

國際能源署勾勒 21 世紀核能發展藍圖

2015 年 2 月 6 日

根據世界核能新聞之報導¹，國際能源署(International Energy Agency, IEA)與世界經濟暨開發組織之核能署(The Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)於 2015 年初發表了一份核能發展藍圖報告²，其分析結果顯示為了控制本世紀內全球氣溫上升不超過攝氏 2 度，從現在開始到 2050 年前，全球核能發電機組容量應從 396 GW 增加至 930 GW，如此可以減少二氧化碳排放量達 13%，才能限制地球溫室效應之增長。國際能源署(IEA)主席 Maria van der Hoeven 表示，這份報告的主要結論及建議事項，可以做為各國制定能源政策及工業發展(減少排碳)的目標，唯目前現況和理想目標仍有一段相當的距離，而且尚未步向正軌，還有很大的努力空間。以下摘要整理 IEA 報告之主要結論及建議，以及重點說明全球主要核能發展國家之規劃藍圖。

背景說明

因應 1973-1974 年石油危機發生後所成立的國際能源署(IEA)，從原先協調各國石油存量及支應各會員國可能的短缺之任務之外，近年來也致力於收集全球能源發展策略、製作統計全球能源供需數據、發展替代能源及增加能源使用效率、促進能源科技之國際合作、協助能源與環境政策之連結等，而其主要工作的四個面向分別為：能源安全、經濟發展、環境意識、及全球連結。IEA 與 OECD/NEA 於 2010 年曾發表核能科技發展藍圖，然而過去數年間陸續發生了幾項影響全球的事件，包括：2011 年 3 月份日本福島核子事故造成大眾對於核能安全的疑慮、金融海嘯風暴後續影響新建電廠之重大投資案件、頁岩天然氣之大量開採及便宜價格衝擊核能市場等，使得核能前途似不看好，然而從達成限制本世紀內全球溫升在攝氏 2 度之內的目標而言，提供基載且低碳排放的核能發電，仍是許多國家能源策略的重要選項。因此 IEA 發行 2015 版核能發展藍圖之主要目的如下：

- 揭示核能科技發展現況及指出研發需求，以增進核能安全並使其更為經濟
- 進一步強調核能在所有低碳能能源中之角色，尤其是考量各個國家之核能政策之變化及其他型式低碳電力技術間之競爭
- 加速核能發展所面臨的障礙及應採取之行動，以達成藍圖所設立的目標
- 促進分享核能發電各階段的經驗及良好範例，包括核能安全及法規、燃料循環、建廠經驗、除役經驗、財務規劃、能力訓練、及公眾溝通等。

報告重點發現

國際能源署(IEA)對於核能發展藍圖報告共有 8 項關鍵的發現，條列如下：

1. 全世界現有 439 部運轉中及 69 部建造中之核能機組，發電量佔全球之 11%，為第二大的發電能源，若單以世界經濟暨開發組織(OECD)會員國來計算，其比例更提高到 18%而成為最大宗之低碳電力。故 IEA 推論對於降低溫室氣體之排放、增進能源來源安全性、支持燃料多樣性、並在可預期之生產成本下而提供大規模電力等方面，核能在未來仍將扮演著關鍵的角色。圖 1 是 2012 年及 2050 發電燃料型式之使用比較圖，若各國毫無改進，仍沿用現有的方式使用大量的煤和天然氣等化石燃料(fossil fuel)，其結果將造成本世紀結束前地球溫升達到攝氏 6 度之嚴重後果。然而若縮小化石燃料的使用量到現有的一半，逐步排除煤炭及石油之發電，而大量增加低碳能源(包括：核能、水力、風能、太陽能及其他再生能源)之比例到 7 成以上，才能有效抑制地球的溫升在攝氏 2 度以內。

