

德國核電廠關閉之衝擊與再生能源之發展

闕棟鴻

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

受到日本福島核災影響，德國政府在去年夏季臨時決議關閉境內 8 座核電廠，電力短缺問題因此浮現。儘管德國事先已擬定因應策略，將透過興建傳統化石能源發電廠來彌補核電缺口，但去年冬季受到太陽光電發電量驟減與電網分佈不足無法即時傳送電力之影響，德國為確保供電穩定性，仍然需要啟用備用電廠並透過進口鄰國電力的支援，才得以安然度過。德國政府長期規劃未來將以再生能源作為國家主要能源供應，目前德國再生能源發電占比已達 17%，預計在 2050 年再生能源占整體發電將可達到 80% 的目標，使德國邁向一個以再生能源為主的新能源世代。

一、前言

2011 年 3 月 11 日，日本因東北地震引發福島核災後，透過大眾媒體對於各種災情的快速傳播，使全球民眾皆如身臨其境的受到震撼，為此，各國政府無不重新審視自身的能源政策並進行廣泛討論。其中，德國政府亦於 2011 年 6 月 6 日內閣會議中，重新檢視國家整體能源政策，會後決議德國將採取全面廢核的積極態度，並朝向一個以再生能源為主的新能源世代邁進。德國政府同時規劃未來能源在經濟與社會發展的具體目標，其重點內容包含：(1) 在 2022 年後，將全面停止核能的使用；(2)積極擴展再生能源應用於各部門；(3)快速擴展並建立現代化的電網；(4)改善能源效率，特別是針對節能建築翻新，並使用現代化技術來減少電力消耗。

為展現其反核決心，德國政府隨即在 2011 年 8 月 6 日關閉其境

內 8 座較老舊的核電廠。然而電力短缺問題，隨即在用電尖峰的冬季浮現。根據德國當地媒體新聞報導，德國聯邦網絡管理局(Federal Network Agency)已證實，去年 12 月德國南部用電出現尖峰時，因冬季日照時間縮短，使太陽光電發電量驟減，而位於德國北部的風力發電又缺乏足夠的電網容量來輸電支援，因此為確保電力供應穩定與安全，德國電力公司在 2011 年 12 月 8 日與 9 日緊急啟動鄰近奧地利的備用電廠，以因應可能的偶發事件[1]。

德國媒體報導指出，德國目前要維持供電的穩定是極具挑戰性的，目前已有許多工業部門產業開始抱怨電壓不穩定與電力短缺狀況將會造成企業龐大的虧損。幸好去年德國經歷罕見的暖冬現象，暫時舒緩供電的壓力。

