

英國近期核電發展與未來展望

—英國核電政策發展、產業推動及核電除役與核廢料處置規劃之探討

朱証達

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

英國是目前少數將減碳目標立法的國家之一。在面臨未來十年有大量電廠除役之際，核電已被英國政府視為電力部門重要的減碳與穩定電力供應選項，因此近年來有許多政策措施在於刺激對國內核電興建的投資。在 2013 年底英國政府宣布 Hinkley Point C 核電廠開發案已通過，此案有機會成為英國近 20 年來第一件核電廠開發案，開啟新一波的核電復興，目標希望在 2030 年以前完成 16GW 的新核電廠興建。本文將就近期英國核電發展、未來規劃、政策發展、產業推動及核電除役與核廢料處置等面向討論，以研析英國持續推動核能的背景與實際作為。

一、英國電力發展背景與近期核電發展

英國過去全國電力供應於 2005 年達到高峰，約 3 千 8 百億度，隨後因為電力價格翻漲¹以及大力推行節電措施²使得用電量逐年緩慢下降，如圖一所示[1]。1990 年以後因為北海天然氣開採量增加，燃氣發電量大幅提升。2008 年以後，隨著北海天然氣開採減少，並且開始進口成本較高之液化天然氣，使得天然氣發電量開始降低，取而代之的是較便宜的燃煤發電。

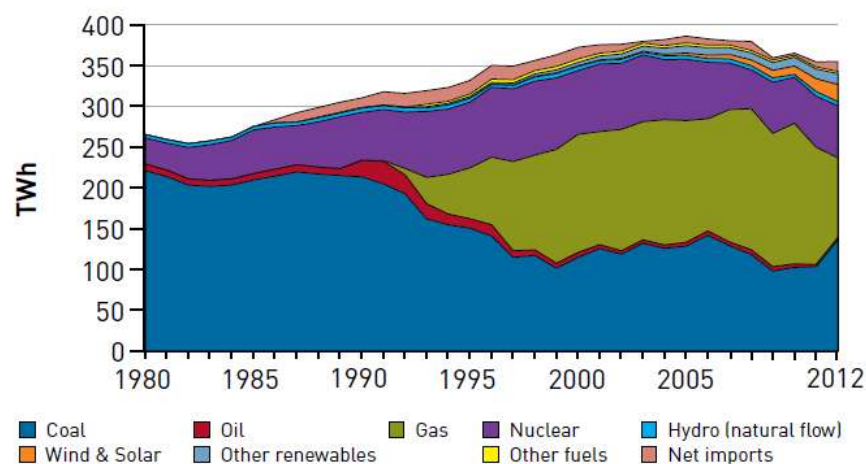
英國於 2008 年頒布了氣候變遷法案(Climate Change Act of 2008)³，制定了全世界首個具約束力之法定國家減量目標，目標於

¹ 由 2000 年至 2012 年家庭電力價格成長 58%

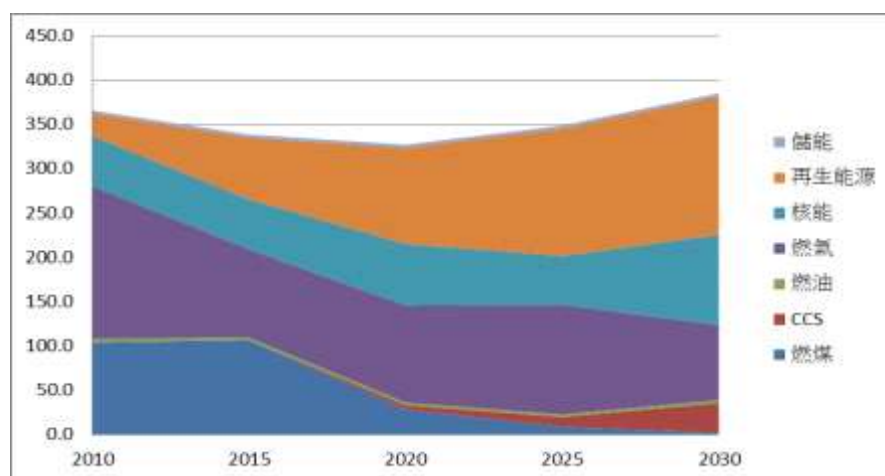
² 如能源供應商碳排放減量目標(Carbon Emission Reduction Target)與事業減量承諾(Carbon Reduction Commitment Energy Efficiency Scheme)