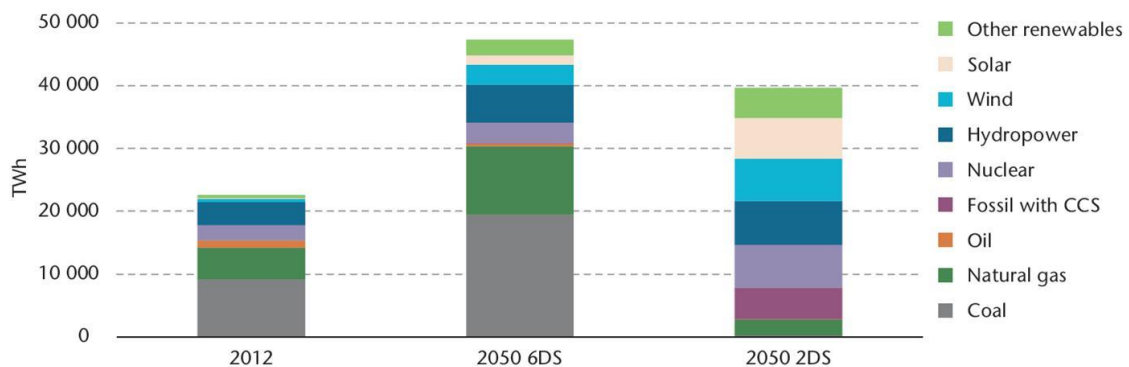


圖 1：本世紀全球溫升攝氏 2 度及攝氏 6 度之能源使用比較圖（資料來源：國際能源署²⁾）

2. 在全球溫升低於攝氏 2 度的分析情境中，從現開始到 2050 年前，全球核能發電機組容量應從 396 GW 增加至 930 GW，約佔所有發電型式之 17%，這已經比 2010 年所預測核能到了 2050 年應佔 25%比例為低，對於各國而言，這仍是一個非常具有挑戰性的目標。圖 2 即是此種分析情境的預測變化圖。

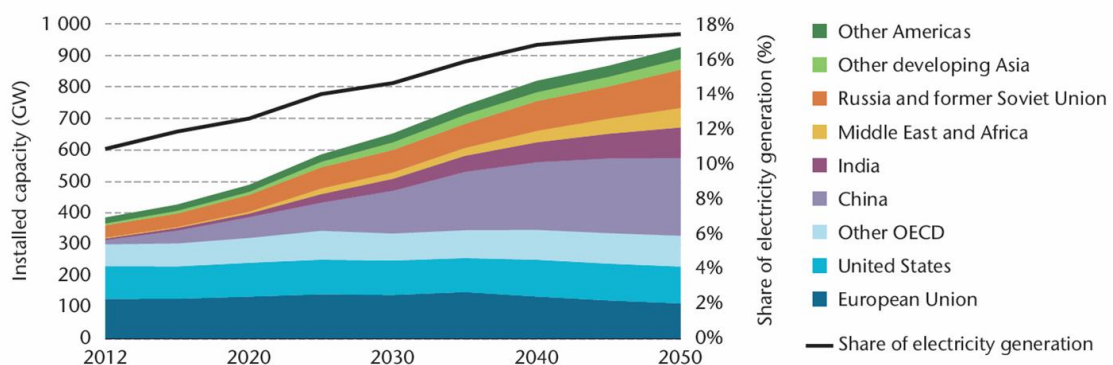


圖 2：本世紀全球溫升攝氏 2 度之能源使用變化圖（資料來源：國際能源署²⁾）

3. 2011 年 3 月所發生之日本福島核子事故，在短期內確實對於不少國家造成了衝擊，雖然並沒有因為事故所帶來的輻射傷害而造成人員死亡的案例，但仍然加深人們對核能安全的顧慮、降低大眾對核能接受度、也直接打擊部分國家的能源政策，再加上過去幾年金融危機、經濟發展遲緩、電力需求降低而使得開始建設核能電廠並加入電網營運的機組數量下降。從圖 3 有關建造核能機組的歷史來看，1980 年代之前的蓬勃發展，因為 1979 年的美國三哩島事故而降低了建造的動能，及至 1986 年前蘇聯車諾比爾事故發生後，核能建廠數量變得更為零星。到 21 世紀後，由於中國大陸核能發電工業的崛起，俄羅斯、法國、韓國等國積極輸出核能，使得建設數量開始大幅提升，福島事故發生後，因為天然災害對核能安全之潛在威脅，各國對於核能安全的要求更為嚴格，例如中國大陸就曾宣佈暫時審查新增加的核能機組，直到這兩年才又恢復審查作業，而也就造成了新建核能廠數量之短暫降低，唯預期未來建廠數量將再度回升。