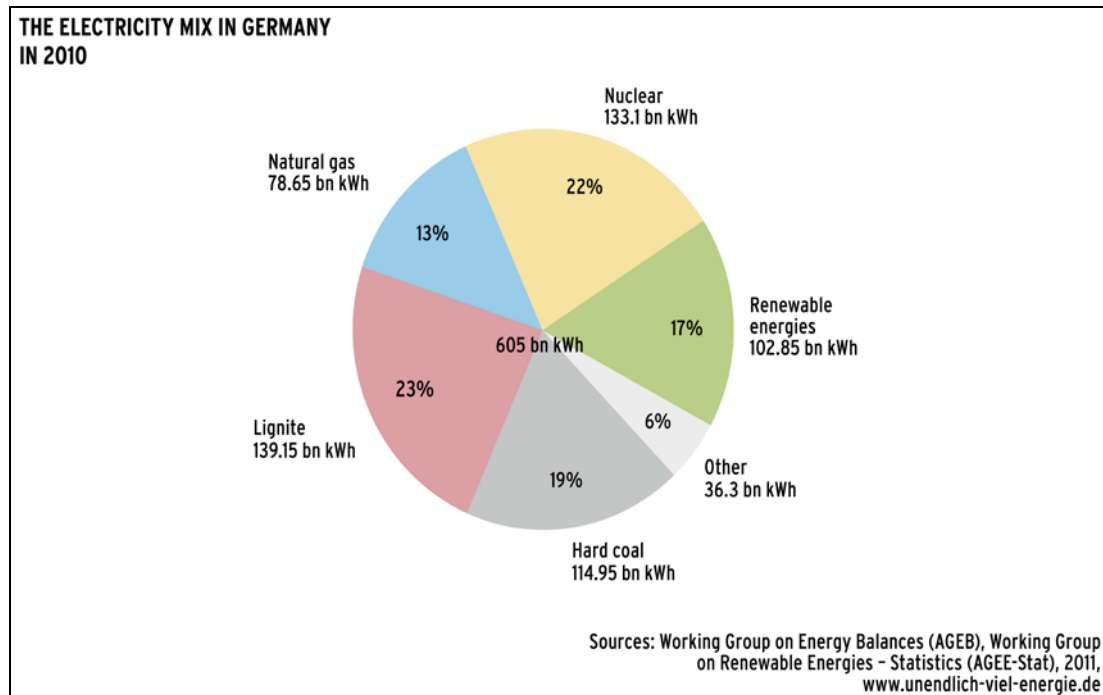
二、德國電力市場

1. 德國的電力結構

依據德國 Working Group on Renewable Energy-Stat(AGEE-Stat) 2011 資料顯示，2010 年德國總發電量為 6050 億度電，其中以燃煤發電占比最高，達 42%，總計發電 2541 億度電，相較於 1973 年燃煤發電占比 69%，燃煤於整體發電之重要性已明顯下降。

除了燃煤發電外，德國核能發電量亦具有相當之規模。2010 年德國核能發電量為 1,331 億度電，占該年總發電量之 22%。相較於 2000 年，德國核能發電量為 1,696 億度電，所占比重為 30%，亦反映出德國核能發電占比呈逐漸下降趨勢。

隨著德國積極發展與投資再生能源，目前再生能源已對德國電力有相當重要貢獻，2010 年德國再生能源發電比重已達 17%，總發電量達 1,028.5 億度電，遠高於在 2000 年再生能源之發電量 372.2 億度電。圖一顯示 2010 年德國發電量與發電結構。

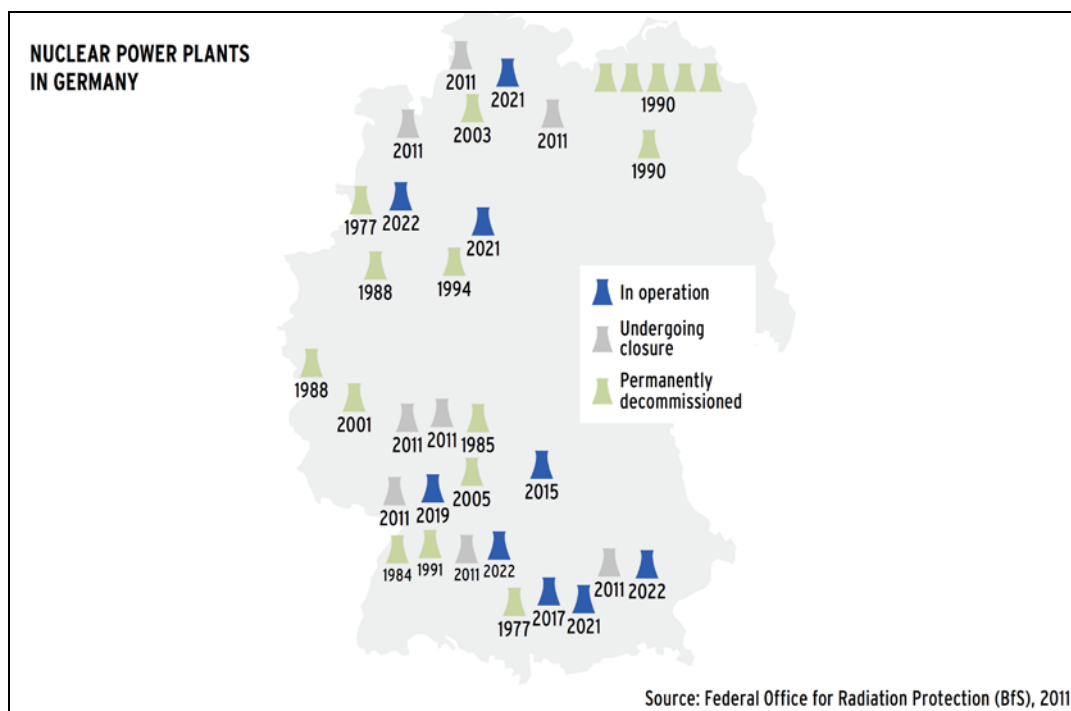


圖一：德國 2010 年之發電量與發電結構[2]