³ 英國 2008 年氣候變遷法案可參考 <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>

2050 年前溫室氣體減量到 1990 年排放量的 20%(155 百萬噸二氧化碳)。而英國政府近期在對外的評估報告都指出，邁向未來低碳發展中，再生能源、核能及 CCS 是未來電力供應的三項主軸，應多元平衡發展以求能源穩定安全並增進人民福祉[2]。並且在 2013 年底通過之新能源法案中[3]，藉由電力市場改革大力推動各項措施降低再生能源、核能及 CCS 三項低碳能源的市場風險，以刺激投資。根據英國能源與氣候變遷部推估，未來電力供應將自 2010 年的 366TWh 下降到 2020 年的 327TWh，隨後便開始回升到 2030 年的 385TWh，如圖二所示。至 2030 年時，再生能源發電量占總電力供應占比將達 40.6%，核電達 26.4%。而傳統燃煤電廠將近全數除役，並由 CCS 燃煤取而代之[4]。



圖一、英國 1980-2012 年電力供應結構[1]



圖二、英國至 2030 年電力供應結構預測(TWh)[4]

英國自 1995 年 Sizewell 核電廠商轉後，已近 20 年無新增新核電廠。1990 年代核能發電約提供全英國 25% 電力，核電發電量 1998 年達到高峰，隨後開始有老舊核電廠關閉，核能發電量占比逐漸下滑至 2012 年的 18%[1]。英國目前共有 16 座反應爐運轉中，但大部分電廠都將於 2024 年以前陸續退役，因此在近 10 年內必須要新建穩定的基載電力機組以填補供應缺口[5]。

事實上英國政府於 2003 年公布的能源政策白皮書裡，立場仍不支持新建核電廠，但政府仍承諾會進行新建核電廠之公開諮詢。2006 年英國政府公布的 Energy Review 報告中，政府立場開始轉向支持新建核電廠，主要理由為發展核電所帶來的經濟效益。於 2007 年進行新建核電廠之公開諮詢。在此次公開諮詢後，各界就興建核能電廠逐步取得共識，並於 2008 年 1 月公佈「2008 年核能白皮書」，為目前英國持續發展核電之政策主要依據⁴。同年即有數間公司組成聯盟宣布投入核電新建計畫。同時為了延續先前電力市場自由化的腳步，EDF 公司於 2009 年自公營的 British Energy 公司買下大部分核電廠的股權，成為目前英國核電廠主要經營者。2010 年英國政府也宣布，政府未來將不介入或投資任何核電廠，完全由市場主導。

雖然在 311 福島核災後英國民眾對核電開發支持度略有下滑，但隨後又反彈偏向支持。根據國際市調機構 YouGov 於 2012 年 7 月做的民調，有 63% 的英國人支持使用核電，僅有 22% 反對。另一項於 2012 年 10 月的民調顯示，有 40% 的英國人贊成持續加蓋核電廠，21% 贊成維持目前核電廠數量，僅有 20% 認為需要減少核電廠數量[5]。而英國能源研究中心(UKERC)於 2013 年 10 月作的民調也顯示有 32% 支持使用核電，29% 民眾反對，支持開發核電的民眾仍是占大多數[5]。

2013 年是英國近期在核能發展上重要的里程碑，由 EDF 公司主導於 Hinkley Point C 核電興建計畫終於與英國政府達成協議。但歐盟

⁴ 可參考 www.gov.uk/government/publications/meeting-the-energy-challenge-a-white-paper-on-nuclear-power

針對政府補貼訂有國家補助相關規範，規範中限定電廠興建計畫唯有符合「協助達成減量目標」、「增加歐盟能源安全」以及「若未有補貼則無法興建」等三個條件時，政府方可提供補貼。因此英國政府於簽約後，既將此案提送至歐盟執委會，要求將此案視為可補貼之計畫。因此 EDF 公司仍在等待歐洲議會對英國補助核電開發的核准，若順利進入開發程序，預計將可於 2023 年商轉。這將是近 20 年以來英國第一個新建的核電廠，也是歐洲近年來第一個核電廠興建案[7]。同時英國政府也開始進行 Wylfa 地區核電廠新建案之初期審查，開啟英國核能復興的時代[5]。

