

福島事件後的世界核能發展趨勢

王裕隆

推估世界能源趨勢的三大情境

本趨勢分析採用OECD/IEA，World Energy Outlook-2011（國際經濟合作暨發展組織／國際能源署，世界能源趨勢-2011年）的數據，推估2009年至2035年間的全球能源趨勢。

WEO-2011對能源和氣候趨勢進行嚴謹的量化分析，評估全球能源系統面臨的威脅和機會。這些分析，包括三種全球情境，和許多不同的個案。新政策情境是其中的核心情境，該情境假設，政府所承諾的政策，會在嚴謹的態度下被落實，縱使尚未有明確的方法足以實踐這些政策。不同於新政策情境，現行政策情境的假設是到了2011年的中期時，將沒有其他新的政策產生，如此的對比，說明政策承諾和規劃的價值。至於，450情境則是將全球長期上升的平均氣溫，被限制在低於工業化以前2°C的水準，目的是尋找清楚可行的方法以達成該目標。另外，這三種情境分析的結果差別甚大，凸顯出各國政府亟需扮演關鍵性角色，以制定目標、落實需要的政策和形塑我們能源的未來。

若我們要以合理的成本達成450情境中的目標：將全球平均溫度上升長期限限制在2°C，就不能拖延所需要採取的進一步行動。在新政策情境的發展情況下，世界碳排放水準將與長期均溫上升

超過3.5°C的情況相符。若是沒有這些新政策，也就是現行政策情境的發展趨勢，我們將會面臨更危險的情況，溫度將會升高6°C或是更多。

全球電力供應趨勢

全球發電量預計在新政策情境之推估期間年均成長率為2.3%，亦即自2009年的20000 TWh逐步成長，至2035年突破36000 TWh（TWh=10億度）（表1）；現行政策情境推估此期間年均成長率為2.6%、450情境則為1.8%。由於電廠廠內用比例下降以及減少輸配電造成的損失，供應成長速度略慢於需求。

在**新政策情境**中，燃煤發電仍是推估期間全球電力生產最主要的來源，於2009年至2035年間，燃煤發電成長48%；但其佔比卻從41%下降至33%（見圖1）。燃油發電佔比亦有下降，從2009年的5%下降至2035年的1.5%。再生能源發電量成長顯著，彌補了燃煤及燃油發電的下降。非水力再生能源生產之發電量將自2009年的3%上升至2035年的15%，其中近九成來自風力、生質能及太陽光電。燃氣、水力及核能均維持為相對穩定的電力供應來源，分別佔22%、16%及13%。

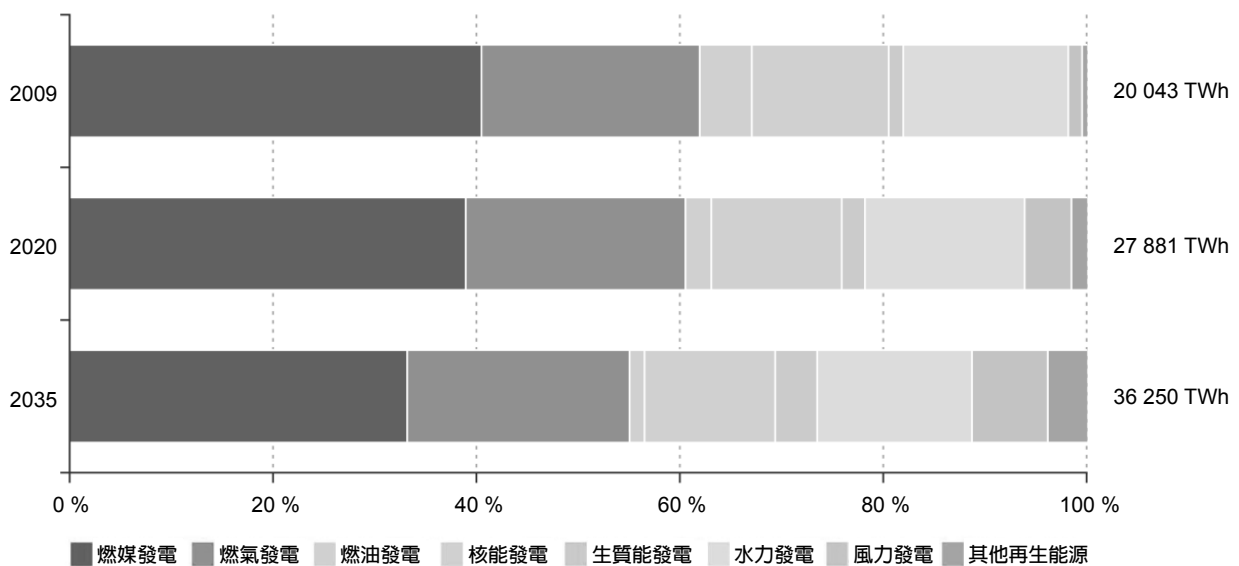
450情境中，為加強能源安全、減少溫室效應氣體排放，非水力再生能源在相關政策保護下，於2035年提升到總發電量的28%。