2. 核能除役

德國核電廠具有相當悠久歷史，與許多工業國家相近，德國核能發電係於 1950 年後期開始發展。發展初期，德國先以製造一些小型實驗反應爐為主，首座商轉的核能電廠則座落於 Obrigheim 擁有 357MW 的核電廠。該核電廠於 1969 年商轉，並於 2005 年正式除役。

目前德國境內共有 17 座核電廠，包含 11 座壓水式反應爐 (pressurized water reactors; PWRs) 與 6 座沸水式反應爐 (boiling water reactors; BWR)，裝置容量總計有 20GW [3]。在日本福島核災後，德國政府重新針對核電廠風險進行全面性評估，並決議儘快完成廢核動作。2011 年 7 月，德國聯邦議會 (German Bundestag) 針對核能於 2022 年前除役進行跨黨派投票，最後廢核決議獲得超過 85% 委員的同意。目前德國境內已有 8 座核電廠暫時停止運轉，剩餘的 9 座核電廠亦將分別於 2015、2017、2019、2021 以及 2022 年停役，預計在 2022 年之前，德國將全面停止使用核能電廠，以達到非核家園的願景。德國境內核電廠預計關閉之時程如圖二所示。



圖二：德國境內核電廠位置與預計關閉之時程[2]

德國廢除核電並不意味著將進口他國生產的核電，而是著重於重新調整本國能源供應結構。在未來德國原核電廠之電網聯結將持續保存並在核電廠原址新建再生能源、高效率天然氣火力發電與先進的燃煤發電廠來逐漸取代舊有的核電廠。目前德國已開始著手興建相關新電廠，以確保在核能停役後，不致有電力缺口出現的狀況。

3. 再生能源發展現況

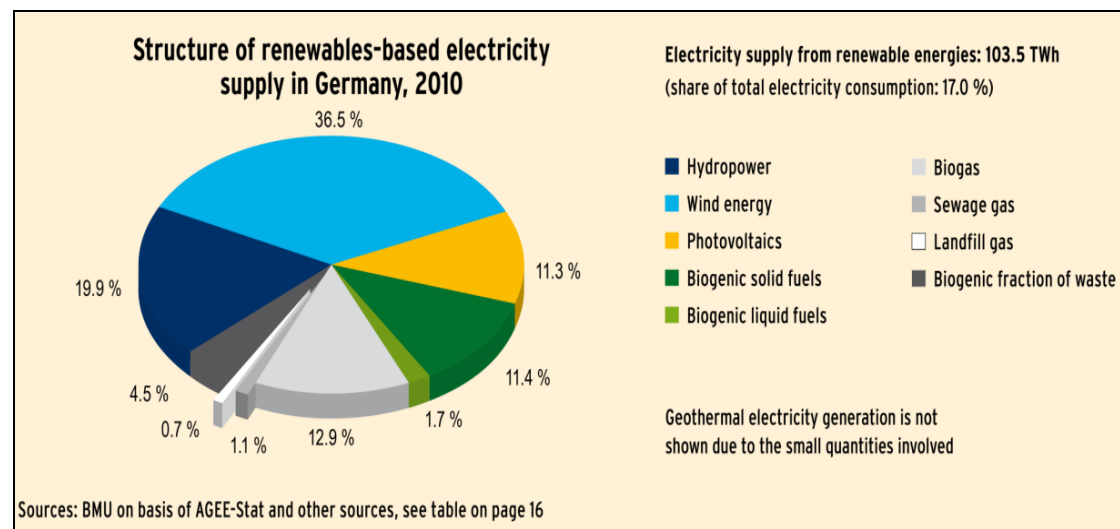
近年來德國再生能源裝置容量已快速成長，2010 年再生能源總裝置容量為 55.9GW，其中以風力發電裝置容量最高，累積達 27.2GW，其次為太陽光電，裝置容量為 17.3GW。相較於 1990 年德國再生能源總裝置容量之 5GW，已成長了將近 11 倍，詳如表一所示。

表一：德國 1990 年至 2010 年再生能源發電之裝置容量[4]

