

# 2015 核能技術路線圖

—在 2DS 情境下，2050 年全球核能發電裝置容量需要增加一倍以上

蕭國鑫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

## 摘要

2015 核能技術路線圖是基於長期的全球溫度上升在 2°C 的情境(2DS)，並突顯核能在低碳未來的潛在貢獻。依據此技術路線圖說明，目前的能源供應和使用趨勢，如果沒有採取果斷的行動，2050 年與能源使用相關的 CO<sub>2</sub> 排放量將增加近一倍，而提高化石能源使用將會增加環境安全的困擾。未來對提高能源效率、發展多類型再生能源，碳捕集與封存(CCS)、核能發電及新運輸技術等低碳能源的技術發展至為重要；而且在 2DS 情況下，2050 年時全球核能發電裝置容量將需要增加一倍以上，即從目前的 396GWe 提升到 930GWe (占全球發電量的 17%)。

核能在電力系統中可以提供穩定的基載電力與低碳的重要關鍵角色，2015 核能技術路線圖的目的之一，是同時協助有意維持或發展核能源技術的國家，藉由此路線圖克服主要的障礙與提出具體建議，並利用此正確的途徑，突顯出未來十年內能夠解決的核能相關問題，例如公眾接受度與可負擔之部署核技術條件的幾個關鍵行動，以確保已擁有核能發電技術及新加入核能營運國家的安全。

**關鍵字：**核能、碳排放、碳捕獲與儲存、再生能源

## 一、前言

日本福島第一核電廠(nuclear power plants, NPPs)發生事故後，社會大眾對於利用核電作為能量來源產生了不良的觀感，從而導致部分國家制定政策逐步淘汰核電；而國際金融危機也使得如新建核電廠之資本密集產業融資更加困難。另外，國際間尋求減少電力使用，以及對再生能源發展強力的政策支持，促使部份 OECD 國家對電力成長需求減緩；另在開放的電力市場中，缺少或無效率的碳定價以及相關的補貼措施，都使得能源業者對投資核電的吸引力下降[1]，除非是該國強而有力的政策支持。加上近年來，北美地區廉價的頁岩氣快速發展並提供發電，除了降低部分地區的

發電成本外，亦顯著地降低電力部門的碳排放量，並促使美國的煤炭價格下降，相對導致煤炭出口增加。而在歐洲地區的德國，因應未來將逐漸廢核，使得部分發電能源亦被煤炭所取代。儘管有這些挑戰，但是核能仍然是有力的低碳排放基載電力，因此，許多國家仍重申核能在能源戰略中的重要性。

2015 年出版的核能技術路線圖[1]為依循 IEA, OECD, NEA (Nuclear Energy Agency)等三個單位合著的 2010 年科技發展路線圖更新版[2]。修正理由為自 2010 年以來，國際間發生一些與核能源相關的重要影響事件，例如福島第一核電廠事故後之提高核能安全，以及隨後的安全審查與新的安全要求規定，以確保現有及未來興建核電廠需具有更高的安全水準(如新建的第三代核反應爐安全要求)與經濟效益等，特別是核能安全與核能監管的做法與經驗、前後端核燃料循環、核能建設與人員培訓、溝通、除役和核廢料處理等。而經濟和金融危機會降低對能源的需求，使得資本密集的行業融資將更具挑戰性，尤其是對於開放的電力市場。在該路線圖的後續行動中，NEA 亦發起一項技術性調查，以確定各國在試圖減少對化石能源的依賴之重要研究和開發工作中，能考慮先進核能技術的需求，以滿足路線圖願景所需的行動與障礙排除，進而符合地球溫度長期控制在上升 2°C 的情境(利用所有能源領域需要的技術，到 2050 年時的 CO<sub>2</sub> 排放量較 2009 年減少一半，以允許長期全球氣溫升高不超過 2°C)。

## 二、近期核能發展與營運安全

### (一) 2014 年底全球核能發電及新建機組數

2015 年初，全球共有 436 座核能機組運行，總裝置容量 377.7GWe (2014 年同期為 435 座機組，總裝置容量 375.3GWe)[3]。2014 年新建核電廠開工數有 3 部機組(2013 年為 10 部機組，如圖 1)；另在 2014 年初，全球興建中的反應爐 72 部(總裝置容量約為 76GWe)；而 2014 年併網連接的核電裝置容量為 4.76GWe (2013 年為 4 GWe)，遠低於 2DS 情境下，規劃這十年期間之每年併網 12GWe 的目標(圖 2)。另外，2013 年全球核能發電下降到約 2,478 TWh (較 2010 年下降 10%)，主要是德國 8 部反應爐永久性停機，以及日本可操作的反應爐在 2013 年仍然閒置中的影響。

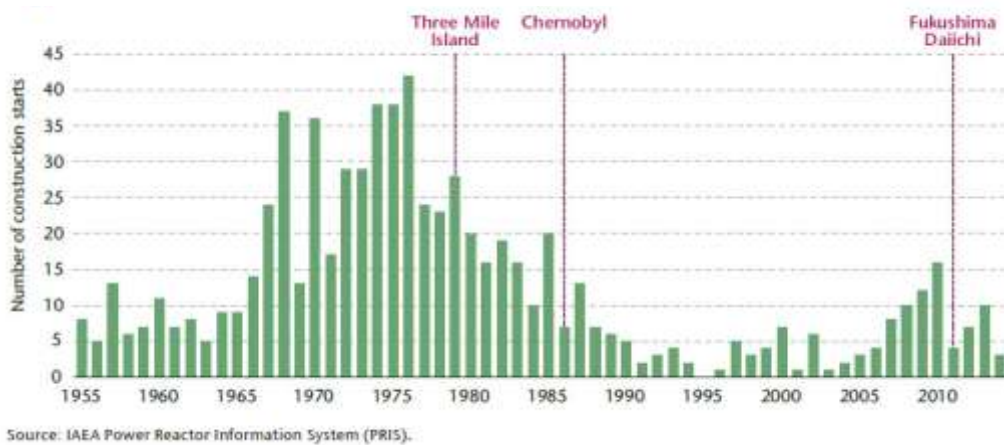


圖 1、1955 年~2014 年國際間各個年份興建核電廠的機組數

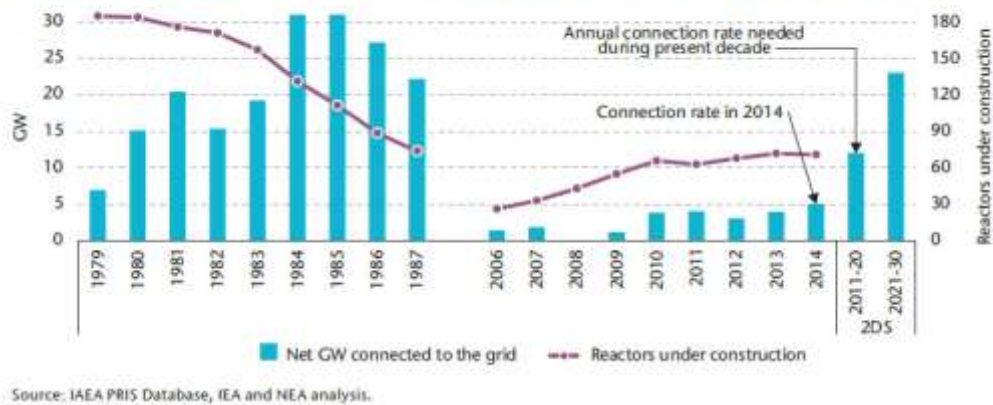


圖 2、2DS 情境下規劃近十年每年併網 12GWe 目標示意圖

## (二) 近期核電發展

核電的發展取決於該國的能源和環境政策、電力需求願景、能源供應、監管環境和電力市場結構等因素(表 1)。對於核能發展成熟的國家，著重在核能的現代化與長期營運；核電新加入國則須有核基礎設施和監管框架，而公眾接受度與熟練操作技巧的發展將是重要挑戰；至於其他國家的核能除役及擴大核能使用將是主要焦點。而未來在電網不發達的國家或地區，小模組化反應爐核電設施(中小型反應爐)將會是一種選項。