表1：發電量（依燃料／情境別）（單位：TWh=10億度）

	1990	2009	新政策情境		現行政策情境		450情境	
			2020	2035	2020	2035	2020	2035
OECD國家	7 629	10 394	11 997	13 304	12 143	13 939	11 743	12 541
化石燃料	4 561	6 306	6 649	6 165	6 993	7 713	6 133	3 285
核能發電	1 729	2 242	2 445	2 779	2 389	2 472	2 495	3 463
水力發電	1 182	1 321	1 476	1 592	1 461	1 547	1 505	1 683
非水力再生能源	157	525	1 427	2 768	1 300	2 208	1 610	4 110
非OECD國家	4 190	9 649	15 884	22 946	16 426	25 429	15 092	19 683
化石燃料	2 929	7 139	10 944	14 327	11 764	18 463	9 702	7 481
核能發電	283	454	1 130	1 879	1 105	1 582	1 246	2 932
水力發電	962	1 931	2 904	3 926	2 793	3 597	3 042	4 369
非水力再生能源	15	125	905	2 814	764	1 787	1 102	4 900
全球	11 819	20 043	27 881	36 250	28 569	39 368	26 835	32 224
化石燃料	7 490	13 445	17 593	20 492	18 757	26 176	15 835	10 765
核能發電	2 013	2 697	3 576	4 658	3 495	4 053	3 741	6 396
水力發電	2 144	3 252	4 380	5 518	4 254	5 144	4 547	6 052
非水力再生能源	173	650	2 332	5 582	2 063	3 995	2 712	9 011

數據來源：World Energy Outlook 2011, OECD/IEA

圖1：新政策情境下各種燃料的發電佔比



數據來源：World Energy Outlook 2011, OECD/IEA

表2：三大情境下，相較於2009年，全球核能發電量增長率

(年)	新政策情境		現行政策情境		450情境	
	2020	2035	2020	2035	2020	2035
OECD國家	9%	24%	7%	10%	11%	54%
非OECD國家	149%	314%	143%	248%	174%	546%
全球	32%	72%	30%	50%	39%	137%

附註：根據表1.計算，數據來源：World Energy Outlook 2011, OECD/IEA

雖然在新政策情境中，核能發電的佔比相對穩定，但是就絕對數量而言，仍然有非常顯著的成長，尤其是在非OECD國家，呈現倍數的成長（見表2）。2035年相較於2009年，全球核能的增長率達72%，而在氣候政策更為嚴格的450情境中，其成長率更是倍增，高達137%。事實上，越嚴格的氣候政策，全球低碳電力的增長率就會越大，無論是再生能源、核能、或是佈署CCS的火力電廠。