	水力 發電	風力 發電	生質能	廢棄物 燃燒	太陽 光電	地熱能	總裝置 容量
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
1990	4,403	55	85	499	1	0	5,043
1991	4,446	106	96	499	2	0	5,149
1992	4,489	174	105	499	3	0	5,270
1993	4,509	326	144	499	5	0	5,483
1994	4,529	618	178	499	6	0	5,830
1995	4,546	1,121	215	525	8	0	6,415
1996	4,563	1,549	253	551	11	0	6,927
1997	4,578	2,080	318	527	18	0	7,521
1998	4,600	2,877	432	540	23	0	8,472
1999	4,547	4,439	467	555	32	0	10,040
2000	4,600	6,097	579	585	76	0	11,937
2001	4,600	8,750	696	585	186	0	14,817
2002	4,620	11,989	843	585	296	0	18,333
2003	4,640	14,604	1,091	847	435	0	21,617
2004	4,660	16,623	1,444	1,016	1,105	0.2	24,848
2005	4,680	18,390	1,964	1,210	2,056	0.2	28,300
2006	4,700	20,579	2,620	1,250	2,899	0.2	32,048
2007	4,720	22,194	3,434	1,330	4,170	3.2	35,851
2008	4,740	23,836	3,969	1,440	6,120	3.2	40,108
2009	4,760	25,716	4,519	1,550	9,914	7.5	46,467
2010	4,780	27,204	4,960	1,650	17,320	7.5	55,922

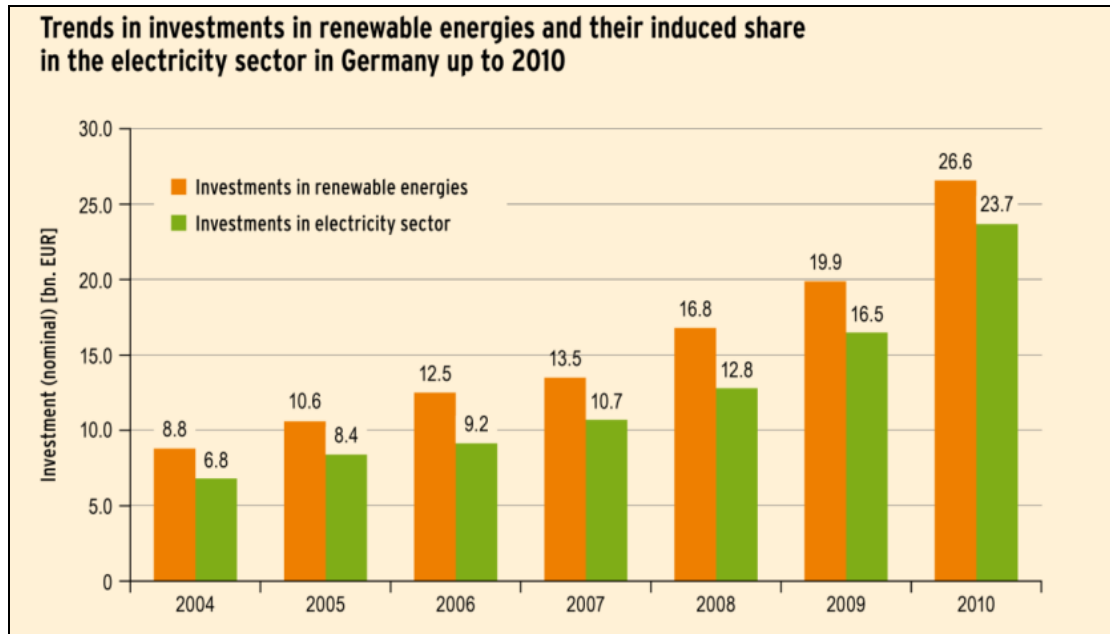
資料來源：Renewable Energy Sources in Figures, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011.

近年來德國再生能源發電量亦快速成長，在 2010 年最終電力消費中，再生能源發電量達 1,028.5 億度電，占總發電量之 17%，相較於 1990 年，再生能源發電占比僅為 3.1%，可知德國在發展再生能源方面是相當積極的。2010 年德國再生能源發電結構中，以風力發電占比最高，占整體再生能源發電量之 36.5%，其次為水力發電，占比為 19.9%，而太陽光電在德國政府積極推動下亦快速的成長，占再生能源總發電量之 11.3%。圖三為 2010 年德國再生能源之發電結構。



圖三：2010 年德國再生能源發電之結構[4]

為使再生能源得以快速發展，德國相當積極投資再生能源，根據德國聯邦環境保護暨核能安全部(Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)資料顯示，德國在 2004-2010 年，再生能源總投資金額即高達 1,087 億歐元，其中電力部門之投資金額為 881 億歐元，詳如圖四所示。而德國的再生能源法(Renewable Energy Sources Act; EEG)亦為德國再生能源發電提供了穩定的收購電價。2010 年德國收購再生能源電價上支出已高達 127 億歐元。



資料來源：Renewable Energy Sources in Figures, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011.

