；陸上風電的風力發電產能增長 59%（從 33.0GW 增至 52.6GW），海上風電的產能增長 1,100%（從 0.5GW 至 6.4GW）；同期，生質能發電量增長幅度較小，從 7.0GW（2013 年）增至 8.4GW（2018

年)增加了 20%。2018 年太陽光電新增容量最大，達到 2.9GW，其次是陸上風電 (2.3GW)，海上風電 (1GW) 和生質能發電 (0.4GW)。

德國在發展再生能源時採大力開發，造成電價逐年上漲，並轉嫁給用電客戶，後來才導入競標機制，我國及德國對再生能源發電業者均給 20 年保證躉購電價，同樣採用 Feed-in-Tarif 機制，臺灣選擇穩健及不影響民眾電價方式開發。

為進一步激勵再生能源的市場整合，從 2017 年起德國依據修正後的 EEG，將陸上風能、海上風能、太陽光電和生物質能 4 大再生能源技術，以競標拍賣方式確定政府對新再生能源裝置的支持價格，但容量小於 750kW (生質能<150kW) 的裝置無需參加拍賣，並且將像以前一樣獲得由主管機關決定的上網電價。EEG 規定了以有效和安全的方式部署再生能源電力措施，且德國對綠能產業的支持價格，亦有遭受質疑價格過高的問題，但德國政府基於能源轉型實屬必要，依舊維持既有政策尚未做調整。



The share of geothermal energy is very low and therefore included in the share of PV  
 \*preliminary figures, \*\*regenerative part

圖 3.4 德國各種能源及再生能源供給現況

(資料來源：聯邦經濟事務及能源部簡報)

### (一) 風力發電部分

歐盟委員會在其最新的「2050 年長期減碳戰略」中確定，到 2050 年風能將

成為主要的發電技術，並預計將安裝 450GW 的海上風能 (EC-A Clean Planet for all, 2018)。截至 2018 年底，德國的風力發電（陸上風電及離岸風電）裝機容量超過 59GW，只僅次於美國和中國，能源轉型創造了就業機會，在風能領域全球將近 14%（大約 16 萬人）的就業機會位於德國，使德國在全球排名第二，且產業科技的發展屬世界一流。

風力發電廠通常將其電力直接饋入當地電網，其裝置由 50m 至 150m 高的塔架，包含發電機和其他機械設備的機艙、水平軸轉子和轉子葉片組成。工程師利用飛機製造方面的經驗開發現代風力渦輪機，而當今使用最廣泛的技術是三葉片水平轉子，已被證明是機構可靠、視覺愉悅且安靜的發電裝置。開發該設計的目的是在 12-16m/s 的風速下提供最佳的發電能力，同時在低速下仍能高效運行。在強風中，輸出功率會降低，以確保將恆定量的電力饋入電網。為了將轉子葉片的轉速轉換成發電機所需的頻率，應用了兩種不同的概念。第一種使用變速箱，其中變速箱根據當前轉速變化，非常類似於自行車變速系統。最近開發的概念是使用環形發電機 (ring generator)，該環形發電機即使以較低的轉子葉片速度旋轉，也能以較高的頻率發電。儘管環形發電機可以節省齒輪箱的維護成本，但目前價格仍屬昂貴。

風力渦輪機適合為整個建築物、工業園區和社區提供部分動力，但由於風力渦輪機的容量無法以很小的增量進行調整，因此必須使用現代控制工程技術將風電場相互連接，實現平穩的功率轉換，從而防止電網波動。

### 1. 陸上風電

陸上風力渦輪機可以依其輸出容量進行分類：小型風力發電機的容量高達 50kW；輪轂高度更高時，大型風力渦輪機的容量可達到 7MW 左右。小型風力渦輪機可用於家庭發電，風況佳時甚至可以替代傳統的柴油發電機。當與其他再生能源技術（例如光電和儲能解決方案）結合使用時，小型風力渦輪機非常適合在離網地區提供基礎電力供應。大型陸上風力渦輪機通常安裝在具有電網連接的風電場中。為了達到最大容量輸出，需要高風速和恆定的風量。因此通常位於海岸附近或山頂等較高的位置。如果是單機，也可以將風能直接提供給商業、工業或農業用戶，為工廠、商業綜合體和農業設備供電。

德國的陸上風電由於生態環保問題及居民的反對，目前已暫時停止開發新的陸上風電場。

## 2. 離岸風電

雖然德國暫時停止陸上新風電場的開發，然而在離岸風電的部分仍有持續開發的潛力，尤其離岸風電對減緩全球氣候暖化有巨大貢獻，且海上風電的容量因子（capacity factors）高於陸上風電，約為太陽光電的 2 倍。海上風能的輸出隨風的強度而變化，但時變性低於太陽光電發電。與太陽光電相比，海上風電通常在一個較窄的範圍內波動，每小時波動高達 20%，而太陽光電波動則高達每小時 40%。此外，近年離岸風電除較新的核電或燃氣發電廠便宜外，又具有較低的可變性和介於 40%至 50%的較高容量因子，因此，離岸風電以經濟有效的方式實現歐洲的 2030 年和 2050 年氣候與能源目標至關重要。截至 2019 年底，歐洲水域安裝了超過 20GW 的離岸風電，大部分位於北海，約有 2GW 位於波羅的海（丹麥 872MW，芬蘭 68MW，德國 1,074MW 和瑞典 192MW）。波羅的海過去由於漁業、交通運輸及軍事的關係而較少進行離岸風電的開發，但歐洲風能協會（WindEurope）認為波羅的海是未來深具開發的水域，到 2030 年波羅的海將部署達 9GW 以上，在各國政府加強區域合作的情況下，還有可能會增加到 14GW 以上<sup>3</sup>。根據國際能源機構（International Energy Agency, IEA）的數據，到 2042 年，離岸風電可能成為歐洲第一大發電來源。目前安裝的 20GW 發電量平均滿足歐洲年度電力需求的 1.5%。到 2050 年，歐洲的離岸風電可能達到 450GW，其中北海的安裝量可能達到 212GW，波羅的海的安裝量則可能達到 85GW，這將使波羅的海成為僅次於北海的歐洲第二大海上風電場。