當前核能發電的角色

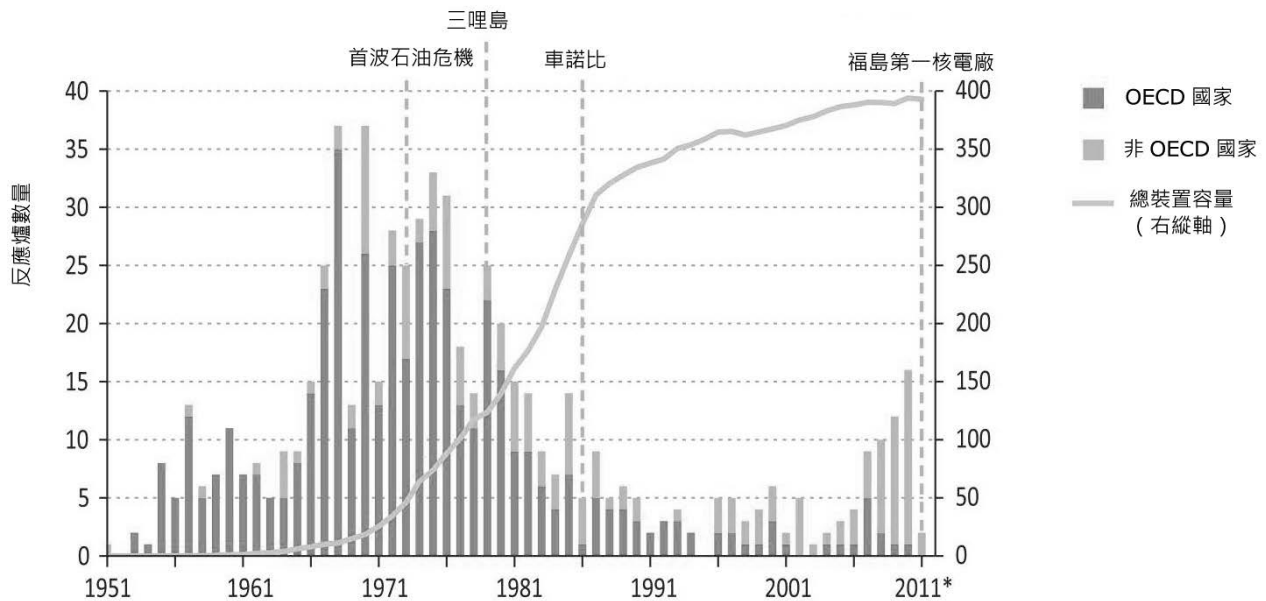
將近60年歷史的核能發電，始於1954年，一座位於莫斯科附近，由政府資助的奧布寧斯克（Obninsk）核能電廠（圖2）。該核電廠的啟用，象徵全球核能產業的萌芽。從1954年到1965年期間，每年全球平均有7座新核電機組完工，進入1960年代中期更如雨後春筍。這波趨勢在1968年和1970年到達巔峰，共計37座核電機組動工。之後發生1973與1974年的石油危機，各國皆設法降低對石油的依賴，進而加速核能發電的成長。然而成本上揚及工程延誤，再加上1979年美國三哩島的意外事件，使核能產業在70年代中期陷入低潮。三哩島事件激起民眾的反核聲浪，使得立法程序窒礙難行，許多計畫因此被迫取消或暫停。1986年在烏克蘭爆發空前的核能事件——車

諾比核電廠意外，使核能發電的前景蒙上陰影，一些國家因此對現有或新的核電廠設下限制。

除了日本和韓國以外，1990年代民眾接受度、安全性、工程延宕、部分工程預算低估、以及重返低價化石燃料的趨勢等各種原因，使得核能產業只有微幅的成長。然而自2000年中期開始，全球核電產業出現逆轉。除了中國快速崛起為主要原因之外，功率提升（power uprates，增加機組發電量），以及OECD國家核電廠延役（延長現有核電廠的運轉壽命），也助長了核電成長趨勢。2010年，全球共有16座新核電機組動工，是繼80年代以來最龐大的數量。除了一座核電機組外，其餘皆位於非OECD國家。新興國家為了滿足用電量飆升，並達到能源和環境政策的目標，諸如減緩溫室氣體排放，以及提供安全、多元、平價的電力，核電廠因此再度成為國際間的寵兒。

在2010年，核電供電量的全球佔比為13%，低於1996年巔峰期間的18%。在2011年年初，全球31個國家共有441座核電機組在運轉，總裝置容量（installed gross capacity）共計393 GW（GW = 10億瓦），扣除廠內用電，淨發電能力為374GW。這其中有80%都在OECD國家。另有17個國家亦有意興建首座核電廠。現階段核電廠的興建工程，幾乎全數集中在非OECD國家。全球67座新建核電機組中，55座皆位於非OECD國家境內（表3）。2010年動工的核電機組有63%位在

圖2：核電機組興建工程（1951年至2011年）



*截至 2011 年 8 月 31 日止

數據來源：World Energy Outlook 2011, OECD/IEA

表3：各國核電關鍵數字（截至2010年底）

	運轉中的機組	總裝置容量 (GW)	機組平均年齡	佔總發電比例	興建中的機組
OECD國家	343	326	27	21%	12
美國	104	106	31	19%	1
法國	58	66	25	75%	1
日本	54	49	25	27%	2
德國	17	21	28	23%	0
韓國	21	19	17	31%	5
加拿大	18	13	26	15%	0
英國	19	11	29	16%	0
其他	52	40	28	24%	3
非OECD國家	98	68	21	4%	55
俄羅斯	32	24	28	15%	11
烏克蘭	15	14	22	48%	2
中國	13	11	8	2%	28
印度	19	5	17	3%	6
其他	19	14	24	9%	8
全球	441	393*	26	13%	67