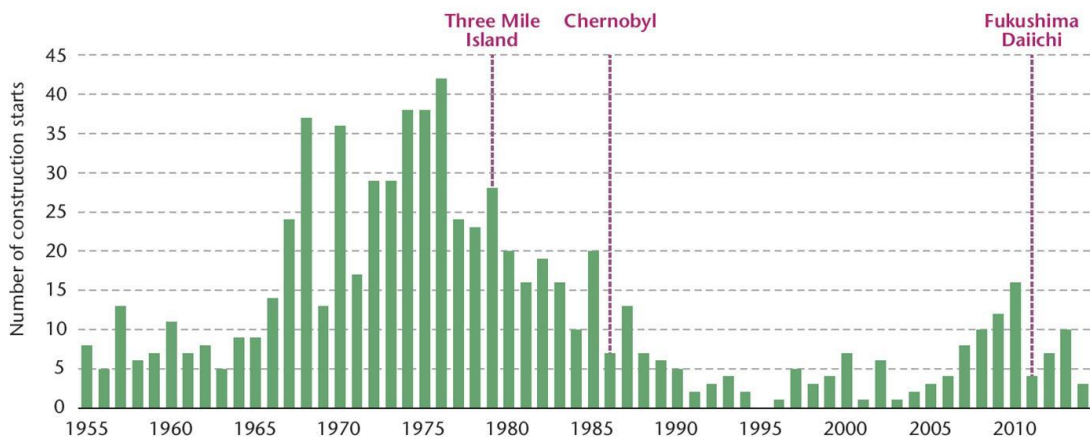


圖 3：全球核能機組建造數量變化圖（資料來源：國際能源署²）

4. 從中長期在全球各個國家或地區之核能發展趨勢來看，對核能仍是有利的環境，2014 年開始之際，全世界共有 72 個建設中的核能機組，這是 25 年來的最高紀錄。根據前述攝氏 2 度之分析情境，中國大陸將從現今 17GW 裝機容量，提升到 2050 年之 250GW，且無論裝機容量及發電量都將佔有全球核能之 27%，躍居全球龍頭的地位。其他也極力提高核能比例的國家或地區則包括俄羅斯、印度、及中東地區，此外韓國、波蘭、土耳其、英國也有小幅成長。傳統核能重要國家，包含美國、歐盟各國、及其他 OECD 國家，其核能政策採取穩健而相對保守的做法，故以維持一定核能發比例的方式來推動能源使用。另從圖 2 可觀察出金磚四國中之印度、俄羅斯、及中國大陸等三國之核能計畫，從現有佔全球之 3%，大幅成長 3 倍到 9%，向來以石油生產為主力的中東地區，也雄心勃勃地呈現倍數的成長。本文後面將再個別探討各國或地區的核能發展規劃。

5. 核能安全是最高的優先，雖然其責任主要是落在營運者身上，但是管制者需在確保營運者依最高的安全要求方面，扮演重要的角色。日本福島第一發電廠事故的教訓已強調管制者應強有力且具獨立性，而安全文化則必須落實推行到核能界的各個層面，這包括：營運者、工業界、設備供應鏈、及管制者，對於新開發核能的國家更是從起步時，就能建立並推動核安文化。
6. 各國政府在實施能源政策的角色方面，應提供穩定而長期的投資架構，而得以開發這些需要大量資金的能源計畫，同時也能夠為所有低碳能源技術提供長期性合理的電力價格。政府單位應持續支持核能之研發工作，特別是在核能安全、進步型核燃料循環、廢料處理及創新設計等領域。
7. 核能是一項成熟的低碳排放科技，且經過多年的演變已朝向更為安全及具經濟規模的電力輸出。相對於以往型式的核能電廠，IEA 報告預測第三代核子反應器之興建經費有逐漸上升的趨勢，但這應朝向標準化的設計著手，使得後續同型機組之興建更有效率及更為經濟。
8. 在那些較為小型的電網或封閉的市場中，通常大型核能電廠並不適合興建，但小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)卻可以扮演提供核能電力的角色，這模組化的設計對於降低投資上的門檻亦具有利的因素。

未來 10 年關鍵作為

為了能夠達到前述藍圖所設立的目標，亦即本世紀末溫度升高不超過攝氏 2 度，國際能源署(IEA)認為核能機組裝機容量的年增率，應從 2014 年之 5GW 提升到每年 20 GW，則未來 10 年各國必須採行下列各項作為以達成這種增長速度(圖 4 是各國或地區對核能投資金額之推測)：

