



德國的 大能源實驗

德國決定推動野心很大的
溫室氣體減量計畫——
同時關閉核能發電廠。
這個高度工業化的國家，
能以風力渦輪機和太陽能板
生產足夠的電力，
應付整體經濟需求嗎？

文大衛·陶伯特 David Talbot

本刊獨家取得美國麻省理工學院

Technology Review 期刊圖文授權

Technology Review, Published by MIT.

TECHNOLOGY REVIEW

Internet URL: www.technologyreview.com

Technology
PUBLISHED BY MIT
Review

德國西部北萊茵——威斯特法倫 (North Rhine-Westphalia) 州的一條鄉村路上，住著一位名叫諾伯特·李爾斯 (Norbert Leurs) 的農夫，他 36 歲、和藹可親、雙手長繭並育有兩個小孩，不久前他從事平凡無奇的農事：種馬鈴薯和養豬。但從他最近的生意經，可以看出歐洲最大經濟體在能源政策的大轉變。2003 年，一家小型風力公司在李爾斯的馬鈴薯田上豎起一座 70 公尺高的渦輪機。這是散布在幾百處德國鄉間風力發電廠中，約 22,000 座渦輪機裡面的一座。李爾斯可以從電力銷售額中抽取 6%，合一年收入約 9,500 美元。他正考慮增添二或三座渦輪機，每一座都是第一座的兩倍高。

然而，從風力渦輪機得到的利潤，和他即將從太陽能板賺到的錢相比，其實不算多。2005 年，李爾斯獲知政府要求地方公用事業公司支付高價，購買屋頂太陽能電力設備。於是他去辦理貸款，接下來七年內分階段將豬舍、穀倉和房舍都鋪上太陽能板——即使天空經常灰暗，屋頂的集光角度也未必適當，他現在每年發電 690 千瓦發，營收 28 萬美元，等他還清貸款，可望獲得超過 200 萬美元的利潤。

李爾斯的故事，可以解釋德國如何能在 2011 年，從可再生能源生產 20% 的電力，高於 2000 年



德國北海港口羅斯托克 (Rostock) 附近的造船廠中，西門子公司正在建造一座巨大的平台，把設備安裝在上面，以管理遠處岸外風力發電廠產生的電力。

的 6%。德國保證支付高價購買風力、太陽能、生質物和水力發電產生的電力，並將成本計入電費帳單。像李爾斯和為他安裝渦輪機的小型電力公司等參與者，使用現成的技術，並且鎖定利潤。對他們來說，這樣的綠化行動，再簡單不過了。

接下來要做的事可就沒有那麼的簡單。2010 年，德國政府宣稱將著手推動「能源轉型」(Energiewende；或稱能源革命)，從化石燃料改用可再生能源，是重工業化國家嘗試過、野心最大的計畫。能源轉型的目標，是將 2020 年的溫室氣體排放量，從 1990 年的水準減低 40%，到 2050 年更降低 80%。這個目標的挑戰性很高，但德國從核能發

電產生 20% 以上的電力，所以這個目標比較容易達成。核能發電幾乎不產生溫室氣體，但民眾關切去年日本福島海嘯後的核能災難，總理安格拉·梅克爾 (Angela Merkel) 下令立即關閉八座運轉最久的德國核能發電廠。幾個月後，政府拍板定案，決定在 2022 年之前關閉其餘的九座核能發電廠。現在，「能源轉型」還包括不使用德國最大的低碳電力來源。

德國已經準備好展開一場巨大的實驗，可能在全歐洲引起迴響。歐洲十分依賴德國的經濟實力，而德國必須以前所未見的規模，負擔龐大但不確定的成本，建立和使用可再生能源技術，同時降低能源的使用量。它必須順利達成目標，而不傷害依賴電力的

產業。「就某種意義來說，『能源轉型』是沒有技術解決方案的政治聲明。」奇異能源德國公司 (GE Energy Germany) 執行長史蒂芬·萊梅特 (Stephan Reimelt) 說：「德國正強迫自己要有創新，因此而誕生一座規模之大、前所未見的巨大工業實驗室。我們必須嘗試許多不同的技術，才能達成目標。」