表 1、各地區核電發展特點總整理[1]

	電力市場現狀與設計*	未來發展	主要挑戰
OECD 歐洲	● 833TWh 發電量(25%)，132 部反應爐(裝置容量 122Gwe)；4	● 低碳電力 ● 能源安全	● 融資開放市場 ● 低碳投資的技術

	<p>部機組興建中；比利時、德國及瑞士等三個國家將淘汰核能。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●反應爐平均 27 年</li> <li>●2050 年約 130 部反應爐除役。</li> <li>●波蘭與土耳其為新加入國。英國為 OECD 國家最積極發展者</li> <li>●混合開放和規範的電力市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●有競爭力的電力成本</li> </ul>	<p>中立政策</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●市場扭曲(補貼再生能源)，降低電力批發價格及公眾接受。</li> </ul>
美國	<ul style="list-style-type: none"> <li>●822TWh 發電量(19%)，100 部反應爐(裝置容量 105GWe)。</li> <li>●5 部反應爐興建中</li> <li>●成熟核能技術團隊，目前反應爐最多核准營運 60 年。</li> <li>●混合開放和規範的電力市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●低碳電力</li> <li>●有競爭力的電力成本</li> <li>●能源供應安全</li> <li>●重建核能工業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●融資開放市場</li> <li>●長期營運中與頁岩氣相互競爭。</li> </ul>
俄羅斯	<ul style="list-style-type: none"> <li>●172TWh 發電量(17%)，33 部反應爐(裝置容量 25 GWe)。</li> <li>●10 部反應爐興建中</li> <li>●開放電力市場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●核電政策：2030 年核電比重增加到 25-30%</li> <li>●大力支持核能工業，包括出口市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●管理與逐步取代當前 RBMK 反應爐(目前接近電力生產的一半)為第三代反應爐。</li> </ul>
日本、韓國	<ul style="list-style-type: none"> <li>●148TWh 發電量(11%)，77 部反應爐(裝置容量 66 GWe)_日本 48 部反應爐仍處於閒置狀態。</li> <li>●7 部反應爐興建中(日本 2 部，韓國 5 部)</li> <li>●監管的電力市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●能源安全</li> <li>●低碳電力</li> <li>●有競爭力的電力成本</li> <li>●大力支持核能工業，包括出口市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●公眾接受</li> <li>●重新啟動日本核能發電</li> </ul>
中國大陸	<ul style="list-style-type: none"> <li>●117TWh 發電量(2%)，20 部反應爐(裝置容量 17 GWe)。</li> <li>●29 部反應爐興建中</li> <li>●監管的電力市場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●能源安全</li> <li>●電力需求快速增長</li> <li>●未來穩定的電力成本</li> <li>●關注區域性污染</li> <li>●大力支持核工業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●公眾接受</li> <li>●內陸核電站發展</li> <li>●國內供應鏈</li> </ul>
印度	<ul style="list-style-type: none"> <li>●32TWh 發電量(3%)，21 部反應爐(裝置容量 5.8 GWe)</li> <li>●6 部反應爐興建中</li> <li>●監管的電力市場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●能源安全</li> <li>●強勁電力需求的增長</li> <li>●未來穩定的電力成本</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●公眾接受</li> <li>●融資</li> <li>●國外廠商進入市場(印度核能責任制度)。</li> </ul>
其他亞洲發展中國家	<ul style="list-style-type: none"> <li>●孟加拉及越南籌建中</li> <li>●泰國與印尼有計畫但尚未提交</li> <li>●馬來西亞正在研究 NPP 可行性</li> <li>●菲律賓已建造反應爐(封存中)</li> <li>●監管的電力市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●能源安全</li> <li>●多樣化與強勁的電力需求增長</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●建立監管等基礎設施</li> <li>●創造熟練勞動力</li> <li>●融資</li> <li>●公眾接受</li> </ul>

中東	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 伊朗 1 個反應爐運作中 (1 GWe)，2 個計畫中。</li> <li>● 阿拉伯聯合大公國 2 部機組正興建中</li> <li>● 沙烏地阿拉伯計畫興建 17 GWe 核反應爐</li> <li>● 其他國家(約旦、埃及)考慮選擇核能發電。</li> <li>● 監管的電力市場。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 強勁的電力需求增長</li> <li>● 未來穩定的電力成本</li> <li>● 為出口市場節約石油/天然氣儲量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建立規章和其他基礎設施，並培訓員工。</li> <li>● 融資非石油/天然氣豐富的國家</li> <li>● 海水淡化</li> </ul>
----	--	---	--

\*發電量(TWh)與裝置容量(GW)為 2013 年底資料

興建核電廠需要大量的前期資本，所以對新建電廠的融資是大多數國家的主要障礙。第三代大尺寸核反應爐裝置容量通常介於 1,000~1,700MWe 之間，對於建立新核電廠可能會受到限制；依據經驗法則(rule of thumb)，在電力系統中的核反應爐或任何其他單一單元的發電量，儘量不要超過該區電網負荷量的 10% 或以上[1]；而在電網不發達的國家或地區，未來發展小模組化反應爐(中小型反應爐)核電設施將會是選項之一。

### (三)核能安全

後福島時代的核能安全升級，可透過整體營運團隊的現代化研發與國際經驗獲得，而藉由核能團隊長期營運投資、最大化營運團隊不同單位的反饋，以及其他核電廠經驗(如 WANO 組織)，都可以幫助核能發電處於現代化，或減少發電成本支出。若核電廠自己擁有核電工程能力與妥善的經營模式，就可以從優化長期營運投資、安全升級經驗與教訓中獲得最佳回報。

核電行業的建設涉及較高的技術層面，以及相關之零件供應商、建築行業、建築師、工程師與管理能力等，同時核電廠興建也會受到嚴格的監管；諸多因素及新的安全建設，可能導致完工延遲或超出預算。例如第三代反應爐為了增加安全基準乃優化其反應爐設計，除了提高供應鏈的性能和質量外，並提升調度與管理等品質。由於牽涉到更多複雜的潛在安全設計，希望能提升公眾的接受度，所以第三代核反應爐的興建需要更長的時間與建設經費。而目前營運中的核電廠亦需要不斷地提高營運安全，特別是針對福島事件後需要加強的安全措施。另外，如美國境內 70% 以上的反應爐已獲得允許延長 20 年運轉的許可證，使反應爐可以運轉長達 60 年(2013 年和 2014 年美國基瓦尼和佛蒙特州揚基(Kewaunee and Vermont Yankee)兩家核能電廠，本質上是由於經濟原因停役)。而歐洲也定期進行

安全審查，使得許多已(將)運轉 40 年的反應爐未來可能將被允許再運行至少 10 年。而現有反應爐符合長期運轉(40-60 年)的安全要求，是生產低碳電力最具成本效益的方式[3]。