1. 核能提供基載電力、輔助電網之穩定、並有利於確保能源安全，因此各國應肯定核能的貢獻，且須檢視各個電力市場之管理，確保提供新建核能電廠與其他低碳能源一致性的投資條件，同時也能讓核能電廠有效的運轉，而不受市場因素的干擾。

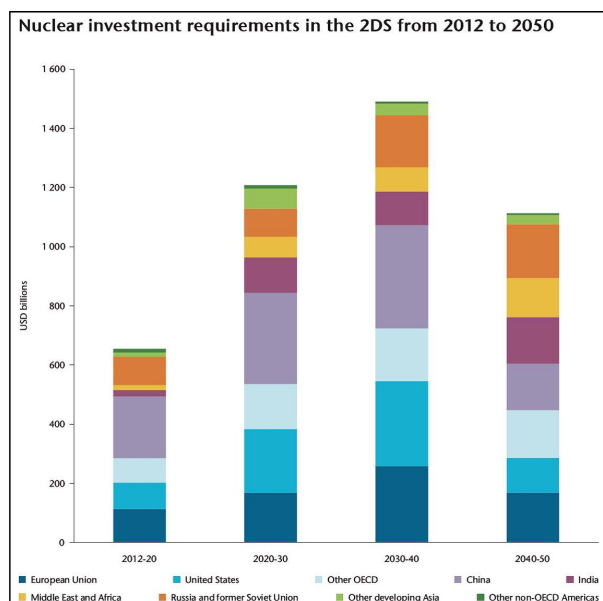


圖 4：全球核能投資(2012-2050)展望（資料來源：國際能源署²⁾）

2. 供應商應展示其可以在預算下如期完成興建的能力，並能夠降低新型反應器的成本。另外如何整合最近新建電廠之創新工程經驗，並能夠溶入計畫管理、人力資源運用、建置供應鏈、品質管制、反應器設計、建造技術簡易化及最佳化等，將是成功的關鍵。
3. 如何去加強設計標準化、法規一致性、管制要求標準、順暢之審照流程為降低成本與改進新建計畫及績效要素，工業界亦當持續改善核能結構、系統、及組件之品質保證作業，而安全文化則必須落實推行到營運者、工業界、設備供應鏈、及管制單位等核能界的各個層面。
4. 各國管制單位之間以及核能電廠營運者之間應加強資訊交流，以增進整體安全及運轉績效。
5. 對於有意新加入核能發電行列的國家，必須在推出核能計畫之前，先建立必要之基礎設施，在管制監督與電廠操作方面之人員訓練、教育、能力建立等方面，是絕對有必要且為長期性的規劃。
6. 各國應加強增進公眾信心的措施，這包含了現有核能機組實施後福島事件之安全升級(如圖 5)，以及管制單位應強有力且具獨立性。在提供公眾資訊方面，能夠以透明且為事實為基礎來呈現核能之風險及利害，並說明核能在能源安全、可負擔性、緩和溫室效應及空氣品質所做出的貢獻。