德國能源產業的巨頭立刻採行幾項策略。為了取代核能發電，它們搶著在遠離德國海岸的北海，建置龐大的風力發電廠；它們也計劃設立新的輸電基礎設施，將電力送到德國的工業區。在此同時，西門子 (Siemens)、奇異 (GE) 和德國最大的電力生產商RWE等公司，正在尋找各種方法，在風力和陽光微弱的時候，維持廠房運轉不輟。它們正在尋找便宜且大規模的電力儲存形式，並希望以電腦軟協調為數可能高達數百萬的分散電力來源。

這次轉型的成本估計差異很大，一部分因素，端視新技術引進的速度和價格降低得有多快。各經濟智庫預測，未來八年，德國在基礎設施擴張和補貼上，將花費1,250億到2,500億美元之間——介於德國2011年國內生產毛額 (GDP) 的3.5%到7%，這包括核能發電廠除役在內的費用，能源轉型的長期成本將比這個數字高出更多。

德國已經承擔很高的成本，除了重工業，每個月的電費賬單包括可再生能源附加費約上漲15%。自八座核能發電廠關閉以來，批發電價躍漲約10%。德國的電力網不曾那麼吃緊。說來諷刺，「能源轉型」的目標在於降低溫室氣體排放量，關閉核能發電廠，卻更加依賴火力發電廠。

儘管需要承擔這些成本，德國卻有可能從這次的大實驗獲得巨大的利益。過去十年，德國不只扶持風力和太陽能發電，也培育了較少為人報導的能源技術，例如管理軟體和高效率產業流程。這些「綠能」技術加起來，創造的出口產業價值高達120億美元——而且柏林自由大學 (Berlin Free University) 環境政

德國正強迫自己有所創新，
因此誕生一座規模前所未見的巨大工業實驗室。
德國必須嘗試許多不同的綠能技術，
才能達成關閉核電廠與溫室氣體減量的目標。

策研究中心主任米蘭達·舒列奧斯 (Miranda Schreurs) 表示，這個數字即將成長得更高。政府實施的政策，可能提供進一步的新技術發展與部署獎勵。「這是可以賣給別人的技術祕訣。」舒列奧斯說：「德國長期的競爭方式，是成為能源效率和資源效率最高的市場，並在這個過程中擴張出口市

場。」

如果德國轉型成功，便能提供一張切實可行的藍圖，供其他工業國家參考。許多工業國家也可能面對能源消費轉型的壓力。「能源轉型眾所矚目，如果在德國行得通，將是其他國家的樣板。」RWE的首席經濟學家葛雷姆·威爾 (Graham Weale) 說，RWE正設法關閉它的核能發電廠，卻希望讓電燈繼續亮著，「如若不然，對德國經濟和歐洲經濟會是很大的傷害。」

能源轉型瓶頸

在紐倫堡 (Nuremberg) 北方20公里處的埃朗根 (Erlangen) 市，訪客必須通過嚴密的安全檢查，才能進入能源巨擘西門子的工業建

築群，裡面有實驗室和工廠。西門子是能源轉型的幾家承包商之一。其中一棟大樓的機具真的嗡嗡作響——總共消耗30個百萬瓦的電力。裡面有一座巨大的鋼和銅製機器，能很有效率地將交流電轉為直流電；這台機器將送往離岸平台安裝，必須經得起北海的惡劣風暴長達數十年之久。

德國需要這種技術，它正在尋找最穩定風力來源，而能夠找到離海岸很遠的地方——遠到用標準的交流電線路無法傳送電力。到目前為止，德國的離岸風力發電量約500個百萬瓦的機具全部安裝在離陸地90公里的距離內，海深不超過40公尺。現在，能源公司計劃在離岸160公里、海深高達70公尺的地方，裝設10,000個百萬瓦的風力發電設備。幾座1萬到2萬公噸的離岸變電站，會將數十億瓦的交流電產出轉成直流電，以利長距離傳送而不損失大量的能源。「世界上沒有其他地方做這種事——以這種方式和這種數量建立離岸電網和離岸連結。」負責德國北海大型計畫一部分作業的荷蘭電網公司天網（Tennet）企業發展總監萊克斯·哈特曼（Lex Hartman）說。