二、英國核電開發現況與未來展望

過去英國已經有 25 座第一代 Magnox 反應爐陸續除役，僅存一座在 Wylfa 地區第一代 Magnox 反應爐也將於 2014 年 10 月除役。目前運轉中的核電廠分布在 8 個場址，共計 16 座反應爐，總裝置容量為 10GW，如表二所示[5]，其中多數為 1980 年代設置的第二代先進氣冷型反應爐(AGR)。最新建置的為 1995 年在 Sizewell 設置的壓水式反應爐(PWR)，至今已近 20 年無新增新核電廠。目前運轉中的 16 座核電反應爐將有 15 座將在 2024 年以前除役(其中在 Hinkley 及 Hanterton 核電廠 4 座反應爐已延役 7 年至 2023 年)，並且同時需要淘汰許多老舊火力電廠，預計 2017 年以後開始出現嚴重電力供應缺口[6]。

英國政府在 2006 年公布 Energy Review 報告後，開始積極規劃新建核電廠。同年建構了核電評估機制(Generic Design Assessment process, GDA)由核能管制中心(Office for Nuclear Regulation, ONR)⁵審查未來新建核電廠之反應爐設計，至目前已有 EPR 及 AP1000 兩款反應爐通過。在經過公開的潛在廠址諮詢後，考量國家級地方層級的各種議題，如地質、環境永續性、人力、地方發展策略等，2009 年英

⁵ 可參考 <http://www.hse.gov.uk/nuclear/about.htm>

國政府提出 11 個可行的新電廠場址，其中大多數是在現有核電廠周邊，但隨後在 2010 年刪除其中 3 個場址[8]。

表二、英國目前運轉中核電廠相關資訊[5]

Plant	Type	Present capacity (MWe net)	First power	Expected shutdown
Wylfa 1	Magnox	490	1971	Dec 2015
Dungeness B 1&2	AGR	2 x 545	1983 & 1985	2018 or 2028
Hartlepool 1&2	AGR	2 x 595	1983 & 1984	2024
Heysham I-1 & I-2	AGR	2 x 580	1983 & 1984	2019
Heysham II-1 & II-2	AGR	2 x 615	1988	2023
Hinkley Point B 1&2	AGR	2 x 610, but operating at 70% (430 MWe)	1976	2023
Hunterston B 1&2	AGR	2 x 610, but operating at 70% (420 MWe)	1976 & 1977	2023
Torness 1&2	AGR	2 x 625	1988 & 1989	2023
Sizewell B	PWR	1188	1995	2035
Total: 16 units		10,038 MWe		

在日本福島核災後，蘇格蘭政府明確表達未來將不考慮在蘇格蘭地區興建新核電廠。原本計畫將參與新建核電廠的兩大電力公司 RWE Power 與 E.ON 也宣布未來將不參與核電興建相關投資[5]。

然而 2011 年 10 月 NNB Generation(EDF 公司持股 80%)向核能管制中心遞交在 Hinkley Point C 新建兩座 Areva EPR 反應爐。核能管制中心在 2012 年 12 月審查完成核准興建。於 2013 年 10 月 EDF 公司和英國政府在供電合約上達成共識，未來政府將保證以每度約新台幣 4.6 元(0.0925 英鎊)⁶價格收購 35 年[5]。此電廠可望成為英國近期興建的首座核電廠，若順利進入開發程序，預計將於 2023 年商轉，可提供全英國 7%的電力。政府也預估此計畫需投入金額高達約 8000 億新台幣。

另一方面，Horizon 公司在 Wylfa 的核電廠投資案於 2012 年送交審查，但由於 RWE Power 與 E.ON 兩大電力公司於同年撤資後，計畫一度受挫。最後由 Hitachi 公司買下 Horizon 公司，持續推動此案。Hitachi 計畫將採用 GE 生產之先進沸水式反應爐(ABWR)，也在 2014 年 1 月初步經核能管制中心審核通過。英國財政部隨後也簽署了一項合作協議，與 Hitachi 及 Horizon 公司合作解決於 Wylfa 地區核電廠新

⁶ 以 1 英鎊兌 50 元新台幣計算

建案的財務支援。若此案推動順利，此核電廠將於 2020-2025 年間商轉。

除了上述兩項計畫外，EDF 與 Horizon 也正積極評估在其他廠址的興建計畫。總計目前計畫中的核電廠有 11 座反應爐，裝置容量達 15.6GW，如表三所示[5]。雖然英國目前沒有訂定核電開發目標，政府先前不斷對外說明希望在 2025 年以前在 5 個場址完成 16GW 新建核電裝置量，然以目前發展此目標可能需要延到 2030 年才能達成。

表三、英國目前規劃與興建中的核電廠[5]