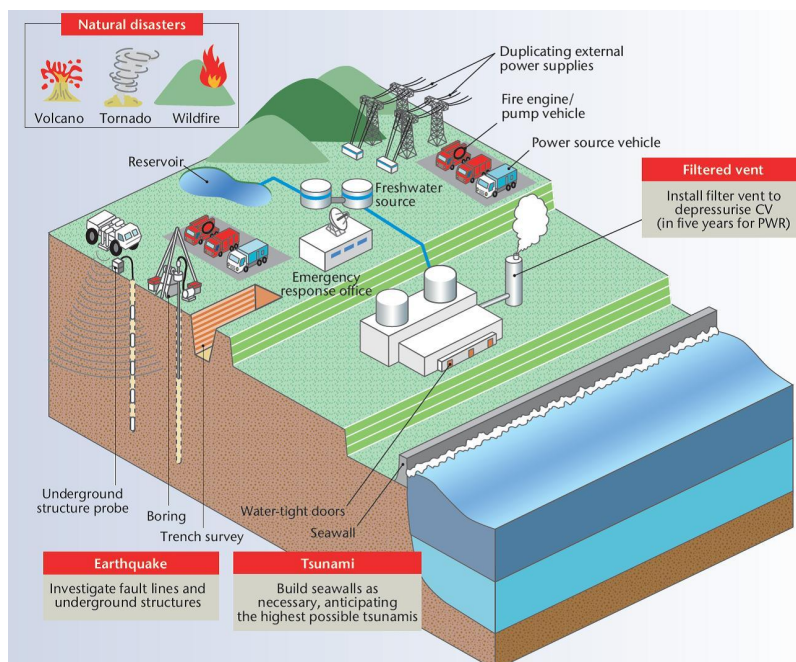


圖 5：後福島安全升級示意圖（資料來源：國際能源署²）

7. 各國之廢料處置策略若尚未定案，應該早做決定而不延遲，IEA 建議可採用深層地底處置(Deep Geological Disposal, DGD)做為高階核廢料的解決方案。如果各國境內可以處理且有經濟合理性，則應在本國之內處理。不然應尋求區域性的合作，例如使用他國已計畫好或運轉的 DGD 設施。長期來看，各國政府政治承諾及與地方民眾間之密切互動則是上述策略成功與否的核心。

區域性核能發展個案說明

國際能源署(IEA)除了預測全球核能發展的趨勢外，也整理分析各個區域及個別國家的能源規劃，圖 6 是全球統計以及幾個為活躍並預期可以提升全球核能展的國家或地區之核能發電量及比率預測圖，其中預期 2050 年全球核能發電量應達現有水準 3 倍，而比率則上升到 17% 左右，以下將再摘要說明各國家或區域的展望。