### 三、2050 核能技術路線圖願景

#### (一)2050 年核能發電占比

2015 年核能技術路線圖的願景，是基於能源技術展望 2015 (ETP 2015) 2°C 的情景[4]，要求電力部門在 2050 年的虛擬減碳技術，包括核能、碳捕集與封存及再生能源組合，即在 ETP 2015 2DS 中，全球核能電力生產占比推估須從 2011 年的 11%，提升到 2050 年的 17%，而再生能源最大配比可能占發電量 65%，可變(variable)再生能源供應為全球總發電量 29% (圖 3)，另某些國家可變再生能源配比將超過 40%，明顯地已改變了核能的運轉環境。而核電為傳統發電，可滿足基載用電需求，也可在負荷跟踪模式(load-following mode: 隨著用電離尖峰調整發電輸出功率，啟動和關閉速度快)下運作，但其調峰電廠靈活性比燃氣發電小。

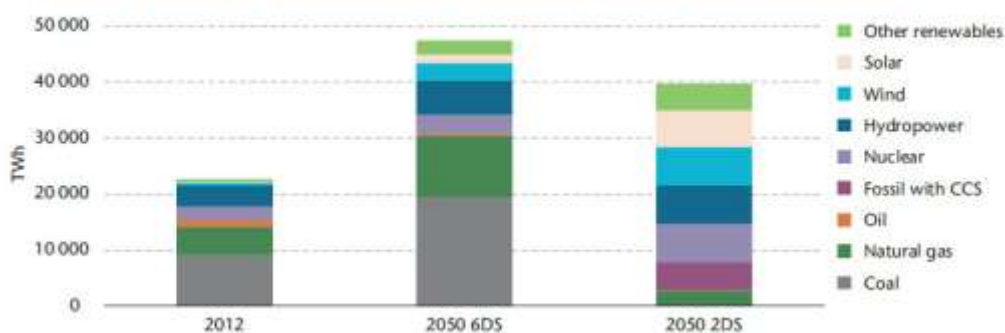


圖 3、2050 年之 6DS 與 2DS 情境下推估各能源發電占比[1]

根據 ETP 2015 2DS，未來核能裝置容量的增長主要為非 OECD 國家主導(圖 4)，如中國大陸、印度與俄羅斯等國。而在 2DS 情況下，中國大陸核電裝置容量將由 2014 年的 17GWe 增加到 2050 年的 250GWe (全球最大增幅)，同時占全球核電裝置容量與核電發電量約 27%；其它增長的核能市場包括韓國、印度、中東和俄羅斯等國，推估 2050 年時，非 OECD 國家核能裝置容量增長幅度會達一倍以上。另外在 OECD 成員國中，部分國家計畫逐步淘汰核能，且老舊的核電廠在未來幾十年內亦會逐漸除役，如歐盟將從 2040 年起核能總裝置容量會下降。

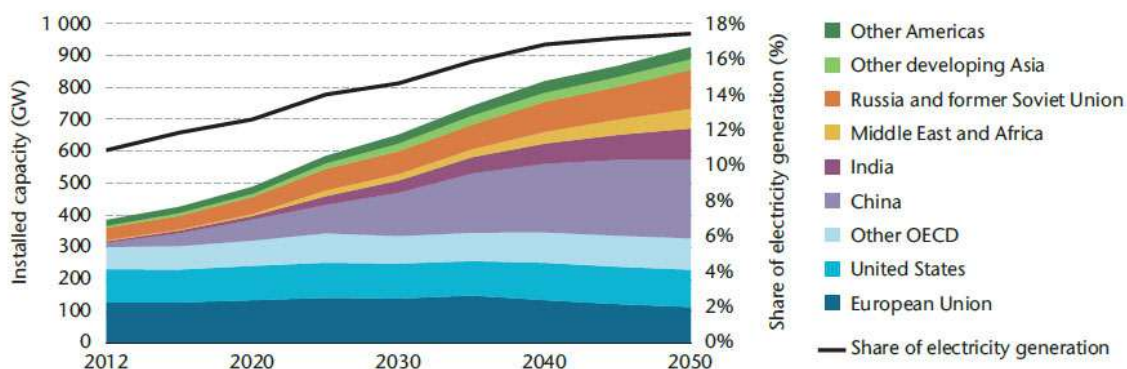


圖 4、ETP 2015 2DS 情境下，推估 2050 年全球之核電裝置容量增減情形 [1]

## (二)核能之碳減排量

每年電力部門藉由燃氣或燃煤發電所產生的 CO<sub>2</sub> 排放量，若由核能發電取代，大約可降低 1.3Gt 到 2.6Gt 的碳排放量；統計自 1980 年以來，電力部門利用核能發電減少的碳排放量已超過 60Gt。而 2DS 相對於 6DS 情境的電力減碳貢獻，推估核能發電每年將可減少 CO<sub>2</sub> 排放量達 2.5Gt (圖 5)，即代表全球電力部門碳減排達 13%。而不同的地區碳減排量隨著核能發電占比的不同會有所差異，例如韓國碳減排約可達 24%、歐盟 23%、中國大陸 13%，顯示核能發電在世界大部分地區，為電力行業之可靠與低碳排放的重要因子。

## (三)2050 年全球核能投資

在 ETP 2015 2DS 情境下，2050 年時全球核能裝置容量若要達到 930GWe，估計總投資成本約需 4.4 兆美元，其中 40% (約 2.0 兆美元)為 OECD 成員國，為了延長現有核電廠運轉壽命的投資(取代核能除役，並增加新的產能)。而 2050 年占全球核能三分之一裝置容量的中國大陸，推估投入的總投資成本約占四分之一，或僅投資新核能裝置約為 1 兆美元(表 2)。

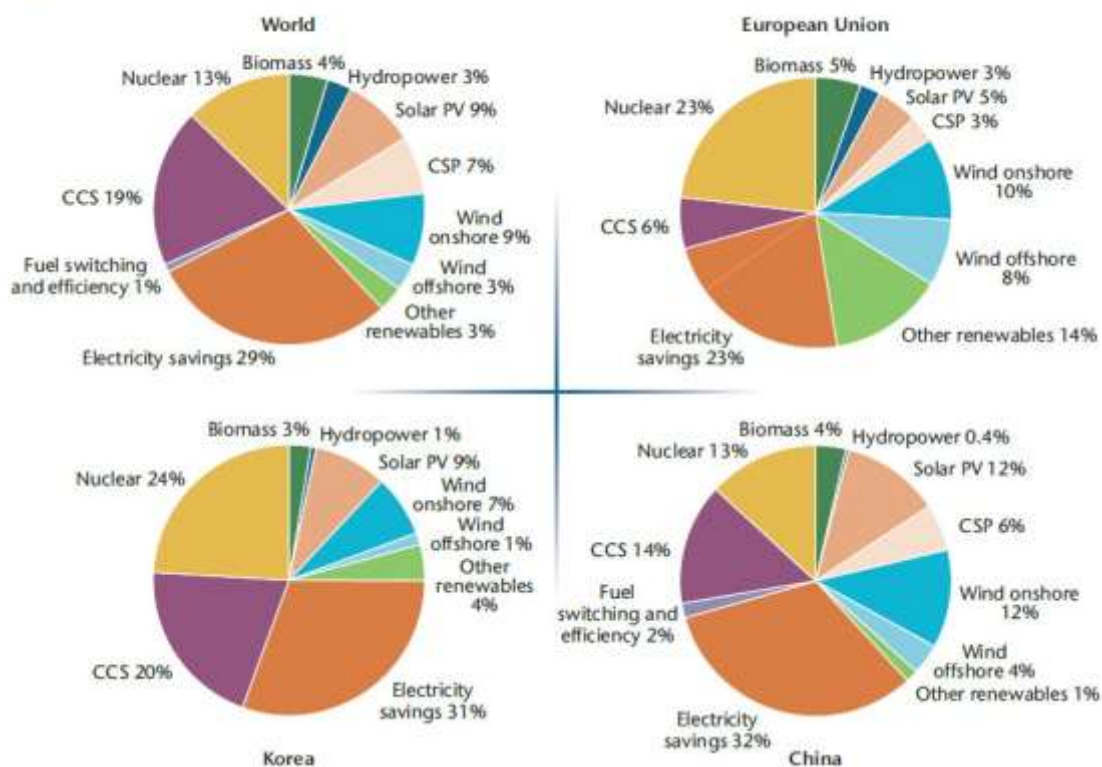


圖 5、全球、歐盟、中國大陸與韓國在 2DS 情境下每年核能發電之減碳貢獻[1]