Proponent	Site	Locality	Type	Capacity (MWe gross)	Construction start	Start-up
EDF Energy ⁿ	Hinkley Point C-1	Somerset	EPR	1670		2023
	Hinkley Point C-2		EPR	1670		2024
EDF Energy ⁿ	Sizewell C-1	Suffolk	EPR	1670		?
	Sizewell C-2		EPR	1670		?
Horizon	Wylfa Newydd 1	Wales	ABWR	1380		2025
Horizon	Wylfa Newydd 2	Wales	ABWR	1380		2025
Horizon	Oldbury B-1	Gloucestershire	ABWR	1380		late 2020s
Horizon	Oldbury B-2	Gloucestershire	ABWR	1380		late 2020s
NuGeneration (Toshiba + GDF Suez)	Moorside	Cumbria	AP1000 x3	3400		2024 on
Total planned & proposed		11 units		15,600 MWe		

三、2013 新能源法案對核電發展之影響

2012 年 5 月 22 日英國能源與氣候變化部(DECC)公布了醞釀已久的能源改革草案，此法案被喻為英國自電力市場自由化後 20 年來最大規模的能源改革，內容包含電力收購差價合約制度(Contracts for Difference)、備用容量市場(Capacity Market)、新電廠碳排放標準(Emission Performance Standard)及碳交易價格下限(Carbon Price Floor)等措施，讓低碳電力成為英國未來的能源供應主軸。這項草案於 2012 年底送進國會，2013 年 12 月立法通過正式生效[3]。

新能源法案對核電開發有顯著的支援。在此能源法案提出前，英國政府已宣布從 2013 年導入碳交易價格下限機制。針對化石燃料的發電業者，此最低下限價格預計將高於 ETS 的交易價格。2013 年訂為每噸二氧化碳約新台幣 800 元，並逐年提升到 2030 年每噸約新台幣 3500 元。另一方面，新電廠碳排放標準將標準訂在每度電 450 克

二氧化碳以下，迫使未來將無法興建未整合碳捕捉與封存之傳統燃煤電廠。這兩項政策都對確保能穩定供應電力的核能於能源系統中的角色，取代傳統化石燃料發電。

而新的電力收購差價合約制度也將核電納入。在價格多變的電力市場中，若電力生產商售電價格低於目標價格(Strike Price)，政府將提供資金給生產商補足到目標價格，而當生產商所賣的電價高於目標價格時，高於目標價格的收入便要繳回給政府。EDF 公司和英國政府在 Hinkley Point C 於供電合約上達成的協議即是在此架構下，未來政府將保證以一定價格收購 35 年。這種長期合約便可提供核電一個穩定並可預期的投資環境，售電價格不會隨著市場供需變動，有利於刺激核電的投資。然而歐洲議會先前只允許國家政府對再生能源及新能源技術的補貼，此案仍需送交歐洲議會審查核准。

為了強化核電相關申設與管理，英國政府於 2011 年成立核能管制中心(Office for Nuclear Regulation, ONR)，其權責包含了核電廠申設審核、核電廠除役、核能安全、核廢料運送、核廢料管理與處置及核電廠環安等。在 311 福島核災後，在政府體制外的獨立核能管制單位更顯得重要。所以在 2013 年能源法案中建立了法源，讓核能管制中心的運作更具正當性。能源法案中描述了其設立的目的與功能，並在 2014 年 4 月開始法人化，此後將可藉由核能管制中心整合、監督並管理未來核能的發展，也讓核能的管理運作更公開、更迅速並更具彈性。

四、英國核廢料管理與處置

如同其他已長期使用核電之國家，核廢料處理已成為英國政府急需解決的問題。雖然核原料仰賴進口，英國是少數有辦法完成核燃料轉換、濃縮、燃料棒製作及核廢料重新處理的國家。目前英國各地核電廠產生的高階核廢料⁷會先在原址冷卻池存放，接著原址乾式儲存

⁷根據輻射量與廢熱的大小，核廢料一般分為高階核廢料 (High level waste, HLW)，中階核廢料 (Medium level waste, MLW) 與低階核廢料 (Low level waste, LLW)

或送往 Sellafield 核廢料處理廠做重新處理。重新製作之核燃料則用於 Sizewell B 核電廠發電使用。最終的高階核廢料自 2015 年起將以乾式儲存方式放置於 Sizewell B 核電附近，必須存放 50 年讓核廢料冷卻。中階核廢料則是送往 Sellafield 附近數個場址以鋼桶封裝存放，而低階的核廢料也是送往 Sellafield 附近的 Drigg 封存[9]。