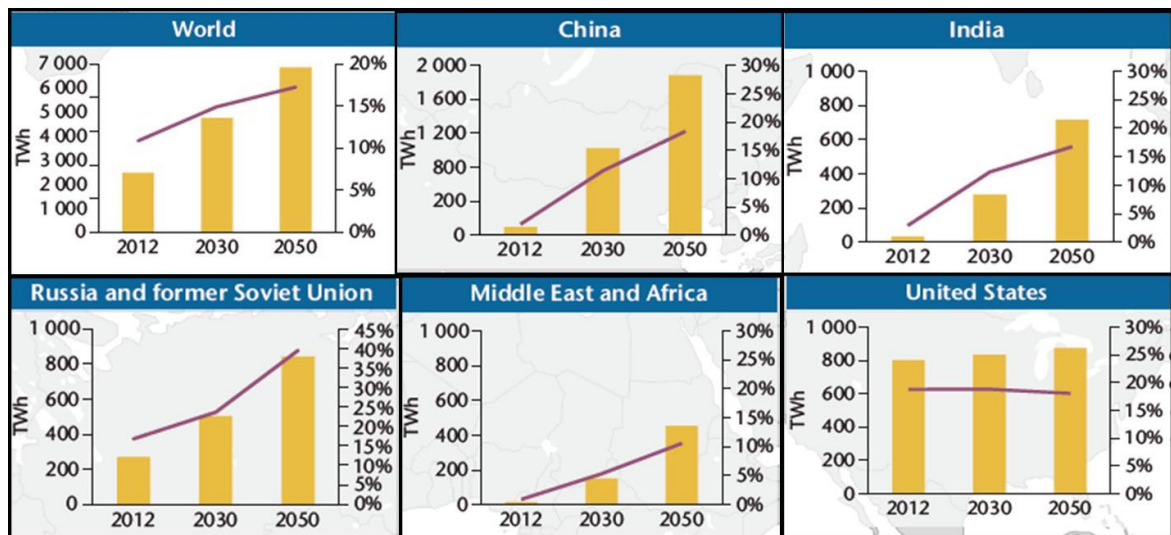


圖 6：全球及個別國家或區域核能發電成長預測圖（資料來源：國際能源署²）

俄羅斯

在日本核能機組全部停機的現況下，俄羅斯是僅次於法國及美國的第 3 大核電國，現擁有 33 部運轉中的機組，裝機容量達到 25GW，俄製反應器主要的供應商為 Rosatom，目前也積極開拓包括土耳其及越南等新興核能國家的市場。與其他國家類似，俄羅斯的反應器也進行延役，目前已有 19 部機得到 15 至 20 年不等之延長運轉許可。俄式 VVER 壓水式反應器也都進行功率提升，總計可多發出 7-10% 的電力。驅動俄羅斯核能發展的動力主要來自於取代老舊而將除役的核能電廠，以及從現有 17% 發電比率提升到 2030 年之 25-30%。該國目前有 9 部機興建中的機組(容量共約為 9GW)，且 2030 年前計畫興建 24 部機共 29GW，這些機組包括第三代之 VVER 型反應器以及鈉冷卻快滋生反應器。俄羅斯也大量投資於核能發電，並在快滋生反應器及小型浮動式反應器方具有全球領先的地位。其有有兩部浮動式 SMR KLT-40S 機組正在 Lomonosov 拖船上施作中，預計 2016 年完成並於 2017 年起用以供應較為偏僻地區的電力。

印度

印度自 1950 年代起即開始發展核能，並於 1969 年開始運轉第一座核能電廠，由於印度並非「反核武擴散公約」之締約國，該國向來從事本土化之研發，並利用蘊藏量豐富的鈾礦來應用於從事核燃料循環，印度目前也從事鈉冷卻快滋生反應器之開發工作。該國其目前訂立 2020 年前將核能裝機容量達到 20GW 的目標，並將在 2020 年之後繼續增加核能發電的比率，以此速度延續下去，預估到 2040 年印度將成為世界第 3 大核能國家。除了本土發展之外，主要因為人口快速增加、都市化愈加明顯、空氣污染、及電力需求日增等，這些是驅動核能發展的因素，唯民眾對核能的接受度以財務投資的挑戰是現今所面對的考驗。另外一個影響因素是印度核子損害賠償的法律，在發生核子事故之時，要求營運者要全部理賠，與世界通行的原則不相符，也阻斷了許多想打入印度核能市場的廠家意願。不過華盛頓郵報的報導指出³，在美國歐巴馬總統於 2015 年 1 月份訪問印度，與印度總理莫地簽署之協議中，對於核子事故理賠的部分，印度承諾將要成立一個保險的大共同基金，可以負擔營者達 2 億 5 千萬美金，同時也將考慮加入國際原子能總署(IAEA)之核子賠償公約，這使得外國對印度核能市場之投資出現了契機。



圖 7：歐巴馬總統與莫地總理會晤
(資料來源：華盛頓郵報³)

中東地區

位於伊朗的 Bushehr 核能電廠，已於 2013 年 9 月達到商業運轉，這是中東地區核能發電的首例，而本地區最積極發展的國家當屬阿拉伯聯合大公國(UAE)，目前已有 3 座韓國製的 APR-1400 型壓水式反應器在施作中，後續亦有 1 部等待施工。1 號機預計於 2017 年起開始運轉，後 3 部則分別在 2020 年前陸續完成，共計可提供 5.6GW 電力。由於預計在 2020 年時，UAE 全國電力需求成長到 40GW，該國已確認核能將成為未來電力供應的重要選項。在目前完全由天然氣供電的 UAE，已將成熟、有競爭力、低碳排放的核能視為提供基載電力的重要來源。至於鄰近產油甚為豐盛的沙烏地阿拉伯，則已宣佈將在 2032 年前建造 16 核能機組，裝機容量總計可達到 17GW，而約旦則於 2013 年 10 月與俄羅斯簽約，將替該國建造兩座核能機組。這些產油國相繼迎接核能發電的事實顯示，除了石油及天然氣之外，經由能源多樣化而增進產油國能源來源之安全，另可以出口更多的石油到其他國家。

中國大陸

國際能源署(IEA)預測中國大陸是全球核能發展最快速的地區，根據其 2011-2020 年中長程核電發展計畫，預計在 2020 年時核能裝機容量將達到 58GW，且那時建造中機組仍有 30 GW 的容量。中國大陸自 1980 年代開始發展核能發電，第 1 部機組於 1994 年達到商業運轉，根據國際原子能總署(IAEA)最新統計，至今共有 24 部運轉中機組及 25 部建造中機組，2013 年核能發電量佔全部之 2.11%。中國大陸核能機組除自製之外，亦由美國、法國、韓國、日本、及俄羅斯進口反應器技術。自從日本福島事故發生後，中國大陸加強了安全要求，目前新提出的大型核能計畫必須第三代反應器為基礎，目前最大宗的設計以 CAP-1000 型為代表，而此設計實際上為建構在美國西屋公司 AP-1000 機組的設計基礎上。此外過去 10 年間中國大陸的核能發也從早期之技術進口為主，已轉型到本土設計製造及自製設備供應鏈。以大型的 CAP-1400 核能電廠為例，除已於 2014 年 9 月份通過其核子安全局的審核⁴，預計將在石島灣及其他內省份開始建造外，此新式反應器也打算積極進軍國際市場。