圖四：德國歷年再生能源之投資金額[4]

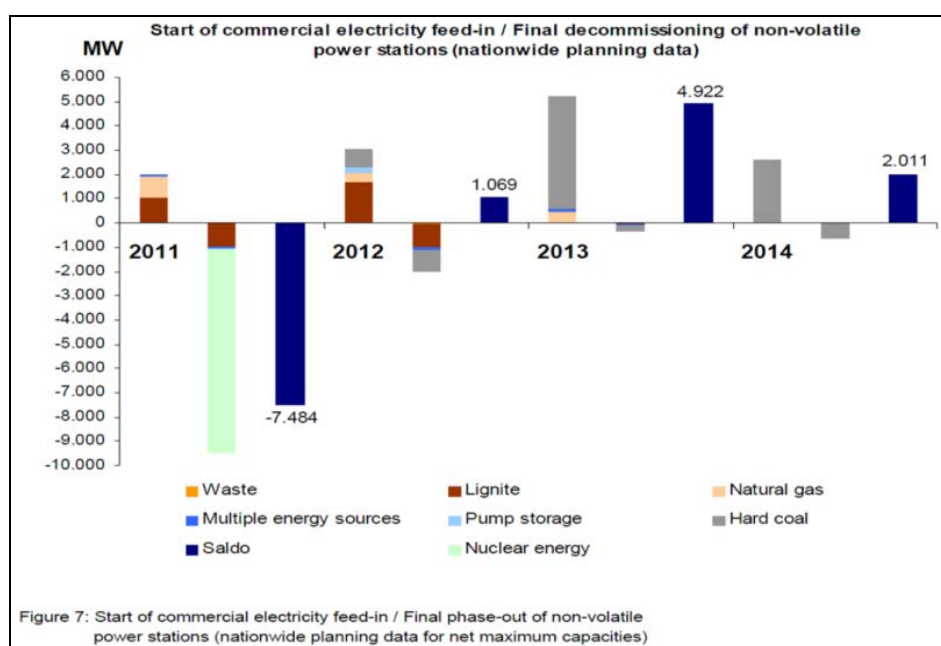
三、德國核能停役後之影響及措施

依據德國聯邦網絡管理局(Federal Network Agency) 2011 年底公布德國電廠的數據資料顯示，目前德國共有 676 座電廠，裝置容量總計 112GW。而德國境內已停役的 8 座核電廠合計約為 8GW，除此之外，德國境內合計 4GW 裝置容量的老舊燃煤發電廠亦將在 2014 年前逐步退役。為彌補相關電力缺口，德國採取了下列措施。

1. 新增傳統化石能源發電

為了彌補核能停役所造成的能源缺口，德國必須提高傳統化石能源的發電比例，所以增加傳統化石能源的支出是在所難免的。德國將增加化石能源原料進口量，例如從南非、澳洲、俄羅斯、烏克蘭進口無煙煤以及從俄羅斯與挪威進口天然氣等。目前德國共有 25 座，合計裝置容量 12GW 的新電廠正在興建中。在這些新建電廠中，超過九成是以傳統化石能源發電，其中，有 67%是以無煙煤(hard coal)為原料，17%以褐煤(brown coal)為原料，9%為小型天然氣發電廠，德國

2011-2014 年停役及新增電廠之裝置容量如圖五所示。



資料來源：Monitoring Benchmark Report 2011, Federal Network Agency, 2011.