英國在 2008 年的能源法案中附註，未來申請新建核電廠時，開發商必須提供完整的除役計畫報告(Funded decommission program)，必須涵蓋核電廠除役規劃、核廢料管理處置以及預算。電廠營運商必須每年提撥固定金額以作為後續核廢料處理基金。核電廠營運商必須對後續核廢料處理負責，並提供財務上支援。但事實上先前國營核電廠營運商 British Energy 自 1996 年起，已經每年提撥固定金額於基金裡，至 2010 年基金規模已達約新台幣 4200 億元[5]。

對於高階與中階核廢料地質封存，英國於 2008 年提出核廢料管理與安全白皮書(Managing Radioactive Waste Safely)，規劃地質封存執行架構並進行公開諮詢。核能設施除役局(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)⁸也在 2010 年開始提出地質封存預算，並進行公開諮詢。這個地質封存設施將可存放新舊核電廠所產生之中高階核廢料，以及其他核能研究與軍事設施所產生之放射線物質。2013 年進行選址方式的公開諮詢。NDA 預估此永久地質封存設施造價約為新台幣 6000 億元，計畫在 2025 年開始進行選址，自 2040 年開始使用[9]。NDA 也規劃提出社區自願參與的構想，邀請對於處置場設址有興趣的社區表示意見，藉由居民的主動參與遴選核廢料永久處置場地點。在初步補助配套構想之下，目前已經有在 Cumbria 郡裡三個地方政府曾表達意願。但是在 2013 年其中一地方議會表決後，決定不接受此計畫。

政府也依地質封存諮詢結果提出一個封存設施使用價格上限規畫，對於未來單一 1350MW 的核電廠就可能要花費高達約新台幣 550

⁸ 可參考 <http://www.nda.gov.uk/>

億元於地質封存上，但實際的金額會在新核電廠營運 30 年後制定。在那之前電廠也必須每年提撥合理金額於此項目上[5]。

五、英國核電產業發展策略

近期不管是英國本土或全球都有興建核電廠需求，以目前各國對核電發展的規劃，預計未來全球將有約新台幣 46.5 兆元投資於核電廠興建，約新台幣 12.5 兆元投資於核電廠除役[10]。預計在 2030 年前英國本土興建的 16GW 核電廠約可在整個本土供應鏈提供 4 萬名就業機會。根據 EDF 公司推估，在 Hinkley Point C 核電廠的興建上最多可供 5600 個就業機會，在後續運轉上也將提供 900 個就業機會。同樣 Horizon 公司在 Wylfa 核電廠計畫上也有相近的就業預估數字[11]。因此英國政府於 2008 年即成立核能開發中心(Office for Nuclear Development, OND)以健全本土核電產業鏈並協助拓展全球商機。於 2010 年成立了先進核能製造研究中心(Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre, NAMRC)，投入約台幣 12.5 億元以產學合作的方式研究本土核能供應鏈的市場與機會，於 2012 年投入約新台幣 18.5 億元持續研究本土核電產業的發展與布局策略[11]。

英國政府更於 2012 年底公布核電供應鏈行動計畫報告(National Supply Chain Action Plan)⁹，此計畫目的在於研析英國政府與本國核電產業長期合作策略與作為，以提供長期就業與經濟成長動能。例如為了達到 2030 年的開發量，短期國內必須對核電產業有大量的投資，因此政府的行動計畫在於創造穩定投資市場、提供充足資訊交流平台、協助培養專業人力等等面向。

在國際合作上，英國也和積極發展核電國家建立夥伴關係。英國和南韓於 2013 年 6 月分別簽訂核電廠合作與先進核電廠除役技術開發兩項合作備忘錄，未來兩國將針對此兩項議題作長期合作交流。於 2013 年 10 月與中國簽署合作備忘錄，就未來兩國境內的核電計畫於

⁹ 可參考 <http://www.decc.gov.uk/assets/decc/11/meeting-energy-demand/nuclear/7176-nuclear-supply-chain-action-plan.pdf>

投資、專業技術、開發、及企業合作等方面建立策略性的合作架構。事實上 Hinkley Point C 核電廠開發案中，中國國營企業已和 EDF 公司達成協議，將投入約 30% 資金共同開發[5]。另外英國也和俄羅斯簽訂合作備忘錄，共同推動兩國核電廠開發上合作。