驅動中國大陸核能發電的因素，除因經濟快速發展及工業化和都市化所產生對電力的超量需求外，另一個迫切的因素是日益嚴重的空氣污染問題，近年政府單位已盡力管制燃煤電力製造的污染，仍抵擋不了層出不窮的霾害問題。而核能這項低碳排放電力，預期至少可以減緩問題的惡化。圖 8 是國際能源署(IEA)估計各國依核能發展之藍圖，到 2050 年時各項能源可以貢獻降低排放的配比。因為中國大陸佔有全球相當比例的能源消耗量，故其配比圖中各類能源對於降低排放的貢獻度，幾與全球配比圖相當，其中又以核能均為 13%之貢獻最為巧合。不過 IEA 也指出在快速發展核能的同時，中國大陸將面臨訓練有技術的人員及推行核安文化的挑戰，而內陸省份河川污染可能會影響反應器水品質或降低流量，這些都應事先加以討論防範。

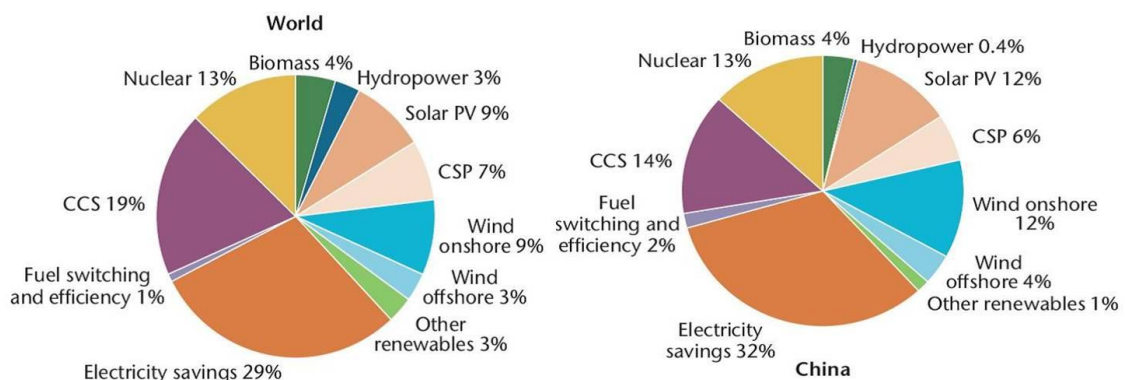


圖 8：2050 年全球各式能源發電對降低碳排放量之貢獻度預測圖（資料來源：國際能源署²）

日本及韓國

日本在過去數十年的核電建廠經驗，往往能夠如期如預算也完成建設並開始運轉，這歸功於持續的建廠工作之經驗累積、模組化的設計、以管理良好的供應鏈。2011 年福島事故之前，計有 48 部運轉及 2 部施工中的機組，唯此事故已造成日本民眾對核能的低接受度，使得未來再增建機組的可能性變得不確定。目前全面停機進行安全補強的機組，部分已獲得日本新成立之原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority)同意再起動，且川內 1 & 2 號機亦得到鹿耳島縣地方政府的許可，預計在 2015 年上半年可以恢復運轉，這將是日本重新恢復核能供電的重要步驟。

韓國與日本在建廠方面的經驗類似，目前已具有 20.7GW 的核能裝機容量，提供約全國電力之 27% 左右，為了降低對進口化石燃料的依賴及增進能源來源的安全，韓國具有長程策略性的核能發展計畫。目前規劃在 2035 年前，將核能發電比例提升到 29%，比福島事故之前所預測之 41% 為低。除了本身核能機組運轉容量因數達 96.5% 的佳績外，近年來韓國也積極擴展國際市場，並於 2009 年取得阿拉伯聯合大公國(UAE)4 部機組的合約，也希望進一步打開中東地區其他國家及非洲的市場。韓國與美國之間正在進行核能和平利用協定之續約談判，韓方努力爭取在該國境內之用過核燃料再處理，以便從已產生的用過核燃料中取得 30% 的能源，並能夠降低放射性廢棄物的數量。