德國在啟用新場址方面將面臨重大問題，尤其是在波羅的海地區將近 3/4 位於海岸 22 公里以內，目前因為生態保護、運輸及軍事等原因還無法在該海岸建設海上風能計畫。如果繼續這種排斥行為，將很難確保該地區有足夠的站點。此外，德國應檢視目前對自然保護區中海上風電計畫的排除，以降低海上風電的平均成本。

至關重要的是，德國必須迅速啟動電網強化，特別是北部的陸上電網向南延伸，因德國離岸風場設在北海及波羅的海，德國汽車、鋼廠及機械業者等大用電戶卻位於南部；未來甚至將不得不與其鄰國合作以實現擴大互連，並建立離岸混合發電計畫。如果德國解決其電網瓶頸並展現 2030 年之後的海上風電

---

<sup>3</sup> WindEurope, Boosting offshore wind energy in the Baltic Sea ,November 2019

擴展雄心，啟動相關投資應該不是問題。

## (二) 太陽光電部分

太陽能是取之不盡用之不竭的能源，並以多種形式加以利用來產生熱量和電能。在電力生產領域，太陽光電（photovoltaics, PV）電廠和太陽能熱電廠都提供了可持續的技術解決方案。

### 1. 太陽能熱電廠

(1) 太陽能熱電廠也稱為集中式太陽能發電廠（concentrated solar power, CSP）。在陽光充足的地區，可以利用太陽的熱量來發電、供暖、冷卻和供水，當與蓄熱器結合、添加其他燃料時，CSP 電廠可以類似一般電廠提供連續的基本負荷電力。太陽能熱電廠使用的許多技術都是在德國開發和製造，經過多年在該領域的開發和研究奠定良好基礎，德國公司已能將 CSP 發展為可靠、負擔得起且財務上可行的電廠技術。在太陽能熱電廠中，陽光被反射鏡系統捕獲並聚焦到吸收器上，然後由此產生的熱量通過常規的發電廠技術進行發電，換言之，太陽能熱電廠是以太陽能使水蒸氣過熱，自過熱水蒸氣的能量通過渦輪機轉換為電能。根據所使用的聚光鏡系統的類型，不同的太陽能熱電廠為：拋物線槽式電廠（Parabolic-trough power plants）、太陽能塔式電廠（Solar tower power plants）和碟式斯特靈太陽能系統（dish-Stirling solar power systems）。太陽能熱電廠需要直接的太陽輻射才能運行，因此只能在地球的「太陽帶（sun belt）」附近運行，每年的輻射水準在 1,700 至 3.000 kWh/m<sup>2</sup> 之間。

(2) 所有太陽能熱電廠特有的能量轉換過程，允許使用熱能儲存或化石燃料或生物燃料混在一起燃燒，從而使電廠的運營更加靈活，此混合燃燒也稱為混合操作，在高峰負荷時間或全天候進行發電可以極大地提高發電廠的盈利能力。

### 2. 太陽光電

(1) 太陽光電站依所需的電站輸出，決定需要幾個太陽能模組，太陽能模組連接在一起，並且在太陽能模組內的太陽能電池又連接在一起，然後通過光電效應在太陽能電池中產生直流電，該電流由逆變器轉換，因此可以直接使用或將其饋送到電網。太陽光電技術通常區分基於晶體晶片的技術（包括單晶矽和多晶矽電池）和薄膜技術（由銅、銦、鎘和硒或非晶矽製成的模組）；太陽光電站憑藉其可擴展性，可在私人家庭、工業界或作為 GW 級電力的商業

電廠中運行，且光電系統用於發電是最環保、最高效的能源供應系統之一，德國太陽光電研究機構和工業界正在進一步開發光電系統組件和生產技術，以優化應用並降低成本。

- (2) 太陽光電的優勢包括：可獨立於現有電網可靠且經濟高效的發電、沒有活動組件的設計易於安裝且堅固耐用、模組化結構從小型系統到大規模安裝皆可廣泛應用、發電安靜、矽是價格便宜的主要材料且易於回收、低維護要求，因此在許多國家，太陽能發電的成本可與電網常規電力的消費價格相媲美，在太陽輻射高而沒有其他自然或化石資源的國家，太陽光電通常是最便宜的發電來源。
- (3) 德國大多數家用的太陽光電系統是在屋頂安裝，但是已經發展出將光電系統集成到建築物本身的新方法，例如透過將光電板嵌入建築物立面或窗戶中，且 ISE 已開發彩色之太陽光電板可以與建築外觀相結合。為了滿足德國一個四口之家的年消費電量，一個普通家庭需要一個峰值輸出為 3.5kW 至 4kW 的光電系統，根據所用的光電技術，相當於表面積約 35 至 40 平方公尺的太陽能電池板，在太陽輻射較高的區域，需要的表面積較小。工廠建築物、生產設施和商業綜合體的屋頂，常為大型併網或離網光電系統提供了足夠的空間。
- (4) 混合系統是指允許光電系統與其他再生能源技術或柴油發電機和儲存設備結合使用。通常大型併網系統設計為地面安裝系統或大型屋頂安裝，這種類型的系統可用於大型用戶供電，也可用於獨立的電源系統（微型電網）。對於小型電網，將多個光電系統饋入一個獨立的電源系統中，從而使其能夠為多個房屋甚至整個村莊供電，通常在這種情況下會使用混合動力系統，此外，為了最大程度地利用太陽能發電和提高收益，可以安裝追蹤太陽之光電組件。
- (5) 德國自 2015 年推出太陽光電拍賣標案以來，太陽光電的支持成本已呈大幅下降的趨勢：德國於 2015 年導入太陽光電試驗計畫標案，並已成為 2017 年 EEG 修正案的一部分，太陽光電歷經 14 輪拍賣結果顯示，拍賣導致支持成本降低，從 2015 年 4 月平均每度電 9.17 歐分的獎勵，降至 2019 年 3 月的 6.59 歐分，減少了約 28%。2018 年 2 月，最低平均拍賣價格為每度電 4.33 歐分（第 10 輪標案），平均獎勵價格在第 2 年雖有提高，但仍低於每度電 5 歐分。2019 年 3 月平均每度電拍賣價格大幅上漲至 6.59 歐元，價格在 3.9 歐分至 8.4 歐分之間，價格上漲的原因包括錯誤的將大約 200MW 的 17 項計畫