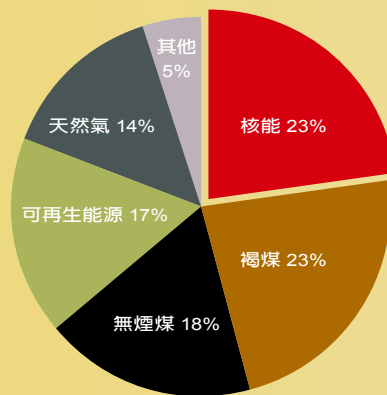
這一切當然只能將電力送到海灘。電力需要跨越德國，送到南方的主要工業中心。這需要約3,800公里長的新電力線，但到目前只鋪設約200公里，原因在於地主不願配合，地區性政治人物也阻礙進度和製造瓶頸。這樣延遲新穎技術的普及，使得德國的離岸風力計畫本身成了一大賭注。「沒人真的知道能源轉型的成本是多少。」慕尼黑大學的能源經濟學家卡倫·皮特爾（Karen Pittel）說：「那些風力發電廠更是未知數——它們大致上是先導專

案。」

不確定的事情不只如此。即使以目前的風力發電水準來說，在有風的日子裡，電網經營業者還是必須關閉渦輪機，因為電力無處可送。當雲層遮蔽本來晴天高照的德國南部，這個地區的許多

2010年德國的發電量

核能電廠關閉前



資料來源：Federal Association of the Electricity and Water Industry

太陽能電池板，可能減少數百個百萬瓦之多的產出；造成的影響，就像關閉一座中等容量的燃煤發電廠，因而提高斷電的風險。

如果沒有足夠便宜、可靠的電力以支援高科技產業和運輸系統，德國的經濟——以及整個歐洲經濟——可能陷入麻煩。一些德國公司已經在其他地方興建新製造設施；例如，化學製造商瓦克化學（Wacker Chemie）去年決定在美國田納西州設立多晶矽工廠，主因是德國的能源成本很高。威爾說：「供電品質只要稍微惡化，對高科技產業便相當嚴

重。即使燈光繼續亮著，我們也看到產業界緊張兮兮。」

為了避免嚴重的狀況，德國將必須開始以遠大於以前的規模，部署儲存技術和採取負載平衡策略。德國今天有31座抽水蓄能發電廠，晚上將水送到高處的水庫，然後利用水往下衝的力量轉動渦輪機產生電力。它們共能夠儲存38個十億瓦小時的電力。聽起來好像很多，卻比德國風力發電廠90分鐘的尖峰發電量還低。

電池或許有幫助，但是目前電池成本太高，讓電池只能扮演能源轉型的小型利基的角色，無法發揮很大的作用。西門子在埃朗根的另一棟建築中，正以三種不同的鋰離子技術，製造牽引車大小的電池。每個電池能供應德國四十棟房子一天的電力，但這種電池太過昂貴，無法作為備用電力。反之，高科技製造商可能利用它們以度過短暫的限電期間（例如15分鐘、8個百萬瓦的供電不穩），好讓專業設備不必花費很高的成本重新啟動。鋰離子電池的價格需要下跌至少一半，才能以規模經濟的方式，儲存來自風力渦輪機好幾個小時的多餘電力。

其他的儲存技術也正在開發之中，但即使具有實用價值，也可能需要等上幾年才能派上用場。舉例來說，西門子的一種新技術，利用過剩電力將水分子分解產生氫。但這只在實驗階段，而且目前

十分昂貴。

不可避免的是，7月炎熱的日子裡，高氣壓會滯留在歐洲上空，渦輪機紋風不動，但被太陽烤焦的德國人急忙打開冷氣。在有大型、便宜的儲存技術可用之前，火力發電廠能快速高效率啟動，是因應尖峰用電的最務實方法。但是興建火力發電廠的誘因少之又少。如果為了滿足尖峰電力需求而興建火力發電廠，那就不再能指望發電廠全時運轉，因為在平日下午，無法預測會隨著日照和風力大小而增減的用電需求。波茨坦氣候衝擊研究所 (Potsdam Institute for Climate Impact Research) 的首席經濟學家歐特瑪·艾登霍費爾 (Ottmar Edenhofer) 說：「電力市場的供給設計，將必須從根本改變。需求波動不拘，而在此同時，供給也波動不拘。兩個構面交互影響，可能使新能源市場失靈，這已經是我們密集研究的課題。」