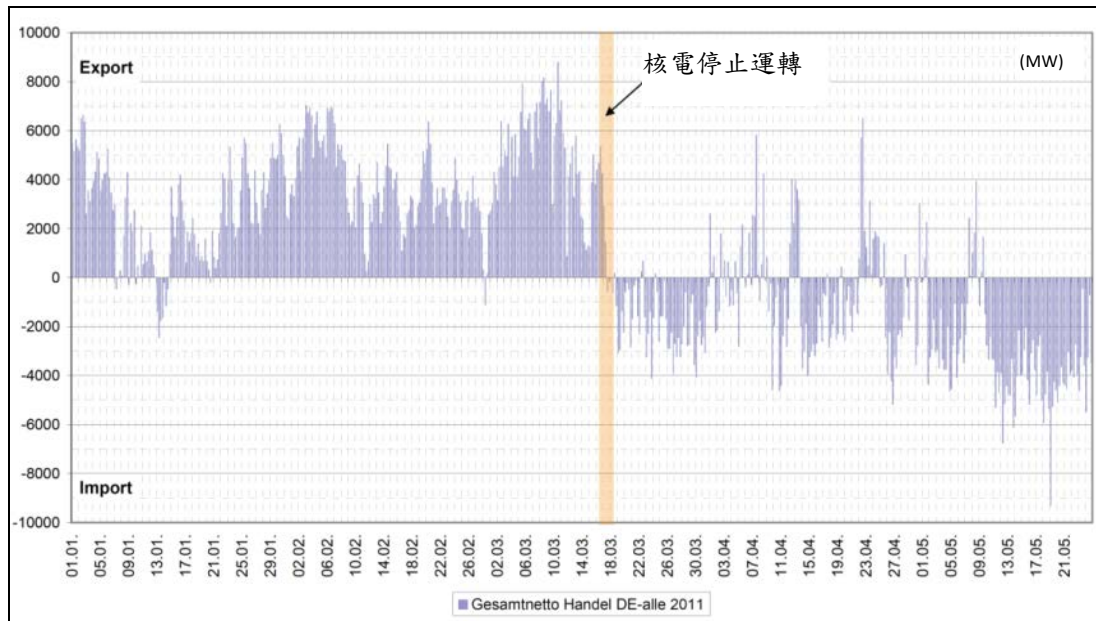
圖五：德國 2011-2014 年停役與新增電廠之裝置容量[5]

在上述資料中，並未計算 2011 年 6 月至 9 月間新增的 2GW 天然氣發電廠，以及再生能源裝置容量小於 5MW 的發電裝置。目前德國境內已停役的核電廠合計約為 8GW，因此，在 2014 年後因大部份核能停役所短缺的電力將可由傳統化石能源如燃煤與燃氣發電取代。而這些新建電廠多數興建在受核能停役影響而造成電力短缺之地區，如 Hesse 與 Schleswig-Holstein 等，以方便彌補核能停役缺口[6]。

2. 仰賴電力進口

儘管如此，德國在去年夏季廢除 8 座核電廠後，已造成電力無法自給自足，所幸德國位處歐洲中部，藉由完整的電網與臨近國家充足的電力，可作為其備用電力的堅強後盾，從德國電力進出口的圖表(如圖六)可以發現，在德國停止 8 座核電廠運轉後，所進口之電力已明顯提高，透過電力進口可適時減緩德國缺電壓力。依據法國 SIA 顧問公司研究報告顯示，德國關閉境內 8 個核子反應爐的決定，讓法國電力出口獲益匪淺。在 2011 年 3 月至 12 月期間，法國透過加大對德國