標案排除在外，以及巴伐利亞州（Bavarian）可耕地上建設的計畫配額用盡（每年 30 項計畫），後者允許在巴伐利亞獲得更昂貴的競標價。

## 二、能源基礎建設

隨著再生能源在能源結構中的比重增加，現有的能源基礎設施面臨新的挑戰，為了將電力和熱能從生產者輸送到消費者，現代能源基礎設施需要能夠將集中式和分散式發電廠連接起來，包括將再生能源電廠和基本負荷所需的發電廠串接，以及將大城市地區以及個別離網用戶連接起來。這種日益分散和不穩定的能源供應，需要使用新技術來更靈活地設計能源系統，並需使用智慧計量設備和電網集成能量儲存和技術納入能源基礎設施，以允許跨部門使用所產生的能量並擴展服務範圍。能源基礎設施的另一個新的專業領域是提供替代燃料，特別是交通運輸大幅增加電動汽機車的使用。

而隨著動態變化和分散的電力饋送以及新型消費者（例如電動汽車）的比重不斷增加，傳統的電網基礎設施已達到極限。過去來自常規電廠的電力從傳輸系統單向流向配電網，但如今功率傳輸必須是雙向的，這是因為來自再生能源系統的電力饋入通常發生在配電網的低壓和中壓階段，為了避免配電網發生瓶頸並在所有電壓水平下保持穩定性，需要越來越多的測量、控制和通信技術來支持電網中的頻率和電壓控制，因此電網與發電機、用戶和電力儲存單元之間需要越來越多的接口，電源的靈活性、分散性和數位化以及這些所需的相關 IT 安全性和系統服務也將發揮越來越重要的作用。

德國電力供應及電網採分開經營方式，目前有 TenneT、Amprion、TransnetBW 及 50Hertz 等 4 大電網系統運營商，由於網絡局規定所有市場參與者均可公平使用電力和天然氣網絡，且法規對於電力和天然氣網絡設施訂有激勵措施，因此由該局監管輸電及輸電網絡的分配與發展，以避免壟斷。德國境內大、中、小電力供應商參與電力競標，造成電力供應端電價起伏，但由於網絡局的監督，消費端的電價仍能維持穩定持平。另為配合 2030 年再生能源的比例提高到 65%、2038 年完全淘汰燃煤發電的目標，2019 年底德國的國家發展計畫納入建設近 3,600 公里傳輸線的「2019-2030 年電網發展計畫」，內容包括優化電網的措施，例如對架空線進行動態線路評估，並採用了創新的技術方法，可在發生故障或電力過剩時讓電網在短時間內過載，從而提高電網的運輸能力，網絡安全性將以自動化的過程快速地維護管理發電設備和消費設備，並在電力過剩之後管理電池，以確保電力供應。到 2030 年

該計畫將增置完成一條可將德國北部離岸風電產生的電力輸送至德國南部主要用電區的高壓輸電走廊。

## (一) 電力基礎設施數位化

### 1. 電力電子與網絡控制技術

由於更多再生能源生產者帶來的發電量變化，電力的傳輸變得越來越複雜，生產者數量增加，生產者與消費者之間以及不同網絡級別之間所需的協調工作也隨之增加。因此，分散式發電廠越來越需要使用電力電子設備來提高系統穩定性。另外由於網絡控制技術，電網運營商必須最佳地利用電網的傳輸容量並調節利用率。

每當需要調整電壓的幅度或頻率以及電流的強度時，例如在將電饋入供電網時，就必須在電網中使用電力電子設備，也就是功率轉換器，轉換器根據技術連接規則對所需的頻率、電壓和相位進行轉換，例如直流電變為交流電。

再生能源增加時，電力電子技術對實現持續電力供應中起著關鍵作用，因為這些能源需要交流電和直流電系統的組合。儘管交流電流經大多數供電網，並且家用電器也由交流電供電，但在發電過程中會產生或需要直流電。因此，逆變器充當光電系統與供電網之間的標準接口；在風力渦輪機中，是使用變頻器將變速風力渦輪機的頻率與電網頻率對準。

諸如高壓直流輸電中所使用的現代電力電子設備，可以大幅減少網絡運行期間的輸電損耗。當前的研究和開發側重於優化成本、效率、使用壽命、重量和體積，以及電力電子組件的系統效率。

### 2. 網絡控制技術

網絡控制技術指的是實現數據採集、傳輸和評估以及網絡的監視、控制和調節的技術，既可用於電網也可用於其他供應網絡，例如熱力、燃氣和供水網絡。過去的網絡控制技術由於是進行饋電，因此主要是在最高電壓等級下實施，而現在隨著電網中多個分散式發電機的集成以及低壓和中壓等級的發電機饋電，網絡控制技術的應用已擴展到不同等級，並且饋送管理在電網領域越來越重要。