虛擬電力

杜伊斯堡 (Duisburg) 這座堅韌不屈的城鎮，位於埃森 (Essen) 的正西方，是二次世界大戰的主要軍火製造中心，遭到盟軍的轟炸而夷為平地。德國四大公用設施公司之一的RWE，在這裡走在另一個重要技術的尖端——虛擬發電廠。軟體以聰明的方式，控制數量龐大的小型電力來源（最後

會包括分散式儲存廠址），以協調它們的產出，並在能源市場上出售。這麼做的目的，是將數以千計的可再生能源來源（單獨一個並不可靠），化為公用事業公司能夠仰賴的龐大網路。這是個叫人目眩神馳的概念，但目前仍處於嬰兒期。

在納粹興建、形狀有如尖角巫師帽的防空洞前，有座RWE的實驗室，研究人員正在那裡測試產生熱和電的十二台燃氣鍋爐和燃料電池。理論上，公用事業公司可以請數十萬戶家庭單位，在緊要關頭為電網生產額外的電力——數量更多的家庭單位，則可供電給公寓或辦公大樓。德國有5%為上限的電力，可以用這種方式生產——這個額度，和公用事業公

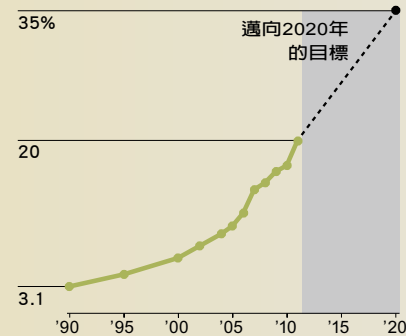
司預期新建的離岸風力發電廠的發電量相當。

要達到這種配電水準，可能需要數十年之久，因為屋主和企業需要逐步汰換現有的鍋爐，並且建置基礎設施，將數十萬個電力來源同步。但是在杜伊斯堡東邊一小時車程的地方，多特蒙德 (Dortmund) 近郊一棟1960年代的辦公大樓中，工程師正在測試比較不起眼的網路，作為計畫的起點。他們將一個地下室伺服器房間，設計成120個小型發電站的通訊樞紐，合起來總共從可再生能源產生160個百萬瓦的電力——主要是靠風力，但也依賴生質物和太陽能。軟體會參考氣象預測，並從風力和太陽能組成可再生能源電力，同時視需要而啟

德國目前推動再生能源發電的進度

德國可再生能源發電的百分率

可再生能源供應百分率 (占總電力消耗量的%)

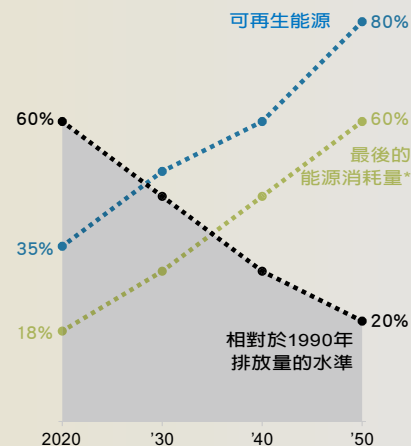


資料來源：Federal Ministry For the Environment, Nature Conservation, and Nuclear Safety

計畫能源更替

溫室氣體排放量和可再生能源用量目標

可再生能源發電



*包括電力、運輸燃料和熱

資料來源：Federal Ministry For the Environment, Nature Conservation, and Nuclear Safety

動和關閉沼氣發電廠，以平衡波動不定的產出，並且產生穩定供應的電力。

類似這種處於早期發展的專案，有如邁向較為複雜系統的踏腳石，將電力需求的管理包含在內：顧客如果同意在尖峰需求時段自動限制用電，公用事業公司將會補償他們。終有一天，這個系統也可能從熄火靜止的電動車電瓶抽取電力，或者將過剩的電力儲存在它們裡面，以彌補風力忽大忽小的變動。

奇異和其他的公司也採用這些概念。「我們知道能源市場將化整為零；這將是個零碎的市場。」奇異的萊梅特說：「以前我們有四家公用事業公司。今天我們有三百五十家發電公司，將來會

夫岡·邁耶 (Wolfgang Mayer) 辦公桌後的落地窗，居高臨下可以遠眺一哩外聳立著貢德雷明根核能發電廠B和C機組的兩座冷卻塔。這兩個機組合起來，是德國最大的核能發電來源。發電廠的地點選得很好，就在斯圖加 (Stuttgart) 和慕尼黑兩個工業區之間的中心點，能夠生產 2.6 個十億瓦的電力。能源轉型對這座小鎮數百人的工作造成威脅，也可能減少稅收，令邁耶感到不解。