表 2、2DS 情境下全球需要投資核電的金額 (單位：10 億美元) [1]

Country/region	2012-20	2021-30	2031-40	2041-50	2010-50
United States	90	216	288	118	713
European Union	113	168	259	164	704
Other OECD	83	153	178	162	577
China	209	309	350	157	1,025
India	21	120	114	158	412
Middle East and Africa	18	70	82	133	303
Russia and former Soviet Union	96	94	176	182	548
Other developing Asia	14	68	40	31	153
Other Americas	12	5	3	6	25
World	656	1,210	1,493	1,115	4,473

#### (四) 各國核能電廠興建成本

世界各國興建核能電廠的成本各有不同，例如中國大陸興建核電廠的隔夜成本(overnight costs，包括場地整理、施工與應急費用成本)總平均約



為 3,500 美元/瓩，比歐盟興建成本 5,500 美元/瓩的三分之二低；美國的核能電廠興建成本亦比歐盟低 10% 左右，但仍比中國大陸和印度高出 30%，並較韓國高 25% 以上。歐盟和美國的興建價格較亞洲地區高的原因，可以歸結到缺乏最近新的核電廠建設經驗，以及在工程設計和施工時需要較高的勞動力成本[1]。在 2050 年假設 2DS 情境下，美國和歐盟核電隔夜成本估計會有所下降，並在假設亞洲的核電廠興建成本保持水平時，興建成本將與韓國接近。

#### (五)核能技術發展的行動和里程碑

2015 核能技術路線圖對於反應爐技術、核能安全升級與長期運轉、新反應爐技術與發展、核能非電應用、核燃料循環、深層地質處置、除役，以及促進核技術的部署之許可和監管、選址和規劃、核安全、核融資開發、不同的利益相關者的權利與義務、電力市場、碳價格、培訓和能力建設、人力資源評估、規範和標準、通信和公眾接受等均有簡要說明，詳如附件所示。

### 四、2015 核能路線圖建議

#### (一)未來十年的關鍵行動

為實現核能發電達到 2DS 的部署目標，未來十年間，每年的核電併網裝置容量應從 2014 年 5GWe 增加至超過 20 GWe。具體的行動包括：

1. 需充分肯定核能發電為有價值的基載電力，可以提供電網重要的配套服務，以促進能源供應的安全性。因為核能發電是低碳技術，需要被允許有效地運轉，所以檢討電力市場最佳配比安排，確保提供適合的投資框架，以作為有利於新的核電廠興建重要評估指標。
2. 核電供應端的賣方需要有準確地電廠興建時程與預算經費，並儘量減少新設計費用(新設計費通常相當昂貴)。近年來對於核電廠的計畫管理和規劃、人力資源配置、供應鏈建立、品管、監督及反應爐設計、施工簡化和優化等整合訓練與經驗等，將會是重要的關鍵。
3. 加強核能運作之標準化、統一規範、標準與法規的要求，並且監管許可流程儘量簡化，以降低成本，並提高新建核電廠的安全規劃及操作性能。而業界亦須不斷地提升品質保證與核結構控制、

系統和零件，以及整個核能領域需要加強核能安全的相關機構，包括供應鏈、供應商、發電業者與監管單位等。

4. 加強監管機構與核電廠營運商間之訊息交流與經驗共享，以提升整體的安全性與經營績效。
5. 第一次選擇發展核電的國家須從核計畫開始，包括前置作業準備所需的基礎設施與建設能力的訓練，因為教育和稱職的工作人員對未來的核電營運操作與監管是絕對必要的，且需要長期的規劃。
6. 提高公眾的接受度亦必須加強，包括現有反應爐之實施後福島之安全升級，並證明核能監管機構的強勢作為與獨立性。藉由以事實為基礎的訊息及透明化資訊，向公眾宣導核電之風險及核電的好處，使得核能發電可以就能源安全、可負擔風險、減緩氣候變化和空氣品質方面發揮良好的作用。
7. 各國政府若尚未確定自己的最終核廢料管理戰略，對於高放射性廢棄物深層地質處置(Deep geological disposal, DGD)，如果地質安全情況允許且具有經濟意義，應該毫不拖延地推薦解決方案。另外，也可以考慮利用與他國的共同運作，進行 DGD 廢棄物管理，但這需要長期規劃、政治承諾和當地社區的強烈參與。

## (二)利益相關者的近期行動

為確保 2050 年在核能發展上實現所需的碳減排量，國際上可以用此路線圖衡量進展情況與進行工作評估，其中核能利益相關者需要的短期行動如表 3。

表 3、2015 核能路線圖建議核能利益相關者的近期行動[1]

利益相關者	行 動
政府	<ul style="list-style-type: none"> <li>*提供核能發展明確的承諾和長期戰略。</li> <li>*確認核能長期運行的損益，保持低碳發電與能源供應安全的重要性；提供明確的前景，鼓勵營運商加強設備更新與技術創新。</li> <li>*支持安全性研究，確保成果傳達給廣大民眾。</li> <li>*從保障核電發展的方式，繼續合作討論國際燃料服務，確保核廢</li> </ul>

	<p>料有長期儲存的政策，包括高放廢棄物地質深層儲存。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*繼續支持研發用過核燃料的先進回收技術，以降低高放廢棄物的體積和毒性。</li> <li>*定期審查累積的資金是否充足，如確保除役活動專用預留資金，以及提供核電廠運轉操作的資金。</li> <li>*業界能加快中小型反應爐原型機研發與證明其設計和施工帶來的好處，以開拓小型模組化反應爐的市場。</li> <li>*支持研發和原型開發第四代核能系統，以確保在 2030-40 年進行技術準備。</li> <li>*確保監管者的權威性與獨立性，以及工作人員有足夠的技能和能力來執行任務。</li> <li>*鼓勵開發先進反應爐框架，包括中小型反應爐和第四代反應爐。</li> <li>*擴大政府-民間的夥伴關係與扶持產業，發展核熱電聯產示範工程、海水淡化和製氫等領域。並設立發展教育中心，以有效的溝通與支持有關核能的事實。</li> </ul>
<p>業界</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*營運商應及時實施核電廠的後福島安全升級</li> <li>*優化第三代反應爐設計，以提高施工時程準確度和降低成本。</li> <li>*吸取國際間同類型之第一次核電廠興建經驗，以了解並用來確保往後同類型核電廠建立的時間與預算。</li> <li>*可持續開採環境的投資是必需的，以解決預期的長期需求。</li> <li>*已關閉的核設施應及時停止使用，並以安全和具成本效益的方式除役。</li> <li>*提升整個核能部門和各級人員的安全文化</li> <li>*與機構投資者及其他金融機構改善溝通，以更好地教育投資者有關核電廠的經濟效益投資。</li> <li>*持續統一的規範和標準，提高全球供應鏈的整合。</li> </ul>
<p>大學和其他科研機構</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*支持現有核電廠老化的研究與開發，以提高其安全性，進而可以延長其營運年限長達 60 年或更多。</li> <li>*應進行確保延長乾式儲存核廢料的研究，以滿足最高的安全與保安要求。</li> <li>*核能的安全性研究，以及與廣大民眾的交流應投入更多努力。</li> <li>*應進行國家技能評價，以量化需要熟練的核能技術團隊。</li> <li>*需要國際合作，由現有的核能國家協助新加入核能的國家進行核能培訓計畫。</li> <li>*針對新加入核能的國家制定學生交換計畫，並在可能的情況下，</li> </ul>