的電力輸出共進帳約 3.6 億歐元。據法國與鄰國的電力交易資料顯示，法國目前已成為對德國電力輸出的淨出口國。

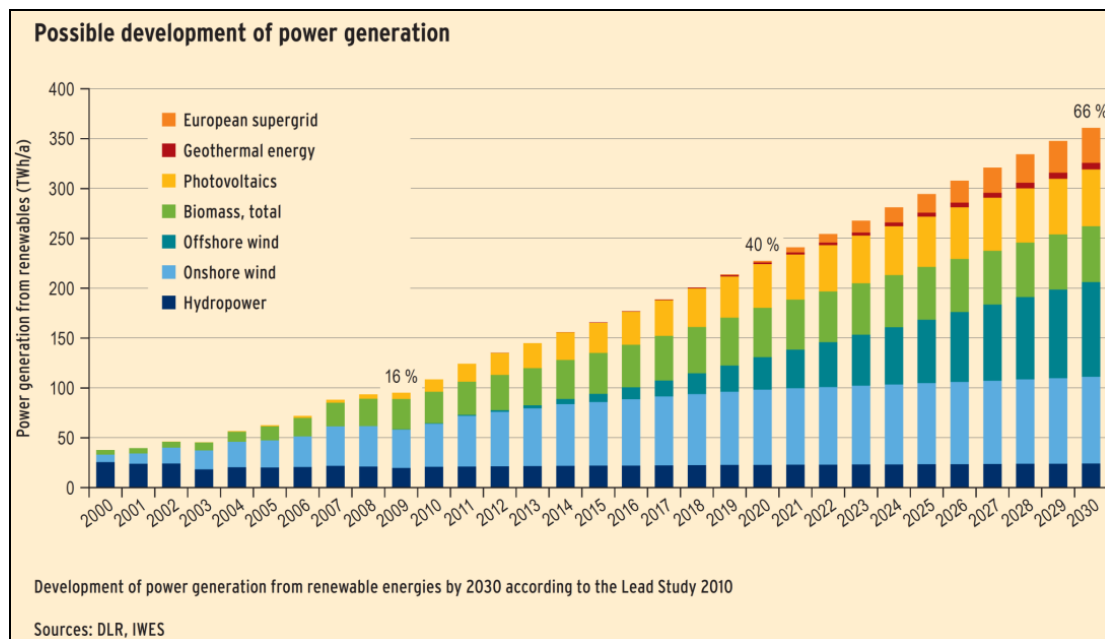


資料來源：Update of Bundesnetzagentur report on the impact of nuclear power moratorium on the transmission networks and security of supply, Federal Network Agency, 2011.

圖六：德國核能停役前後電力進出口量[7]

3. 再生能源之願景

德國政府希望未來再生能源可以成為其電力的主要供給來源，因此德國對於再生能源發展已有明確的目標：預計在 2020 年提高再生能源發電比重至少 35%，2030 年提高再生能源發電比重至少達 50%，並在 2050 年達到再生能源發電比重至少達 80% 的願景。上述具體目標將有助降低德國溫室氣體排放量，與 1990 年相比，預計在 2020 年減少 40% 的溫室氣體排放，並在 2050 年減少 80% 至 95% 的溫室氣體排放。德國至 2030 年各種再生能源技術發電的推估量如圖七所示。



圖七：德國 2000 年至 2030 年各種再生能源技術的發電量推估[8]

為了達成上述目標，德國總理梅克爾(Angela Merkel)已於 2012 年 3 月底宣布，將投入 2,000 億歐元(2,630 億美元)資金來發展能源計畫，預計將在離岸建置風場，其面積約為紐約市的六倍大。該計畫亦將重建德國的電網，新設電網總長度為英國倫敦至伊拉克巴格達的距離。德國近年來已積極發展太陽能發電與陸上風力發電等，但目前德國的離岸風力發電仍未有效開發，相較於目前德國陸上風機裝置容量 27GW，德國離岸風機目前裝置容量只有 48MW，德國政府目標為 2020 年離岸風機裝置容量將達到 25GW。

由於再生能源在確保電源穩定供應上仍未臻成熟，加上缺乏完善的電力傳輸網絡，因此目前再生能源仍然無法完全替代核能發電。為此，德國目前亦積極發展氫能儲存，依據德國西門子公司推估，若德國 85%的電力來自於再生能源，則德國必須擁有 300 億度電的儲能裝置[9]，儘管目前儲能仍受限於成本因素無法大量使用，然而，德國政府仍希望在未來新技術發展(如儲能技術)成熟後，再生能源可以提供穩定的能源供應，逐步取代傳統化石能源。

四、德國能源政策之挑戰

儘管德國早已擬定時程並具體規劃未來將以再生能源為能源供應的重心，但此看似理想的能源政策仍遭致許多挑戰。首先，在短期內為彌補核能缺口，德國勢必得增加傳統化石能源的發電占比，此將導致其於 2020 年較 1990 年減排 40% 的目標變的更加難以實現。除此之外，德國以太陽光電與風力發電為主力的再生能源皆為間歇性的供電系統，在缺乏大型儲能設備支持下，如以再生能源作為國家主要能源供應來源，要維持整體供電系統的穩定是相當困難的。最後，德國為確保再生能源所產生的電力可以傳送到需求端，必須擴大電網的基礎建設，將再次造成發電成本上漲，進而引起境內工業的反彈甚至是產業外移，而民眾能否持續支持電價的不斷上漲，也是備受考驗的。