### 3. 電力基礎設施的數位化

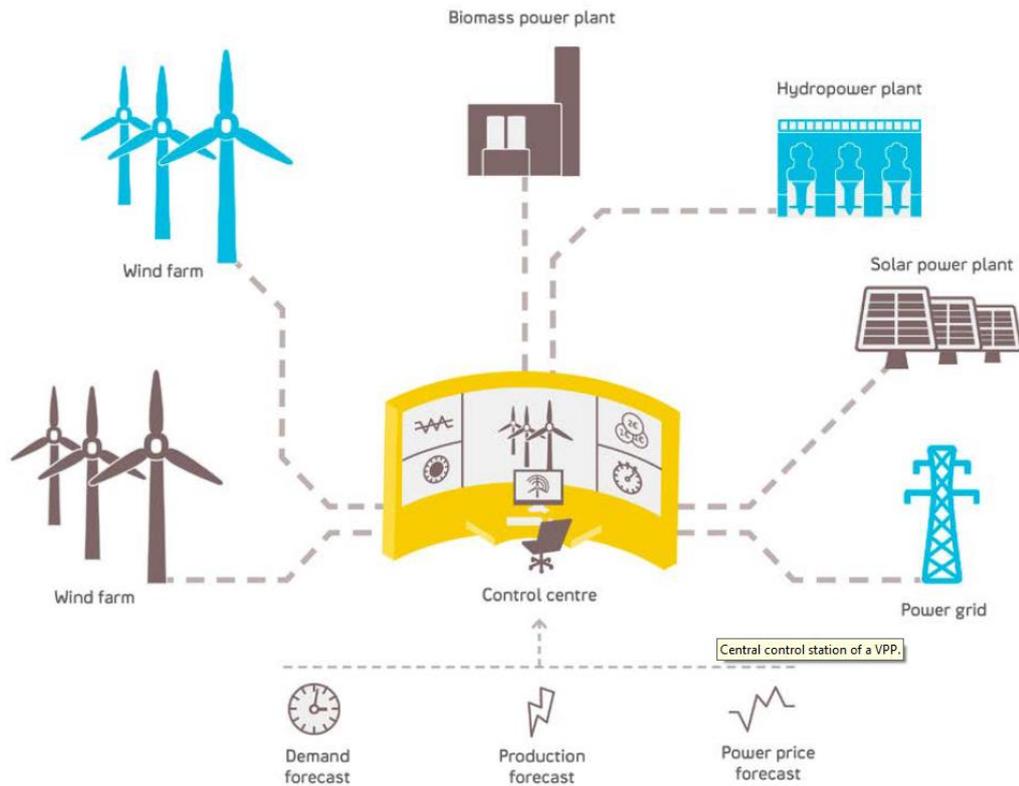


圖 3.5 智慧電網虛擬電廠中控站示意圖

（資料來源：聯邦經濟事務及能源部「Energy solutions made in Germany」）

電力基礎設施的數位化特別是指智慧電網的發展，智慧電網可以最佳化地平衡發電與用電量，因此即使電源波動，也可以始終保證供電。智慧電網中的現代通信技術（ICT）可以全時獲取和傳輸網絡狀態，然後這些數據可用於負載和發電機的精確連接和斷開。數位技術還可用於虛擬電廠<sup>4</sup>，以幫助提高電網的靈活性，例如，透過增加需求並減少虛擬電廠的生產來消耗多餘的電力。

虛擬電廠的運行需要實時監視系統，該系統允許生產者監視其可用功率和運行準備情況。例如，如果虛擬電廠包括太陽能電廠和風力電廠，則還需要在監控系統內考慮天氣數據，監控系統確定虛擬電廠可向電網輸送多少電力，因為電廠可以輸送的電量取決於天氣。

#### 4. 微電網系統

微電網系統或微電網是自給自足的電網，由於地理條件或成本效益考量或

<sup>4</sup> 虛擬電廠（Virtual power plants, VPP）不是傳統意義上的發電廠，而是由多個發電廠、負載或儲存組成的虛擬網絡。儘管各個工廠可以位於不同的位置，但產生的電力在被送到電網之前，在所有電廠中都是均衡的。

者連接困難，無法連接到較大的互連電網。由於成本效益的考量，微電網系統特別用於電力消耗較低的農村、偏遠地區或總體基礎設施薄弱的國家。微電網系統的大小差異很大，可以小到單個用戶（例如偏遠的飯店或礦山）自給自足的電網，也可以大到整個村莊或島嶼的電網。

柴油發電機為傳統微電網系統中的核心電源，提供靈活、由需求驅動的電力供應，然而柴油燃燒還與環境和健康方面的不利因素相關聯，例如廢氣和工業能源的進口，因此一個環保、具有成本效益和可靠的替代方案，是用再生能源系統結合儲存技術來替代或補充柴油發電機。混合動力系統在國際上被廣泛使用，因此與電池儲存系統一起使用的光電系統、小型風力發電廠和水力發電廠為微電網系統的發展提供良好的潛力，通常在微電網系統中除再生能源系統外，需要一臺或多臺柴油發電機用於應急用電需求。

微電網系統的另一個特點是對網絡管理有特殊的要求，在電力供應過剩或不足的情況下，必須平衡網絡容量，而微電網本身不能選擇與相鄰電網交換電力。此外，一旦負載或發電量發生變化，微電網內的發電機和用電設備數量少則會導致較大的電網波動。由於複雜的網絡平衡，微電網系統需要特殊的逆變器和充電控制器，透過電池、發電機和負載管理來控制電壓和頻率，從而進行微電網系統的整個能源管理。

## （二）電力儲存技術

為了使具有大量再生能源和替代燃料的持續性能源供應成為現實，儲能是能源基礎設施的重要一環，儲存通常可以使能源系統更加靈活補償需求和供應的高峰，還可以實現離網或移動能源供應，在電力部門儲能器還可用於電壓和頻率控制。儲存技術的優勢：（1）確切產生時間無關能源消耗；（2）在高電價時選擇了基於需求的電力營銷，因此利潤更高；（3）容許跨部門和基礎設施使用饋電，例如以電氣轉換為氣（power-to-gas）的形式。

蓄電系統通常可以分為電、電磁、電化學或機械儲存系統。在這些不同的類別中，各個動力儲存系統的注入和退出速度、儲存容量、放電深度、使用壽命、自放電、反應時間和成本各不相同。就其應用領域而言，蓄電系統可以是短期的，也可以是長期的。