	進行一段時間的核設施實際工作經驗。
金融機構	<ul style="list-style-type: none"> <li>*出口信貸機構應繼續提供貸款擔保，以支持核融資。</li> <li>*養老基金和其他機構投資者應該考慮對核電廠的投資。</li> <li>*開發銀行可以支持核電新國家的核電培訓和能力發展需求。</li> </ul>

## 五、結語與建議

基於長期全球溫度上升限制 2°C 的情境，2015 核能技術路線圖主要是突顯核能在未來低碳的潛在貢獻。依據此技術路線圖說明，如果仍依循目前的能源供應和使用趨勢，2050 年與能源使用相關的 CO<sub>2</sub> 排放量將增加近一倍；所以未來對於低碳能源技術發展至為重要；而在 2DS 情況下，2050 年時全球核能發電裝置容量將需要增加一倍以上，即從目前的 396GWe 提升到 930GWe (全球發電從 2011 年的 11% 提升到 2050 年的 17%)。而中國大陸核電裝置容量將由 2014 年的 17GWe 增加到 2050 年的 250GWe，核電裝置容量與發電量均約占全球 27%。其它主要的核能增長市場，包括韓國、印度、中東和俄羅斯等國，推估 2050 年時，非 OECD 國家核能裝置容量增長幅度會達一倍以上。

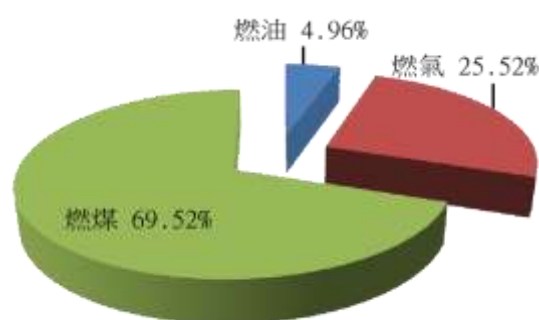
自 1980 年以來，電力部門利用核能發電減少的碳排放量統計已超過 60Gt (每年由核能發電取代燃氣或燃煤發電所產生的 CO<sub>2</sub> 排放量，大約可降低 1.3Gt 到 2.6Gt 的碳排放量。而相對於 6DS 情境，推估核能發電在 2DS 的電力減碳貢獻，每年可減少達 2.5Gt，即顯示未來全球電力部門碳減排可達 13%。

2015 核能技術路線圖同時也是協助有意維持或發展核能技術的國家，藉由此路線圖克服與核能運作相關的障礙與提出具體建議，包括未來的反應爐技術、核能安全升級、新反應爐技術與發展、核能非電應用、核燃料循環、深層地質處置、除役，以及促進核技術的部署之許可和監管、選址和規劃、核能安全、核融資、不同的利益相關者的權利與義務、電力市場、碳價格、培訓與能力建設、人力資源評估、規範和標準、以及通信和公眾接受等說明，並提出相對之參考時間表，以確保核能發電技術及新加入核能營運國家的操作安全。

對於減少溫室氣體排放，行政院在 2008 年 6 月 5 日通過之永續能源政策綱領中，已明確揭示未來我國的 CO<sub>2</sub> 減量目標與期程，包括 (1)短期：

2016 至 2020 年間回到 2008 年排放量水準； (2) 中期：2025 年回到 2000 年排放量水準； (3) 長期：2050 年回到 2000 年排放量的 50% 的減碳目標。2015 年 6 月立法院終於三讀通過「溫室氣體減量及管理法」，明定我國 2050 年碳排放量應降至 2005 年排放量的一半以下，顯示政府善盡共同保護地球環境之減少碳排放的決心。

未來我國的核四若完工不運轉，則以核四的年發電量 193 億度計算，當完全以燃氣發電(每度電 CO<sub>2</sub> 排放 389 克)取代後，推估一年將增加 750 萬噸的 CO<sub>2</sub> 排放量。若目前營運中三座核電廠的六部機組(年發電量 400 億度計算)營運 40 年後全部如期除役，並以燃氣發電取代，則 2025 年以後增加的 CO<sub>2</sub> 排放量將達 1,556 萬噸；另外若利用台電公司民國 94~102 年的發電占比推估(圖 6，不考慮燃油發電)，則六部機組全部除役後，增加的 CO<sub>2</sub> 排放量將達 3,517 萬噸。對於我國將更難達到減碳的目標。



資料來源:台灣電力公司

圖 6、民國 94 年~102 年度台電公司火力發電占比

我國的核能政策為穩定減核，逐漸達到非核家園；因此，在國家政策沒有改變之前不會再興建新核電廠，所以 2015 核能技術路線圖所建議之未來十年關鍵行動，相對於我國主要工作除了提升目前運轉中核電廠的安全外，當務之急為儘速處理 (1) 與民眾確實溝通後，確定低放射性的儲存場所；(2) 用過核燃料冷卻池即將爆滿，儘快取得乾式貯存設施的許可；(3) 高放射性廢棄物深層地質處置與長期解決方案，包括考慮他國的共同運作等；(4) 在安全的前提下，與民眾的雙向溝通、及時資訊透明化，宣導核能減碳效益與提供穩定電源等具體效益，以減少民眾對於核能發電的疑慮。

## 參考文獻

- [1] IEA/NEA, 2015, *Technology Roadmap: Nuclear Energy*, OECD/IEA/NEA, Paris.
- [2] IEA/NEA, 2010, *Technology Roadmap: Nuclear Energy*, OECD/IEA/NEA, Paris.
- [3] 2014 年世界核電站的總裝機容量有所增長，  
<http://www.china5e.com/news/news-894390-1.html>
- [4] IEA, 2015, *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*, OECD/IEA, Paris.
- [5] NEA, 2012a, *Nuclear Energy Today*, 2nd edition, OECD/NEA, Paris.
- [6] NEA, 2012b, *The Economics of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants*, OECD/NEA, Paris.

## 附件

### 一、核能技術發展

#### (一)反應爐技術

2015 核能技術路線圖建議採取以下行動	提出時間表 (年)
各國政府須體認到保持低碳發電裝置和能源供應的安全性，滿足安全規定要求之長期運行價值；而清晰的政策是需要的，如此可以鼓勵營運商投資於長期運作與興建新核電廠，以接替除役的核電廠。	2015-30
系統和材料的老化需要研究與開發(R&D)，以支持現有核電廠 60 年或更多年的長期經營操作安全。	不斷的
廠商須優化第三代核反應爐的設計，以提高準確完工日期與降低成本。而藉由從第一個建廠工程(FOAK)中，快速整合新建廠學習速率之學習經驗需要加速完成（包括優化設計、計畫管理、供應鏈、互動與監管機構），以確保往後工廠興建能在預算經費中準時完工。	不斷的
開拓小型模組化反應爐（SMRs）市場，政府和業界應共同努力加快 SMR 原型的開發和推出建設計畫（每個設計約 5 個計畫項目），並需要證明模組化設計和工廠組裝的優點。	2015-25
各國政府體認到發展第四代系統資源利用率和廢棄物管理的長期利益，並至少支持一個或兩個第四代快速中子增殖反應爐(Fast Breeder Reactor Gen IV)原型機的研究與發展。	2015-30
政府與民間的合作夥伴必須置放在政府和企業之間，以開發示範海水淡化和製氫領域的核熱電聯產技術。	2015-30
合併第四代原型機的運行回饋，發展出第四代反應爐的商業工廠。	2030-40