*總裝置容量393GW (GW=10億瓦) 等於淨發電能力374GW。

資料來源：國際原子能機構 (IAEA)；國際能源總署 (IEA) 資料庫

中國境內，13%位於俄羅斯。截至2010年年底，全球運轉中的核電機組，平均廠齡為26年。隨著興建核電機組的趨勢減緩，加上現有核電機組的壽命延長，未來核電機組的平均廠齡將會持續增加。

福島第一核電廠是否如美國三哩島和俄國車諾比事件，將重創核能產業？

談到福島核電廠意外的長期影響，就需要對照1979年的三哩島事件及1986年的車諾比事件。前二者對核能發展造成深遠的衝擊，對後續數十年全球各地的核電廠興建計畫產生深遠的影響。事發之前的1970年代，每年平均有26座新機組動工。事發之後的1980與1990年代卻僅剩7座。福島核子事故是否也將導致核能式微？

三哩島和車諾比事件只是核電發展走下坡的原因之一。1980與1990年代的低能源價格，降低興建核能發電廠的投資誘因。反之，首波石油危機，助長了1970年代的核電廠興建熱潮。再者，許多OECD國家的能源市場自由化，也將投資能源部門的融資風險，從公部門移轉到民間產業。根據當時市場條件，以及缺乏政府支援的情況下，雖然燃煤、燃氣電廠的單位發電成本較高，仍屬電力公司較低風險的選擇，原因在於前置成本低，施工期程短，成本回收也快。

如今核電開發的成長動力與參與者已大不相同。中國與印度領導的新興經濟體，正主導未來的核電發展趨勢。這些國家將動用所有可能的方案，盡其所能滿足國內快速成長的用電需求，而這些國家尚無放棄核能發電的意願。如今高能源價格時代再度來臨，伴隨中東與北非地區的政局動盪，各國可能改用不需要長期大量進口燃料的能源方案。氣候變遷也是核電成長的動力，畢竟核電屬於少數成熟的、大規模的低碳發電技術。

除此之外，還要考量過去三十年間所實施嚴格的核安規範可以大規模的運用。福島核子事故之後的安全規範，將對核能經濟效益有何影響，仍有待進一步觀察。

回顧過去，三十年內發生三起重大核子事故事件。而且福島事件，發生在最先進的核能國家之一。縱然罪魁禍首，是異常強大的地震及海嘯，加上當地多地震海嘯的地理特性，即便如此，社會對核電產業的信心，仍然需要數年的時間重建。

福島事故對各國政策的影響

雖然福島核子事故的長期影響不明，但隨著各國政府著手評估核電用途，核電產業也面臨關鍵的時刻（表4）。核能的相關風險引起大眾矚目，福島核子事故過後，數週之內便有許多國家相繼宣布，進行核電廠安全總檢。部分國家決定放棄使用核能發電。另一部份的國家，原本計畫興建國內首座核電廠，或準備恢復遭擱置核電計畫的國家，則宣布計畫取消或延期。不過使用核能的國家，多數仍主張核能對於國內供電的重要性，並計劃維持或大幅度增加核電佔比，以供應日益增加的基載（baseload）用電需求，或降低對於化石燃料進口與使用的依賴。

福島事件後，雖然各國幾乎全部對其境內的核能電廠，進行安全檢查，同時對於興建中或規劃中的核電廠重新檢驗，因此在2011年興建的核電廠大幅減少（圖2），不過到今（2012）年年底為止，真正完全翻轉核能政策的國家並不多（參見表5），多數使用核能的國家，總計31國之中的25國，仍然傾向於繼續發展核電。而且更多尚未擁有核能電廠的國家，仍然依照原先計畫新建其首座核能電廠，總計共有16個國家。

表4：各國對核能發電的表態

	裝置容量 (GW)	2011年中期
歐盟	127	宣布計畫對區域內27個國家共143座核電機組，進行全面「壓力測試」
美國	106	強調秉持安全至上的原則，持續支持核能發電
法國	66	持續支持核電，但將同步執行歐盟的壓力測試，並提高再生能源的發電佔比
日本*	46	宣布重新檢視現有的核電計畫：福島事故前，原先預定在2030年前將核電佔比增加到總供電量的53%。目前政策方向不明。 ***此表統計至2011年底，在2012年12月，日本首相安倍晉三已經正式宣佈重啟核電，因此，日本應該重新歸類為「政策不變，持續發展核能」。
俄國	24	申明將於2020年前，將核電佔比提高一倍；進行全面安全檢查
韓國	19	持續擴大核能產業，並實施安全檢查
德國**	13	立即關閉所有1980年前啟用的核電機組，並宣布於2022年前關閉其餘的核電機組，此舉翻轉原本於2010年決定延後執行2001年通過的除役計畫（也就是同意延役）
中國	12	暫緩新的核電興建計畫，但堅持依照十二五規劃，於2011年至2015年間，增建40GW的核電裝置容量，至2035年的裝置容量達128GW
英國	11	開發核電的承諾不變，並宣布於2025年前增加8座新的核電廠
印度	5	於2032年前，將核電裝置容量提升到63GW，並檢查核電廠的安全性
捷克	4	將於現有的Temelin核電廠內，增設兩部新機組
瑞士	3	宣布將於2034年以前，關閉現有的5部核電機組機組
土耳其	0	表示將依計畫，於2018年前興建四部裝置容量達1.2GW的機組
義大利	0	於2011年六月舉行公投，決定不再使用核電
波蘭	0	表示第一座核電廠將於2020年如期商轉
印尼、泰國	0	暫緩並考慮將首批核電計畫延至2020年後執行
沙烏地阿拉伯、阿拉伯 聯合大公國、越南等	0	皆表示照計畫興建國內首座核電廠