### 1. 短期儲存系統

用於幾秒鐘到幾分鐘、頻繁但短暫的電力儲存系統，包括電容器、超導磁

能儲存系統和飛輪；儘管電池可以提供幾小時到幾天不等的更長儲存時間，但短期儲存系統也包括電池在內。

- (1)電池（蓄電池）：應用領域廣泛，從電動汽車的儲存模組、住宅建築物的小型儲存單元、微電網系統中用於應急電源的儲存單元到大容量儲存系統，以提供公共電源中的主控制電源供應設施。常見的電池類型是鉛酸電池或鉛凝膠電池、鋰離子電池和氧化還原液電池。由於電池具有模組化結構，因此可以將其縮放為任意大小，且使用不受位置的影響，因此鑑於其高能量密度（取決於電池類型）非常適合移動使用。電池既可用於小型解決方案，也可用於大型解決方案。目前蓬勃發展的電動汽車產業還基於智慧電網的概念整合到電網基礎設施中，借助智慧電網服務，車輛電池可為多餘的電能提供電力儲存容量，並且在供應短缺的情況下，可將這些電能返還電網，這一過程也稱為「車輛到電網（vehicle to grid）」。目前德國正在開發將電能反饋回公共電網所需的充電站。
- (2)電容器（Capacitors）：電容器是可以在電場中儲存電能的組件，因為不需要在儲存過程中轉換能量，因此能量損失低、儲電效能高，另由於具有很高的循環穩定性，因此使用壽命長。電容器主要用於需要大量短時充放電週期的情況下使用，作為儲存系統，電容器的局限性在於其低能量密度和儲存容量，即使是超級電容器，其功耗也大大低於電池。由於具有很高的自放電率，因此也僅適合用作秒級的短期儲存系統，而且目前電容器的使用與高投資成本有關。
- (3)超導磁儲能系統（Superconducting magnetic energy storage systems, SMES）：SMES 由一個線圈組成，一旦線圈中的電流被施加的電壓觸發，線圈內部就會形成電磁場。當該電流停止流動時，電磁場將保留並因此儲存電能，然後可在必要時通過電能轉換系統將其轉換回電流。與其他電力儲存技術相比，SMES 像電容器一樣具有明顯的高效率優勢，通過直接儲存功率而不進行轉換即可達到這種效率，因此功率可以在很短的時間內儲存，並且也可以再次使用。與電池相比，SMES 具有理論上無限制的充電和放電循環次數，因此具有使用壽命長的優勢。但是 SMES 像電容器一樣，只能在幾秒到幾分鐘的短儲存時間內使用，能量密度低並且需要大量投資。由於這些特性，使得 SMES

及電容器都只適用於必須儲存電流並在短時間內再次提供電流的應用，例如在電壓驟降或短時間中斷時用於網絡平衡。

(4)飛輪儲能系統 (Flywheel energy storage systems)：飛輪是由電動機驅動的轉子，從而將電能轉換為動能，以動能形式儲存電能。如果要將動能轉換回電能，則可以將電動機用作發電機，制動轉子並產生電能；充電和放電時間在幾秒鐘到大約 20 分鐘之間。飛輪可以在短時間內儲存和補充大量的電能，使用壽命長且運行成本相對較低，特別適合用於穩定短期負載波動的網絡，例如小型微電網系統以及平衡風能的供應，然而飛輪具有較高的自放電率、較低的能量密度和相對較高的儲存成本。

2. 長期儲存系統：與短期儲能系統相比，長期儲能可以將電力儲存數週至數月，因此適用於工業和公共能源供應。長期儲存解決方案包括抽蓄水力、壓縮空氣儲能和氣體儲槽。

(1)抽蓄水力系統：透過電動機使用電能來驅動泵浦，該泵浦將水從下部蓄水池輸送到上部蓄水池，需用電時將水從上部水庫向下流入下部水庫，由於兩個水庫的高度差產生的水動能可以啟動發電機將動能轉換回電能。儘管其運行成本較低，但抽水蓄能電站在建設階段仍需要大量投資。除了高昂的成本外，抽蓄水力站的建設常常對景觀產生重大影響，這使得抽蓄水力站在某些情況下成為社會上不太可接受的選擇，此外，在具有特定地理條件的地區使用抽蓄水力的選擇受到限制。為了達到兩個水庫之間所需的高度差，抽蓄水力站需要山區地形或洞穴，例如地下的地下礦井、露天礦井或人造水庫。

(2)壓縮空氣儲能：電能以壓縮空氣的壓力能的形式儲存，在儲存過程中，多餘的注入功率用於驅動壓縮周圍空氣的壓縮機。然後將這些空氣冷卻並儲存在地下室或壓縮空氣罐中，當需要儲存的電能時，壓縮空氣被引導到燃氣輪機中並在此膨脹，燃氣輪機由膨脹的空氣提供動力，因此與發電機一起發電。

(3)儲氣：使用天然氣發電技術 (power-to-gas) 將電能轉換為氫氣或合成甲烷，當再次需要電力時，氫氣或合成甲烷可通過內燃機、發電機或燃料電池進行轉化。

A. 氫氣和合成甲烷可以氣態和液態形式儲存。為了以液體形式儲存氣體，必須將氣體冷卻至極低的溫度，因此必須消耗額外的能量；而為了儲存低體積高密度的氣態氫和合成甲烷，需要大容量的儲罐或容器。合成甲烷的密

度是氫氣的 3 倍，可以使用壓縮來增加能量密度或儲存密度，但在此情況下儲氣罐必須能夠承受質量增加的內部壓力，這重量對儲罐的可運輸性具有負面影響。

B. 儲氣法非常適合用作大型長期電力儲存，因為理論上氣體形式的電力可以無限期地儲存，然而將電轉換成氫或合成甲烷的過程常導致高能量損失，因此與其他儲存技術相比，這種方法效率低下。但是如果僅將氫和合成甲烷視為除動力儲存介質以外的其他物質，無需重新轉換就可以在其他行業直接重複使用，則可以實現更高的效率。

### **(三) 跨部門服務**

除了前開所述的發電及儲電技術之外，跨部門服務還提供了另一種提高能源效率的選擇，由於這些服務是整合性的，因此為持續開發奠定基礎。跨部門服務涵蓋了能源部門的諮詢、規劃和管理活動，包括：（1）電廠建設計畫和計畫的計劃、融資服務；（2）安裝、維護技術和結構工程及組件；（3）能源審核的執行；（4）能源諮詢與能源管理；（5）基於資通訊的控制和監視服務，用於監視、控制和調節能耗及能源契約；（6）研究服務；（7）對技術人員的培訓；（8）技術設備和建築材料的認證以及專業知識的認證。資通訊、測量和控制技術的使用是這些服務的關鍵，處理數據的技術以例如智慧電錶或應用程序的形式，形成了客戶和服務提供商之間的橋梁。

### **三、績效管理機制**

能源轉型過程中，聯邦政府建立能源轉型監控系統持續監督轉型期間的發展，定期檢視目前政府採取的行動方案、計畫或措施的實施成效，並在錯過目標時採取行動。

年度監測報告是該監測系統的核心，監視過程的核心任務是將收集的大量能源資訊進行分析並使其易於理解，該項作業涉及對已經採取的措施進行評估，報告顯示能源轉型中所處的狀態以及需要進行調整的方向，並確定需要進一步努力的領域。通過這種方式，每份年度報告都提供了有關能源轉型及其當前階段的概述，且在決定下一步要採取的步驟之前，需要先知道下階段要到達的目標或里程碑。