2013 年底興建中的 70 部反應爐約有 89%是輕水式反應爐(圖 7)，其次為占 7%的加壓重水式反應爐(均在印度)。另有兩個興建中的快速中子增殖反應爐，分別在俄羅斯(BN-800)與印度(PFBR)，兩者預計 2015 年連接電網，另 1 部為在中國大陸興建中的高溫反應爐 GCR (Gateshead Community Reactor)。

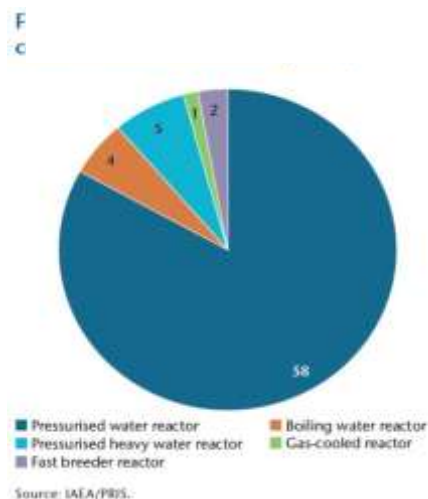


圖 7、2013 年底全球興建中的 70 部反應爐型式

## (二)核能安全升級與長期運轉

目前世界核反應爐營運商面臨兩大挑戰。一為後福島的安全評估鑑定建議的安全升級(大多數營運商已經開始這項工作)。雖然審查的結論是這些反應爐是安全的，並能繼續經營，但仍有一些安全升級措施的建議，包括對地震災害和洪水災害的增強措施、嚴重事故以及多個外部事件提高應急準備等。所以核監管機構快速實施核電廠的安全監督，以及更佳的安全升級訊息是必要的，以減少公眾的疑慮。第二個挑戰是營運商必須解決核反應爐繼續長期運轉的營運年限，且要滿足操作安全要求，以保持核能是低碳發電、低成本的發電選項；因此，研發老化核電廠與改進安全性是必要的研究，例如符合 60 年運轉的安全需求(截至 2014 年 12 月，美國已有 74 部反應爐被授予牌照續期到能操作 60 年，另有 19 部反應爐已申請正在審查中)。另美國正在研究核電廠超過 60 年擴展操作的可行性。而長期運轉改善與安全升級往往可以合併進行，以符合核電廠升級的成本效益。

## (三)新反應爐的發展

預期未來幾十年大部分增長的反應爐，會以“大”的第三代反應爐為主(如表 4)，無論為壓水式(PWR)或沸水式反應爐(BWR)，另外還會有少數的中小型反應爐，加壓重水式反應爐，以及第四代反應爐。而第三代反應爐與第二代反應爐比較，具有增強的安全特性和更高的效率，以及經濟性改進。預計到 2050 年，第三代核能技術的發展和創新，努力簡化和標準化設計，將有助於降低成本，以及縮短施工工期。



表 4、第三代反應爐設計實例[1]

供應商	國家	設計	類型	淨容量 (MW)	操作中*	興建中*
AREVA	法國	EPR	PWR	1,600	0	4 (芬蘭, 法國, 中國大陸)
AREVA/MHI	法國/日本	ATMEA	PWR	1,100	0	0
坎杜能源	加拿大	EC6	重水爐	700	0	0
中核集團, 中廣核	中國大陸	華龍-1	PWR	1,100	0	0
GE 日立-東芝 GE 日立	美國/日本	ABWR/ ESBWR	BWR/ BWR	1,400-1,700 1,600	4(日本) 0	4 (日本, 臺灣) 0
KEPCO/ KHNP	韓國	APR1400	PWR	1400	0	7 (韓國, 阿拉伯 聯合大公國)
三菱	日本	APWR	PWR	1,700	0	0
俄羅斯聯邦原 子能機構	俄羅斯	AES-92, AES-2006	PWR	1,000~ 1,200	1	10 (俄羅斯、白俄 羅斯、中國大陸、 印度)
國家核電技術 公司	中國大陸	CAP1000 CAP1400	PWR	1,200-1,400	0	0
西屋電氣/東 芝	美國/日本	AP1000	PWR	1,200	0	8 (中國大陸, 美 國)

\*:截至 2014 年 12 月 31 日止

在特定或電網不發達的區域，若國家無法支持興建大的核電廠，則未來中小型反應爐(SMRs)可以發揮獨特作用，因為在區域或小的電網系統中，也可以針對特定的非電力提供應用，如區域供熱或海水淡化等(中小型反應爐的經濟性目前尚未被證實)。中小型反應爐主要是減少資本成本的影響，並提供小或離網(off-grid)系統中的電力和熱量。而在 SMR 設計中，使用被動安全系統也代表有吸引力的特徵，例如，在發生事故時，不需要操作員的干預就可進行衰變熱移除(decay heat removal)。對於創造 SMRs 市場，首先需要有成功的部署 FOAK 反應爐技術，而其他國家再跟進；這需要各國政府和業界共同努力，在未來十年加速第一 SMR 原型運轉，並能證明模組化設計和施工能夠帶來好處，否則 SMRs 的市場潛力在短期到中期可能無法實現，而目前正研發 SMRs 的國家包括阿根廷、中國大陸及俄羅斯等國，而韓國亦有發展意願。

未來的第四代反應爐將著重在新一代核能系統研發與國際合作，在第四代反應爐國際論壇 (Generation IV International Forum, GIF) 中，強調核反應爐的發展目標是提高可持續發展、安全可靠、經濟、抗擴散與實體保護。2014 年 GIF 並歸納鉛冷式快速反應爐(LFR)、鈉冷式快速反應爐(SFR)、超臨界水冷式反應爐(SCWR)和極高溫反應爐(VHTR)等四種為較

有可能發展出原型機型；且 GIF 希望借鑒福島第一核電廠事故的教訓，以制定第四代反應爐具體的安全設計標準。

#### (四)核能非電應用

核能不僅可以產生電力，同時也可藉由核熱電聯產，提供低碳發熱體來替代化石燃料產熱，如此可減少利用化石能源產生工業熱應用的溫室氣體排放。核熱電聯產雖然未經大量證實，且目前應用仍不普遍，但核能提供特定行業集中供熱，在俄羅斯和瑞士均有成功的經驗，例如瑞士的貝茲瑙核電廠（2x365 MW）即有集中供熱超過 25 年的成功案例，包括每年提供約 142GW 的熱量給 2,500 家用戶，從而避免 42 萬噸的 CO<sub>2</sub> 排放。另外核電新市場還具備海水淡化潛力，特別是提供占世界一半海水淡化的中東地區。而目前核能非電應用於海水淡化仍面臨諸多挑戰，包括核電廠營運商、海水淡化廠營運商、熱電聯產電廠生產的電力，以及用水客戶之間強大的商業模式發展機制。

#### (五)核燃料循環

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
永續環境發展的鈾礦開採投資應解決長期需求	2015-35
各國政府繼續合作，討論國際間的燃料服務，以保障核電發展安全。	不斷的
各國政府應確定建立長期貯存和處置政策，包括高放射性廢棄物深層地質處置（DGD），而不應延遲核廢料規劃，因為“觀望”不是一種選擇。	2015-50
必須進行確保核燃料廢棄核(SNF)的乾式儲存，以滿足最高安全性和安全需求。	不斷的
各國政府繼續支持先進回收技術，以減少廢棄物體積和高放廢棄物毒性的研發。	不斷的

#### (六)先進燃料循環研究

研究目的是將可重複使用的用過核燃料與獨立的元素材料回收再利用，例如負責高放廢棄物的熱負荷與放射毒性的次鈾系元素。這些可以調節和處置，或在快速中子反應爐中燒毀等是第四代反應爐的概念。