美國

美國現今仍為全世界最大的核能發電國家，目前擁有 99 部運轉中及 5 部建造中的機組。其在新建機組的部分，位於田納西州的 Watts Bar 2 號機自 1980 年代開始興建，但在 1985 年開始進入緩建的狀態，及至 2007 年才又恢復建設，而預計將於 2015 年年底開始起動運轉。另外 4 部由西屋公司設計第三代之 AP-1000 型壓水式反應器則正分別在喬治亞州及南卡羅南納州之 Vogtle & Summer 電廠興建，不過因為近年來天然氣大量開採，造成天然氣價格大幅滑落，使得原本一度有核能復興(nuclear renaissance)景象的後續新建計畫紛紛延後或取消，甚至也衝擊到運轉中的機組，Kewaunee 及 Vermont Yankee 電廠分別於 2013 及 2014 年停止運轉就是其中的例子。國際能源署(IEA)報告指出美國因為部分地區的電力市場之降低法規管制(deregulation)，在天然氣或其他能源過於便宜的時候對核能較為不利，這也是為什麼現在新建中機組係侷限於被管制市場(regulated)的地區，電力公司可以經由調整用戶收費價格來取得部分建廠經費。

美國過去數十年在缺少新建核能機組狀況下，主要靠反應器功率及發電機出力之提升來增加供電，據統計 1977-2012 間已累積 6GW 之增加量，然而預測未來能夠再提升的空間有限。此外，美國也已有 74 部核能機組取得更新的執照，使得其運轉年限得以從 40 年增加到 60 年。依現有執照年限的推算，到了 2040 年時，美國現有核能機組之一半將達到 60 年的運轉時間，若都如期除役，該國恐怕馬上面臨電力短缺及失去能源供應多樣性的危機，因此美國在能源部及所屬國家實驗、電力研究院 (EPRI)、及數所大學已開始研究如何執行核能機組老化管理，也由技術及科學的知識基礎上，探討支持運轉壽命超過 60 年(到 80 年或更久)基準。這些研究目前重點放在電廠進行例行翻修時，可以不必更換長壽命之組件，這包括：圍阻體、反應爐壓力槽、管路及電纜等。

圖 9 是美國能源資訊署(USEIA)於 2014 年 4 月發表之能源展望預測圖，在各式發電能源中，除天然氣仍將繼續成長外，再生能源、核能、及煤將維持平穩的供應量。

Figure ES-5. Electricity generation by fuel in the Reference case, 1990-2040 (trillion kilowatthours)

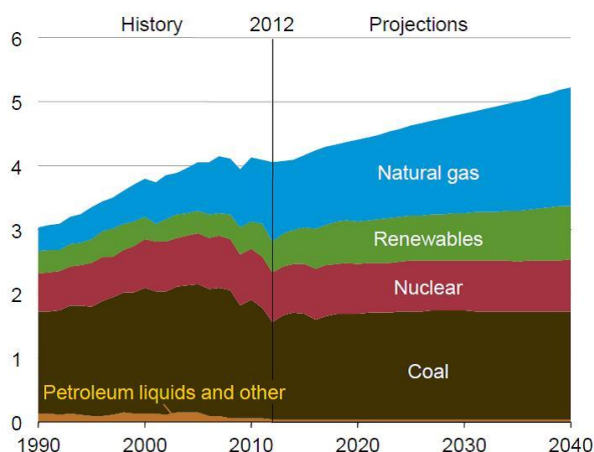


圖 9：美國電力能源分佈預測及 2040 年預測圖
(資料來源：美國國際能源資訊署⁵)

參考資料

1. World Nuclear News, Roadmap to Nuclear Future, January 29, 2015.
2. IEA & NEA, Technology Roadmap- Nuclear Energy 2015 edition, January 2015.
3. Washington Post, Is the India Nuclear Agreement Really the "Breakthrough Obama Promised?", February 4, 2015.
4. World Nuclear News, CAP 1400 Preliminary Safety Review Approved, September 9, 2014.
5. US Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2014 with Projections to 2040, April, 2014.