「他們說，2017年要關閉B機組，2021年要關閉C機組。」他指向遠處的發電廠說：「但它們都在1989年同時蓋起來！正常人無法理解。邏輯何在？」

不是只有邁耶感到迷惑。目前的政策有不少地方不合邏輯。至

中規模最大的，而且近來全能運轉，以滿足電力需求。

「如果一夜之間關閉八座不排放碳的核能發電廠，就會增加碳排放量。」威爾說：「這時會比原先的預期更依賴煤。也許我們很難如願快速降低二氧化碳的排放量。」現在對於要建置何種發電廠所做的決定，將影響數十年之久，他說：「你不能突然之間，就從投資一種能源設備跳到另一種。」

第二個問題是，就算改用替代能源，德國也沒有獎勵降低二氧化碳排放量。反之，它的政策對特定的技術，提供定義明確的補貼：一千瓦小時的太陽能發電得到的獎勵，高於從離岸風力發電得到的獎勵，而離岸風力發電又得到比陸上風力發電要高的獎勵。雖然太陽能補貼已經降到遠低於李爾斯鎖定的費率，使用太陽能發電仍然支付最高的費率。但如果重點放在降低排放量，那麼應該將更多錢導向降低能源的使用才是。「如果你能選到最適當的工具，那麼最優先的應該是以最便宜的方式達成目標，不應該把那麼多的注意力放在可再生能源，而是應該更重視效率。」慕尼黑的能源經濟學家皮特爾說。

目前的補貼也沒有鼓勵現有技術的創新。例如，開發全新的光電技術幾乎沒有給予獎勵，而這很可能是使未得到補貼的太陽能

縱然能源轉型的挑戰很高，

但只要給予正確的誘因，

技術的進步將遠比人們所預期的還要快。

有一千家，而如果將屋頂裝有太陽能板的每個人算進來，則將有一百萬家。所以我們看到的趨勢之一，是將來必須少強調發電，多重視電力的管理。」

巴伐利亞核電廠的困惑

巴伐利亞小鎮——貢德雷明根 (Gundremmingen) 的鎮長沃爾

少短期內，決定關閉核能發電廠，意味著「能源轉型」將迫使公用事業公司更為依賴煤。舉例來說，RWE去年在接近比利時邊境的現有設施，用最髒的化石燃料（褐煤）讓兩具規劃已久的新鍋爐燃起火焰。雖然這些鍋爐比它們取代的舊鍋爐乾淨，但這座燃煤發電廠是世界上同型發電廠



■ 貢德雷明根一座核能發電廠的冷卻塔，聳立在住家後面。核電廠即將關閉，這些住家將能獲得太陽能發電補貼。

發電，最後便宜到能與化石燃料競爭的唯一方式。

德國的一些經濟學家認為，這個國家的能源政策根本就是走錯了方向。慕尼黑大學的伊佛經濟研究所 (Ifo Institute for Economic Research) 所長漢斯－維爾納·辛恩 (Hans-Werner Sinn) 尤其苛刻。

「能源轉型將一事無成，因為綠能技術根本不足以替代現代社會的能源需求。」他說：「關閉核能電廠是錯的，因為這是便宜的

能源，也因為風力和太陽能發電絕對無法作為替代能源，它們貴得多，而且產出的能源品質比較差。能源密集產業將外移，德國製造部門的競爭力將滑落，不然就是工資將低迷不振。」

德國政治人物當然賭辛恩的看法是錯的。許多叫人振奮的跡象，在在反駁他的悲觀看法。太陽能板的成本急速下降，表示太陽能發電變得更有競爭力，電池的成本可能跟著下滑。如果化石

燃料持續變得更為昂貴，可再生能源發電會更具吸引力。「四十年是一段漫長的時光，而且我們持續因為有利的技術突破而驚訝不已——例如目前太陽能電池價格下跌的方式。」威爾說：「依據拙見，我要強調『能源轉型』的挑戰性有多高。目前看起來很困難。但只要給予正確的誘因，就有好理由相信技術的進步，會遠比我們目前所預期的要快。」