#### (七)深層地質處置

深層地質處置是處理高放射性廢棄物的建議策略，但需要長期的規劃、

政治承諾和強烈當地社區參與意願。芬蘭、瑞典和法國將是在 2020 年代指導操作的國家。而 2011 年通過的歐盟放射性廢棄物指令，要求各成員國制定國家級的核廢料和放射性廢棄物管理計畫；該指令在倡導高放射性廢棄物地質處置庫處置與盡可能開放區域資源庫，而區域資源庫亦應該更詳細地評估，因為它可能具有地質和地理限制，可能要集中資源，或是找到最合適的 DGD 操作的其他國家（以穩定地質、安全與經濟為原則）。至於沒有短期至中期可操作 DGD 的國家，應該要進行研究，以確保延長用過核燃料乾式儲存最高的安全和保安要求，但是這不能被視為替代的 DGD。

#### (八)除役

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
各國政府需要確保專門資金以預留除役活動；以及核電廠運行過程中，營運商須積累足夠的資金來支付未來核電廠除役的成本；而經營者亦應定期審查資金的充足性。	不斷的
核電營運須確保核設施除役的及時安全與成本效益	不斷的

未來幾十年核能領域的除役將越來越重要，且有幾十部反應爐將被關閉。業界須進一步提供證據，說明核能廠可以安全地被拆除；而進一步的改進技術（例如機器人）及適當的監管（例如允許核電廠的非放射性物質處理成為一般垃圾）可以幫助達到這個目標。另核能除役亦需有足夠的資金，大多數國家的政府有責任確保這種資金的充足，而經營者亦必須保留專門的經費（內化於核電的成本）。一旦核設施被永久關閉，就不可以傷害公眾、工人和破壞環境，包括消除所有放射性物質、去污及最後的拆除與清理等。截至 2014 年 12 月，國際間已有 150 部核能機組被永久關閉，並分別在除役的階段。而國際訊息交流論壇也可以分享除役過程的審查、經驗教訓與最佳實踐等相關資訊；而這也是核能技術專長領域，營運商與新行業的競爭。

核電廠除役的兩個主要策略：(1)立即拆除，即在核設施關閉後，核電廠的設備、結構、材料及放射性材料等，允許在約 10 至 15 年間清除；(2)延期拆除，核設施進行維護和監視中，通常允許放射性衰變，一般約需 30-40 年，在此之後，核電廠才進行拆除及去污等工作。另外核廢料的掩埋為所有或核電營運中設施的一部分，被裝在一個長壽命材料的結構中。但這不是推薦的選項，儘管可能是在特殊情況下（例如嚴重的核能事故發

生後)的解決方案。而目前越來越多的核電發電商選擇立即拆除方案，並藉由核電廠操作人員的知識與協助幫忙除役，以減少後代的負擔。

目前核電廠除役的技術與步驟已經具備，但進一步的技術發展和過程改良，將可幫助加速未來的除役活動，並降低成本。例如除役過程中提高標準化設計、提高自動化、開發更靈活的遠端控制工具、開發衡量去污工具、提高去污技術等，均是未來除役該提高的相關技術。

## 二、促進核能技術的部署

2050 年推動核技術的部署行動，確定的涵蓋範圍相當廣泛，如許可與監管、核能安全、融資、培訓與電廠建設、規範和標準、供應鏈與本地化問題、溝通和公眾接受等；而促進政府和專家之間訊息交流的國際合作也非常重要，因為可以確保想要使用核電的國家能正視核能發展，且須要有效、符合安全、保安和防擴散的最高標準，這是國際核能合作框架(International Framework for Nuclear Energy Cooperation, IFNEC)的使命。

### (一)許可和監管

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
各國政府必須確保監管者擁有很強、獨立與具備足夠的專業技術，主管與適當報酬的人員來執行任務。	不斷的
應繼續推展國際合作，無論是業界(如 WANO 或世界核協會[WNA])或監管機構 (IAEA、西歐核監管協會[WENRA]，多國設計評價方案[MDEP]，NEA 委員會核管理活動[CNRA]) 或核能技術組織。	不斷的
先進的反應爐，包括中小型反應爐和第四代反應爐的許可框架需要被開發。	2015-30
新的核電項目開發之前的現場分析，包括環境影響評估和利益相關者的協商，同時考慮吸取福島第一核電廠事故經驗，以及了解長期氣候變化可能產生的影響，才能保證此計畫能有高品質與公眾支持。	不斷的

無論是核電新加入國或已建立核能的國家，核能監管機構應該強勢與獨立。且需要有足夠的、有資格和資源豐富的工作人員來執行任務(NEA, 2014a)。另外，還要能為國際組織協助推廣或分享高效監管等經驗。而在營運商之間或是監管機構，特別是同行評審過程，應被認為是一個有效的安全評估過程，藉以提高核安全的整體水準(不用擔心過多的監管要求)。

## (二)選址和規劃

核能設施的選址興建，與當地社區居民的互動遠遠超過任何決定，所以需要深入的分析。雖然在計畫開始時就建立場址的適宜性分析，但仍然需要在全生命週期中，對整個設施週期性地重新確認該設計是否滿足需求，因為新的分析技術可能改變選址結果。對於如何開展選址活動有許多的指導方針[5,6]。而評估和選擇合適的興建核電廠地點標準，須包括健康、安全和保障因素，現場地震規模是否易受極端自然或人為事件影響，工程和成本因素（例如可用的冷卻水、基礎電力設施與負載中心距離等，社會經濟因素，環境考量等種種因素。

## (三)核能安全

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
核電廠營運商須及時實施後福島的安全升級	2015-25
整個核部門安全文化需要加強與監管（營運商和各行業，包括供應鏈及監管機構），並在各級員工監督。	不斷的
各國政府應支持安全研究工作，並確保成果傳達給廣大民眾。	2015-25

福島第一核電廠事故發生後，要求核電廠的安全升級與增強安全要求，並落實到監管機構，以確保核電廠運轉能達到更高的安全標準。特別是日本對於審查和重組其監管體系，建立了獨立及明列新的安全要求。在被允許可以重新啟動之前，該國的48部反應爐將針對這些新的標準進行評估，2014年底已有四部機組被日本監管機構批准重啟。另藉由福島第一核電廠事故的經驗教訓、歐盟的壓力測試、與綜合西歐核監管機構和國際原子能機構的安全要求，歐盟的核安全指令在2014年7月進行了修訂。而考慮超出設計基準事故的特別程序和嚴重事故管理的要求、福島第一核電廠經驗的壓力測試結果與教訓，俄羅斯的核能監管框架也正在更新，即要求核電廠在NPP設計和選址安全分析報告的內容要求以外，自然與人為的影響（以及這種影響的組合）也需要被考慮。

## (四)核融資開發

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
政府提供明確、有利於核電的政策和穩定長期戰略核能開發	2015-25年及以後
各國政府應確保價格的透明化與投資所需的大量密集型資本，以	2015-20年及

及長期的基本電力供應穩定政策。而政策應當支持所有低碳發電項目來源的公平競爭。	以後
由雙方提供可能需要的貸款擔保，以降低融資成本。	不斷的
各國政府能夠藉由碳交易機制、碳稅或委託投資的低碳電力來源提供低碳電力。	2015-35
需要制定有針對性的教育機構投資者和其他金融機構於核電廠的經濟效益溝通策略。	2015-25
再融資戰略應視為融資的一部分，因為只引用一次的營運和建設風險已不再適用。其他的策略可能包括擴大融資，如養老基金和其他機構投資者更長期的資源來源。	不斷的
業界需要提高其能力，以提供準確的興建時間和預算，從而減少施工和需要政府相關擔保的投資風險。	2015-20