五、結語

相較於德國，我國政府已於 2011 年 11 月 3 日宣布新能源政策，提出「確保核安、穩健減核、打造綠能低碳家園、逐步邁向非核家園」之能源發展願景，宣示既有核能電廠，核一、核二、核三皆會如期除役，核四必須確保安全才進行商轉，在達成非核家園的目標上，德國相較於我國具有下列優勢：

- 德國可向鄰國購電—德國位處於歐洲中部，鄰近國家包含法國、荷蘭等能源大國，同時歐洲已具有相當完整的電網配置，因此電力的進口可提供德國備用電力強而有力的後盾。相較之下，台灣地處四面環海的海島，並無法向他國直接購買電力，在確保穩定供電的前提下，勢必得維持一定的電力備載容量，因此在尚未規劃興建新的電廠來彌補核電缺口前，台灣並沒有具備可讓核能發電廠提前除役之條件。
- 德國人口密集度較低—德國人口數約為台灣之 3.5 倍，而國土面積卻高達台灣 10 倍之多，且多數面積皆為平原地形。而台灣將

近 2/3 為山地、丘陵地形，適合興建新電廠之面積相當有限，加上近年來台灣民眾環保及鄰避意識強烈，社會運動盛行，未來不論是在燃煤或燃氣的電廠興建上，皆不易找到合適的地點來擴建新的電廠。

- 德國再生能源發展較快速－德國於 2000 年制定再生能源法 (Renewable energy sources Act; EEG)，法律保證再生能源所產生的每度電力都可獲得收購，同時明訂再生能源發展之成本可直接附加於電費中並轉嫁給消費者，2010 年，德國一般家用電費的結構中，平均每度電有 0.0205 歐元是用來支付 EEG 推動之計畫，占其電費之 8.8%。2011 年，每度電因 EEG 相關計畫支出更上漲至 0.0353 歐元，占其電費之 14%[10]。在德國政府大力推廣與 EEG 轉嫁至電費所收取費用的財務政策支持下，德國在 2020 年前再生能源發電量將可超過德國於 2010 年之核能發電量 1,400 億度電。相較之下，我國電價長期偏低，雖近日即將微幅調整電價，但對再生能源投資的誘因仍屬有限。此外，現階段倘欲以發展再生能源取代核能，將造成電網的不穩定性，因太陽光電與風力發電供應常受氣候影響而波動無常，而台灣目前可用於電力儲存之方式僅為裝置容量約 2.6GW 的抽蓄水力發電廠，因此在其他儲能技術(如氫能儲存)尚未成熟前，實難以再生能源完全取代可作為基載的核能發電。

台灣環境與地理位置雖不具備德國的優勢來推動廢核政策，政府更需周延規劃務實穩健作法，以創造達成非核家園之有利條件，透過穩健減核的作法，逐步減少對核能的依賴，以在適當的時機帶領國家邁向非核家園之願景。

參考文獻

- [1] Power shortages in Germany, the early start the reserve power plant in December, <http://www.f-paper.com/?i1122687-Power-shortages-in-Germany-the-early-start-the-reserve-power-plant-in-December>.
- [2] Climate Protection and Growth, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011.
- [3] Nuclear in Germany, World Nuclear Association, 2012 February.
- [4] Renewable Energy Sources in Figures, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011.
- [5] Monitoring Benchmark Report 2011, Federal Network Agency, 2011.
- [6] Coal and gas power plants to replace part of nuclear power plants in Germany by 2014, <http://www.osw.waw.pl/en/publikacje/ceweekly/2011-10-05/coal-and-gas-power-plants-to-replace-part-nuclear-power-plants-german>.
- [7] Update of Bundesnetzagentur report on the impact of nuclear power moratorium on the transmission networks and security of supply, Federal Network Agency, 2011.
- [8] Renewable Energies: Perspectives for a sustainable energy future, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2011.
- [9] Hydrogen storage could be key to Germany's energy plants, <http://www.technologyreview.com/energy/40001/?nlid-nlenrg@nld=2012-04-02>.
- [10] German electricity prices: only modest increase due to renewable energy expected, German Institute for Economic Research, 2011 March.
- [11] Germany's unlikely champion of a radical green energy path, http://e360.yale.edu/feature/germanys_unlikely_champion_of_a_radical_green_energy_path/2401/