聯邦經濟事務和能源部為能源監測的領頭部會，每年的監測報告經聯邦內閣批准後公布，並轉交給聯邦議院和聯邦議員；聯邦政府並以此報告來回應「能源工業法」和「再生能源法」相關規定的要求。

另外，聯邦政府每 3 年會將監測報告與策略進度報告進行比對，深入分析和發現新的發展趨勢，該報告還研究是否正朝著實現長期目標邁進，或者是否必須考慮採取其他行動。在此過程中還有一個由 4 位著名能源專家組成的獨立委員會進行協助，他們為監督過程提供建議，並就監測報告提供科學意見，相關意見併同聯邦政府的報告一起發表。首份每 3 年發布 1 次的能源轉型進度報告，已於 2014 年 12 月 3 日發布。

「能源統計法」是德國官方能源統計的國家法律依據，為了使該法案適應德國和國際能源市場的當前形勢，聯邦議院於 2017 年 1 月 26 日通過了該法案的修正案草案。監控能源轉型過程的統計數據，主要來源是官方的能源統計資訊，進一步的細部數據和統計數據由聯邦網絡局、環境局、聯邦汽車運輸管理局 (Federal Motor Transport Authority)、德國經濟研究所 (German Institute for Economic Research)、Statistik der Kohlenwirtschaft (負責向政府提供煤碳行業統計數據的組織)、再生能源統計工作組 (Working Group on Renewable Energy Statistics) 和能源平衡工作組 (Working Group on Energy Balances) 等機關 (單位) 提供。相關數據可以在聯邦經濟事務和能源部和聯邦網絡局的網站上取得。

聯邦經濟事務和能源部為實施能源轉型而採取的措施，事後將接受聯邦審計法院的審查，能源審計以量化的成本效益確定節約能源的情形，以進一步優化電力和熱量的供應與消耗。該部對聯邦審計法院審查結論的回應，也可以在其官網查得。

#### 四、資源回收環境保護機制

太陽能板在製造晶圓的過程中會產生矽污泥等廢棄物，沒有妥善處理將導致廢水、土壤汙染。只要製造矽晶材料的公司確保生產過程的防護設備符合標準，則可依目前已發展的技术將矽污泥提煉成鋼鐵業的原料，至於除役或故障廢棄的光電組件如鋁框或玻璃等可回收再製、CIGS 化合物薄膜太陽光電模組太陽能電池使用的銅、銻、鎵、硒等貴重稀有金屬可再回收，且德國聯邦環境局估計已具足夠的經濟效益吸引業者進入回收市場將廢棄物資源化，減輕環境負擔，達到資源永續循環利用目的。

德國估計到 2020 年底，潛在的薄膜太陽能板廢棄物約 9,000 噸至 50,000 噸 (詳表 3.1)；另依據 ISE2017 年的估計，回收光電組件其中的白銀、銅、錫、矽、鋁、玻璃等物質的價值就達每噸 544 歐元至 1,478 歐元，且舊模組由於銀含量更高，因此更有價值。德國並期待與臺灣在廢棄太陽光電板上合作，進行收回、拆解

及有價物質等之回收。

表 3.1 德國預估截至 2020 年底太陽光電模組廢棄量

類別	潛在廢棄物量 (噸)
C-Si	7,263 ~ 40,996
CdTe	544 ~ 4,043
a-Si	931 ~ 5,109
CI(G)S	140 ~ 1,429
總計	9,000t ~ 50,000 t

(資料來源：德國聯邦環境局簡報)

至於歐盟未來整體的太陽光電模組廢棄量推估如下表 3.2：

表 3.2 歐盟未來的太陽光電模組廢棄量推估

年度	太陽光電模組廢棄物量 (噸)
2025 年	14,000-22,000
2030 年	152,000-223,000
2035 年	1,800,000-2,900,000
2050 年	4,900,000-9,600,000

(資料來源：德國聯邦環境局簡報)

德國依據歐洲議會及理事會<sup>5</sup>對於所有與廢物處理有關規定的基本目標，必須是保護人類健康和環境免受廢物的收集、運輸、處理、儲存和傾倒所造成的有害影響，並鼓勵廢物的回收和使用回收材料，以保護自然資源，爰訂定循環經濟法(KrWG)、WEEE 法及 Elektro G 法等，針對其中有關電氣和電子設備部分建立太陽光電廢棄物品回收機制<sup>6</sup>，擴大歐盟製造商（包括進口商和經銷商）分攤其生產的電氣設備的處置成本（所謂的產品責任或回收和處置責任）責任，德國的產品並由公共廢棄物處理當局介入分擔責任，包括：（1）產品設計與標籤；（2）資訊公開；（3）退貨、收集和分類；（4）物流運輸；（5）回收與處置。

德國自 2015 年 10 月 24 日起記錄廢棄的太陽光電組件，在此之前廢棄的太陽光電組件是作為混合建築垃圾處理，其收集是由公共廢棄物處理當局收集，電子電

<sup>5</sup> 1975 年 7 月 15 日 75/442/EEC、2006 年 4 月 5 日 2006/12/EC、2008 年 11 月 19 日 2008/98/EC。

<sup>6</sup> 太陽光電廢棄物之處理屬歐盟在 2003 年 2 月所通過的一項廢棄電子電機設備指令（Waste Electrical and Electronic Equipment Directive 2002/96/EC，縮寫：WEEE）。

氣廢棄物基本上分為 6 類：(1) 熱交換器；(2) 表面積超過 100 平方公分的螢幕、監視器和設備；(3) 燈具；(4) 大型設備>外部尺寸的邊緣長度為 50 厘米；(5) 外部尺寸長度小於 50 公分的小型設備和資通訊技術小型設備；(6) 太陽光電模組。

以私人家庭的太陽光電組件回收為例，全德國共有 1,765 個鄉鎮市區的公共廢棄物處理機構（市政回收中心），如果電氣（電子）設備經銷商的銷售/倉儲空間在 400 平方公尺以上，個人購買之光電組件各邊長均小於 25 公分者，則無強迫交回一個廢棄產品的規定，但新產品尺寸較大者，購置一組時必須回收一組舊設備，以履行資源回收、廢棄物管理責任。如果將光電模組從一商業企業拆卸下來，只要設備的數量與私人家庭中通常發生的數量相當，並由貿易商交付，也依循私人家庭的資源回收模式。