在 2DS 情境下，2050 年裝機容量估計需達 930GW，則 2011 年到 2050 年之間需要投資 4.4 兆美元。其中核電廠興建平均約 5-7 年完工，每部機組耗資約 35-55 億美元。而核電項目的融資有其獨特的挑戰，工期延誤和成本超支相關的風險是核電廠融資的重要因素。目前興建中的核電廠多數是藉由國有企業，或是政府的大力參與貸款擔保。而某些獨立的發電商則根據自己的資產負債興建新核電廠，且完全沒有政府的資助，包括未來價格保證或長期購電協議等。核電廠的投資成本高，意味著整體經濟與融資的可行性很大程度是取決於資金成本，此費用將須由各種風險因素的評估來確定。而融資關鍵要素，首先是盡量減少金融風險，再利用適當的所有權和承包模式，使剩餘的風險能夠適當的分配到各個建構項目。

#### (五)不同利益相關者的風險

例如供應商、發電業者、國際承包商、本地供應鏈的參與者和監管單位，以及投資者和金融機構的角色和責任需要明確界定，這有助於更佳化分配整個利益相關者的風險。其中與核電廠相關的主要風險為施工風險(成本和施工持續時間)、電力價格與監管風險等，這可能會影響規劃和建設時程(核安全法規)，以及負載係數(電力市場監管)。此外，國家(政治穩定)及藉由不同的對沖或保險的機制，或是政府擔保管理的貨幣風險等亦須要考慮。

#### (六)電力市場

政府提供足夠的信心，可以使投資者在新的發電項目開發上起關鍵性作用；而明確與可預見的長期電價，使投資者有利可圖，並有足夠的回報，例如在監管的電力市場中，可以藉由合理的電價上漲來建立投資者的信心。

另監管單位與營業商合約內容需包括明確的訴訟條款，因為投資者相信在規範的市場經營發電業，需要透過合理電費來償還債務。這些價格訂定由能源市場監管機構監督，包含平均燃料成本、營運和維護成本、核廢棄物管理和除役、折舊、債務償還成本，以及資本回報等；使得監管的電力市場可以有效地保護建設業者和降低市場風險，從而促進如發電業之大型資本密集型項目的融資。

#### (七)碳價格

碳價格是低碳政策的核心支柱，無論是作為碳交易機制、碳稅或發電業者授權使用低碳能源、投資低碳能源激勵措施等，這可以幫助加快核能的部署。在沒有足夠高的碳價格來反映化石燃料碳排放的外部成本情況下，政府將要繼續提供完善的低碳投資，以及減輕開發商與金融投資者市場風險的政策解決方案。

#### (八)培訓和能力建設

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
擁有核能的國家需要熟練的核能技術團隊進行核技能評估量化，以保持現有核電廠的運作及對未來除役的需要(包括相關的核能新建築)。評估對象應包括核監管機構和研究人員，以及因為年屆退休而需要更換的新人員。	2020-25
新加入核能營運國家應評估是否需要對核能建設和營運階段的技術工人進行訓練，包括核監管單位的人員。	2015-25
新加入國發展地方培訓計畫旨在發展對核能的認知與提升核能力的隊伍	2015-25
核能技術成熟的國家，企業和政府需要實施保護未來幾十年將會退休人員的相關核能知識。而指導方案的施行，包括可以確保核能知識的移轉、經驗教訓，以及營運商、監管機構、廢棄物管理和除役專家能有的最佳的實踐。I	2015-30
新加入核能營運國家需要國際合作，以幫助從現有的核能國家轉移核能培訓計畫。包括等待核電廠開始營運前，新培訓/教育的工人獲得的實際經驗、發展和技能維護等。	2015-30
現有核能國家研究生核培訓計畫，應制定針對核能營運國家學生的交流計畫。如有可能，應包括一段時間的核電廠實際工作經驗，以及相當於核能新加入國的全國培訓計畫。	2015-30
對監管機構落實吸引和保持高度熟練地對策	不斷的

協調培訓計畫的國際合作是必須的，以發展國際層面相互承認的學歷。

不斷的

#### (九)核教育和培訓

藉由 2012 年公佈的核教育和培訓，來評估核能教育和培訓現狀，並確定 NEA 成員國存在某些技術與經驗上的差距。以及需要解決的技能發展需求行動。包括核能分級制度的發展，例如從新建核電廠、運轉到除役，研究和核監管核反應爐整個生命週期等，並按照功能進行分類。每個部門的功能，包含職業水準和能力要求的工作規範定義，以及設置的初始資格，諮詢培訓和持續專業發展。

#### (十)人力資源評估

核能源領域未來幾十年將有大量的工人退休，所以政策必須貫徹，以確保經過培訓合格的人員和工人，可以用來支持核計畫和所需的調節功能發展。某些國家意識到維持和吸引高技能的監管機構將是一個優先事項，所以認識到這方面的需求，並促進教育和培訓方案，來提高核能部門的人力資源；例如法國、日本、韓國和英國實施的國家評估核人力資源，藉以保持現有的核能運作，以及確定員工能進行新電廠建設及運轉。而新加入核能國家對於啟動核計畫之人員培訓是一大投資，這需要有激勵機制，以吸引年輕的人才接受訓練。由於需要很長的時間來制定和實施核能計畫，並需要獲得實際的操作經驗(包括實際的培訓和營運經驗)。一旦接受國外的核能教育和培訓，接下來就需要有足夠的激勵，使得來自新加入國的這些技術工人，返回或留在自己的國家繼續核能事業。

#### (十一)規範和標準，供應鏈發展和本地化問題

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動	提出時間表 (年)
業界需繼續努力統一的規範和標準，以提高全球供應鏈整合。	不斷的
核電新加入國核能本地化的合理要求，應該有整體的成本效益與合格的供應鏈來進行適當的平衡。且應詳細闡述，如何達到全球和本地供應鏈之間的平衡。	2025

2013 年底有 70 部反應爐正在 15 個國家興建，另規劃準備興建的國家，包括印尼、約旦、馬來西亞、波蘭、土耳其、沙烏地阿拉伯及越南等國，而白俄羅斯和阿拉伯聯合大公國為新加入正在興建的國家。2050 年要達到 930GW 的核電裝置容量，越來越多的建設項目需要執行。但要實現



這一長期目標且具有成本效益，則核能工業有兩個特別的挑戰需要解決，(1)規範和標準，以統一提高反應爐設計的標準化；(2)確保局部和全球的核供應鏈符合標準，而且不存在任何可能會有推遲瓶頸的項目出現。

## (十二)通信和公眾接受

2015 核能技術路線圖建議採取如下行動：	提出時間表 (年)
有效支持教育和訊息中心的發展、對核工業相關的事實進行透明的溝通和公共參與。對於新加入國，確保核電發展更廣泛公眾意識將是特別重要的。	2015-30 年及以後
許多國家對核設施操作者與利益相關方存在著第一優先的通信作用，特別是及時的事件。在這種情況下，核設施監管授權活動應包括審查和驗收營運商的戰略與計畫。該方案的性能也應在週期性基礎上進行評估。	不斷的
具有影響力的利益相關者群體，如政治家、媒體、教師和當地領導者，對於互動方案需要落實，以增進彼此了解核能的好處與風險。溝通應該是定期且透明的，如透過當面交流、印刷刊物、或是上網的資源。	不斷的
及時提出國家監管機構的任何安全事件的共享訊息	不斷的
國家監管機構需要實現有關各方面和監管機構之間的討論通信機制和工具	不斷的
對於深層地質處置場的識別與開發，能進行清晰與經常性的溝通。基於自願參與與澄清退出的過程是被建議的，且一開始就應包括替代地點的討論溝通。	2015-30 年及以後