六、結論與我國可借鏡之處

自 2008 年氣候變遷法案通過後，減碳已成為目前英國推動能源相關政策措施的第一目標。同時在面臨未來 10 年有大量電廠除役之際，核電已被英國政府視為電力部門重要的減碳與穩定電力供應選項。同時也自 2008 年起，英國政府提出了核電發展白皮書，揭櫫新一波核電復興的序幕。即便在 2011 年發生福島核災，英國民意仍偏向支持持續興建核電廠。和我國能源政策最大不同在於，我國目前無法定減量目標，但在規劃未來能源配比時需要同時考量能源安全、社會經濟及環境衝擊等面向。核電雖然是能兼顧三者的電力供應選項，但在我國卻面臨著主流反對新核電廠運轉的民意。英國與我國在發展核電上的目的有所不同，面臨的挑戰也不同。

2013 年底通過的新能源法案對未來核電開發有諸多的支援，包含電力收購差價合約制度、新電廠碳排放標準、制定碳交易價格下限及將核能管制中心法人化等措施，創造穩定的低碳電力投資市場，確保市場對核電開發能在短期內挹注大量資金。而穩健減核已經是我國政策目標，未來應將不推動新核電廠興建。然英國對於創造低碳電力投資環境的政策措施仍值得我國參考借鏡。

2013 年底英國政府與 EDF 公司達成在 Hinkley Point C 核電廠開發案之協議，此案有機會成為英國近 20 年來第一件核電廠開發案，同時 Horizon 公司於 Wylfa 地區核電廠興建安也開始逐步有進展。然而要達到政府目標於 2030 年前興建 16GW 新核電廠仍有諸多挑戰。雖然目前 EDF 公司與英國政府達成售電合約上的協議，但 EDF 公司仍在等待歐洲議會對英國補助核電開發的核准，若歐洲議會否決 EDF

公司與英國政府的售電合約，EDF 公司仍是有可能撤資。因此未來英國核電開發仍待長期觀察。

核廢料處理已成為英國政府急需解決的問題，然而已經非常有計畫的將核廢料集中於固定廠址處理。同時英國已經有先進的技術進行再處理，減少須處理的高階核廢料。此外英國已經積極地開始推動核廢料地質封存，目前正展開選址方式的公開諮詢，目標在 2040 年能完成地質封存場址。我國目前在高階核廢料處理上仍停留在濕式儲存，仍有待地方政府同意移轉成乾式儲存。所面臨最大的挑戰在於民眾安全上的疑慮，因此英國於核廢料處理的公眾溝通過程與諮詢程序更是值得我國借鏡參考。

英國政府了解到未來本地與全球有龐大的核電商機，並帶來大量就業機會。例如 Hinkley Point C 計畫將需挹注約新台幣 8000 億元投資，大部分資金將流向英國本土廠商，可刺激本國經濟並協助建立本土核能產業供應鏈，並帶來將近 6000 個工作機會。因此英國政府透過產業策略推動、產學合作及國際合作等方式，協助國內核電相關廠商打入海外市場，其涵蓋電廠興建、維護、除役、核廢料管理及安全維護等產業。與我國最大不同之處在於我國無相關電產業，興建核電所帶來的經濟與提升就業效益恐有限。

參考文獻

- [1] DECC, 2013. *UK Energy in Brief 2013*.
- [2] DECC, 2011. *The Carbon Plan: Delivering our low carbon future*.
- [3] DECC, 2013. *The Energy Act received Royal Assent on 18 December 2013*. <https://www.gov.uk/government/collections/energy-act>
- [4] DECC, 2013. *Updated energy and emissions projections: 2013*.
<https://www.gov.uk/government/publications/updated-energy-and-emissions-projections-2013>
- [5] WNA, 2014. *Nuclear Power in the United Kingdom*.
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/United-Kingdom/>
- [6] DECC, 2011. *Planning our electric future: a White Paper for secure, affordable and low -carbon electricity*.
- [7] DECC, 2013. *Initial agreement reached on new nuclear power station at Hinkley*. <https://www.gov.uk/government/news/initial-agreement-reached-on-new-nuclear-power-station-at-hinkley>
- [8] ONR, 2014. *Delicensing of nuclear sites*.
<http://www.hse.gov.uk/nuclear/delicensing.htm>
- [9] NDA, 2014. *Sellafield (including Calder Hall and Windscale)*.
<http://www.nda.gov.uk/sites/sellafield/index.cfm>
- [10] NIA, 2013. *World class, competitive industry of highly skilled professionals*. <http://www.niauk.org/facts-and-information-for-nuclear-energy#skilled>
- [11] DECC, 2013. *New nuclear power: support for industry development*.
<https://www.gov.uk/guidance-for-operators-of-new-nuclear-power-stations>