商用（家庭以外）太陽光電組件的回收部分：

- (1) 2015 年 10 月 24 日後投放市場的太陽光電組件（例如太陽能公園或大型太陽光電系統模組）：製造商必須為自己產品的回收處理負責，但允許製造商和太陽光電組件擁有者透過契約協議進行回收處理。
- (2) 2015 年 10 月 23 日之前投放市場、歷史悠久的光電組件（舊設備），由業主負責處置並承擔相關費用，但製造商可以自願提供退貨，從而對回收處理負責。

德國的廢棄電子電器從收集到回收，基本上生產製造一開始就要記錄（註冊），才能正確收集廢棄物，收集之後進行選擇性處理和污染物去除，再進行回收再利用：

- (1) 記錄：記錄所含的金屬礦物成分、生產廠家、經銷商、歷史舊設備的所有者。正確的註冊紀錄應該包含有無避免設備損壞或遭機械壓縮的損壞、有無防風雨蓋（例如用拉伸膜固定在容器或貨盤上）、有無堆疊置放，其目的是為了要清楚知道破碎或損壞可能釋放如鉛或鎘的污染物、防止模組的損壞，對於污染物去除與回收及預防環境危害和污染至為重要，且是基於後續處理的工作安全和健康保護（如碎玻璃傷害），並為高品質的回復與重複使用做準備。
- (2) 處理：初步處理及認證，確認準備更換零組件重複使用或去除污染物並分離有價值的材料。如係要去除污染物並分離有價值的材料，主要處理項目或程序包括：清除所有液體及處理重要項目（開關及 LCD 設備背光燈等含汞組件、電池和蓄電池、大於 10cm<sup>2</sup>的印刷電路板、液體和糊狀的墨盒、FSM 等塑料溴、石棉及含石棉成分的廢棄物、陰極射線管、氣體放電燈、大於 100cm<sup>2</sup>的液晶螢幕、外部電線、

耐火陶瓷組件、含有放射性物質組件、大於 25mm 電容器、含鎘/硒的感光元件，以及 CFC、HCFC、HFC、KW 等冷媒)。

(3)回收再利用：由後續處理廠進行後續處理，並為回收過程準備不同的物料流。

光電組件使用壽命約 20 至 30 年，預測其廢棄物量取決於使用壽命、生產數量或生產技術比重。2016 年德國光電組件的安裝數量約 400 萬噸，其中 90%為矽晶體模組，10%為薄膜組件（銅銦鎵硒 CIS/CIGS 或鎘化碲 CdTe 化合物半導體薄膜類、非晶矽 a-Si），為了減少光電組件的潛在浪費造成汙染，德國未來將大幅加強廢棄物的物流管理，對光電組件除加強防止鉛及鎘等污染物的污染、排放和殘留的處理外，並將持續強化下列 3 項：

- (1)高品質玻璃回收：符合玻璃容器行業要求的玻璃、平板玻璃。
- (2)優質鋁材料回收：用作輔助原料，而不用作脫氧劑。
- (3)半導體材料和貴金屬（特殊金屬）回收：如銦、矽、銀等。

## 肆、心得與建議

### 一、心得

(一)強化能源基礎建設並能靈活性調度電力是再生能源持續推動的關鍵

面對再生能源的增加導致能源供應的波動，必須建構完善的能源基礎建設，並使用不同的靈活選項來平衡波動，而靈活性調度需根據需要的時間進行排序，理想情況下，德國的電力市場應該支持靈活選項之間的良性競爭，而不是僅僅促進或支持多種靈活性選項。至於德國的「Power-to-X」術語，概括了將多餘的電能（在大多數情況下為再生能源）轉換為可以儲存或使用的其他形式（例如天然氣、熱能或其他化學物質）的不同選擇，且透過研究機構不斷實驗測試轉換效率，俾以最佳效率模式移供實際商業用途。

(二)德國能源轉型的推動越來越多是建立在電力、運輸、建築和供熱部門的綜合發展之上

德國預計在未來幾年中，電力、供熱和運輸這三個領域中的再生能源重要性會逐步提高，除了提高能源效率和擴展再生能源外，未來德國的能源、交通運輸、建築和供熱部門之間將有更大的互動進行跨域合作，德國聯邦政府也將繼續推動供暖(供熱)轉型，實現能源轉型和溫室氣體全面減排目標。

### (三)能源轉型發展再生能源的同時，應持續進行環境監測和人類健康影響的評估

德國電力領域中再生能源增長的環境監測，由聯邦自然保護局進行委託研究，而監測能源轉型對環境影響的第一步是建立品質評估工具，以評估伴隨能源轉型對環境及人類的影響和變化，及評估能源系統的環境兼容性。透過監測與評估，可以回饋至能源轉型發展政策的檢討與調整，以維持電力穩定供應、維持生態穩定、確保對生物（含人類）健康無害。

### (四)建立再生能源廢棄物資源回收環境保護機制，確保環境生態永續

太陽能板在製造晶圓的過程中即會產生矽污泥等廢棄物，只要矽晶材料製造廠確保生產過程符合環保標準，則可依目前已發展的技術處理將矽污泥提煉成鋼鐵業的原料，至於除役或故障廢棄的光電組件如鋁框或玻璃等可回收再製、CIGS 化合物薄膜太陽光電模組太陽能電池使用的銅、銻、鎵、硒等貴重稀有金屬可再回收利用，且依德國聯邦環境局的分析推估，已具足夠的經濟效益吸引業者進入回收市場將廢棄物資源化、減輕環境負擔，達到資源永續循環利用目的。

## 二、建議

### (一)強化電網等能源基礎建設，運用資通訊智慧技術靈活調度電力

#### 1. 擴展電網並建置雙向傳輸電網，運用資通訊、電力電子技術穩定供電：

(1)風力發電及太陽光電等再生能源的動態變化和分散的電力，以及電動汽機車不斷增加的發展趨勢下，傳統單向流向的輸配電網已無法因應未來社會的需求，建置雙向傳輸電網才能調節電力。為了避免配電網發生瓶頸並保持電壓的穩定性，需要越來越多的風力發電與太陽光電的氣象觀測及測量、控制、通信技術來支持電網中的頻率和電壓控制，因此電網與發電機、用戶和電力儲存單元之間需要越來越多的接口，電源的靈活性、分散性和數位化以及所需的相關 IT 安全性和系統服務也將發揮越來越重要的作用。

(2)採取適當的措施來擴展輸電電網，以利可以在大面積上達成供需平衡效果。

2. 建置新世代電廠，強化常規（火力）發電廠的靈活性：改善現有電廠設計和調整新發電廠的設計方式，可以使其對剩餘的電力需求做出更靈活的反應，此外，還可以在較低的最小負荷水準（「必須運行」容量）下運行，以增強系統整合再生能源的能力。

3. 強化電能儲存或轉換：德國/阿爾卑斯山/挪威的抽蓄水力發電，將多餘的電能轉換為熱能或天然氣能量，因此在可預見的將來可以滿足儲存需求較低的趨勢，

但隨著再生能源比率的增長，目前太陽光電、風力發電、水力發電和火力發電等各種發電的電力儲存技術仍然是我國須深入研究的議題，以維持足夠的備用容量。

(二)強化電力、運輸、建築等機關構之交流合作，設計多元電力供應解決方案，以符未來社會發展及用電需求

電動汽機車不斷增加的發展情況下，移動的電動運具亦屬一種儲能裝置，當發電廠的供電不敷所需時，未來智慧電網需有電動運具電力可以反饋至電網之設計，以平衡電網並提供基本用電需求。而太陽光電在建築方面的應用不僅是在屋頂型發電裝置，目前德國 ISE 已發展出彩色的太陽能板可以嵌入建築物的立面，可以與建築物外觀相結合，雖其因彩色面板致發電效率略低於一般屋頂型的太陽能板，但美觀且可舒緩電力供應及溫室氣體排放的氣候問題。因此，電力及能源機關構應加強與運輸、建築部門的交流合作，隨科技及社會發展趨勢，設計多元電力供應解決方案。

(三)強化能源轉型過程環境監測和人類健康影響評估機制，適時調整能源轉型相關措施，俾再生能源發展與環境生態兼容

經濟部能源局為我國推動再生能源之主政機關，推動能源轉型除涉及環境生態保育、溫室氣體減量，也涉及能源效率、能源價格外部成本內部化等跨部會溝通協調議題。其中離岸風電對生態環境影響的部分，尚有賴與農委會、環保署等相關機關及研究單位建立監測及調查規範，並進行實證；陸上風電部分則另涉及對人類健康的影響評估，尚待與衛福部等相關機關建立評估機制，俾於再生能源推動過程中，適時調整相關措施以避免對生態環境及人類健康造成危害，使再生能源發展與環境生態兼容、永續發展。

(四)建立再生能源廢棄物資源回收環境保護循環經濟環境，透過新商業模式的建立，達到環境生態永續目標

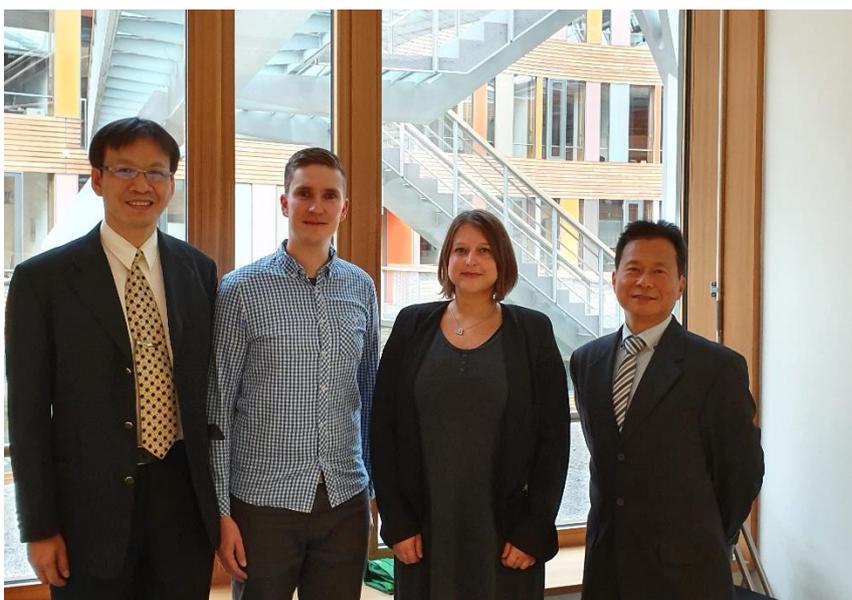
隨著再生能源的蓬勃發展，創新的技術解決方案和新的商業模式勢不可少，從而為有效實施能源轉型做出巨大貢獻。有關太陽光電部分，我國太陽光電累積裝置量在 2010 年開始明顯增加，而太陽光電板正常運作下壽命可長達 20 年以上，雖 2030 年過後才會開始明顯出現廢棄太陽光電板，但世界各國如歐盟(德國)、美國、日本已開始制定相關回收對策，因此我國除了進行再生能源環境建構及發展系統關鍵元件開發能力，並提升可靠度使產業高值化外，宜就廢棄模組

回收機制與技術進行研究，或研析國內外現有模組回收機制、技術及運作模式，並評估成本效益，吸引業者進入回收市場，建構適合本土的資源回收運作模式。

## 拜會照片



108年11月4日拜會聯邦經濟事務及能源部，交流後與國際化石燃料及核能處副處長 Ursula Borak 女士、國際能源合作處 Toni Glaser 博士、再生能源電力處 Marius Backhaus 先生、離岸風電世界協會主席 Martin Skiba 教授及駐德國代表處經濟組何組長元圭合影



108年11月5日拜會聯邦環境自然保育及核能安全部所屬環保署，與該署 Axel Strobel 先生、Isabel Wagner 律師及駐德國代表處經濟組楊秘書禮騰合影



108年11月6日聯邦電力天然氣電信郵電及鐵路網絡局，與該局國際能源協調組經濟學家 Stefan Arent 博士、駐德國代表處由楊秘書禮騰合影



108年11月8日拜會弗勞恩霍夫太陽能研究所（ISE），與 ISE 公關及出版品部 Kovach-Hebling 博士、太陽能廠模組處處長 Harry Wirth 博士及能源系統分析專家 Philip Sterchele 博士合影