*福島第一核電廠1至4號機將永久關閉

**2011年上半年關閉的核電廠裝置容量達9GW

資料來源：World Energy Outlook 2011, OECD/IEA

周邊國家的核能發展趨勢

儘管福島事故對於全球的核能發展趨勢，帶來一些不確定性，但是在亞洲，推估核能仍然會維持快速的成長，主要原因是：核能是少數技術

成熟、發電穩定、價格低廉以及燃料供應安全的低碳發電技術。

除了關心全球的發展趨勢，探討我們周邊國家的核能前景，尤其最鄰近的日本、韓國、中國以及越南，對於思考我國的能源政策，更有參考價值。

表5：福島事故後，全球各國對發展核能的態度

已經擁有核能電廠的國家，共31個國家 ¹		
政策不變，持續發展核能	美國、加拿大、法國、英國、俄羅斯、捷克、韓國、中國、印度……等25國	
核電政策方向不明或保留彈性	日本 ² 、台灣、瑞典	
政策轉向，放棄發展核電的國家	德國、瑞士、比利時	
計畫興建首座核能電廠的國家		
政策不變，依計畫興建首座核能電廠	沙烏地阿拉伯、阿拉伯聯合大公國、越南、土耳其、波蘭……	共16國
政策不變，但延後興建首座核能電廠計畫	印尼、泰國	
政策轉向，放棄興建首座核能電廠計畫	義大利 ³	

附註1：25個繼續使用核能的國家：目前使用核能的國家共有31個（參見表6所列31個擁有核能的國家），扣除政府公開宣示「減核」、「廢核」、「不興建新的核能電廠」和態度不明的日本，共有日本、台灣、比利時、瑞典、德國、瑞士等六個國家，則有25個國家並沒有類似的宣示，因此列為「政策沒有明顯的轉變」或「政策有沒有轉變」。事實上，這六個國家也都還繼續使用核能，唯一不同的是「政府公開宣示的政策態度」，其中只有德國、瑞士、比利時宣示了「核電廠關閉的具體時間表」。

附註2：上表統計至2011年底，在2012年12月，日本首相安倍晉三已經正式宣佈重啟核電，因此，日本應該重新歸類為「政策不變，持續發展核能」，也就是說截至2013年2月，已經擁有核電的31國中，持續發展核能的國家目前達到26個。

附註3：福島事件前，全球共有17個國家宣布打算興建其首座核能電廠，福島事件後，只有義大利宣布中止興建計畫，其餘16個國家並未改變其政策，但是有兩個國家宣布計畫延後。

數據來源：OECD/IEA, World Energy Outlook 2011（有關核能關鍵數字，各國在福島事件後的宣示）

福島事故之後，日本高漲的反核民意，向政府提出廢止核能電廠的要求，雖然其前首相菅直人宣稱要減少對核能的依賴，卻受到包括財經大臣等重要閣員的杯葛。新任首相野田在核電政策中，將回歸務實，與支持核電的經濟界妥協，將降低對核電的依賴列為長遠政策方向，但短期內核電仍是滿足日本電力需求無可或缺的存在。而安倍新內閣於2012/12/26組成，隨即召開第一次內閣會議，內閣會議後的記者會中，新上任經濟產業大臣茂木敏充提出將調整前任民主黨政府所制定能源政策的看法。以下是茂木敏充談話的內容：

- 「前政權所宣布2030年代達成非核家園的能源方針，有再檢討的必要」。
- 「現在談論再生能源佔幾%，化石燃料佔幾%，是一件笨拙的行為」。也就是新政府會提出包含核能發電在內最佳組合的能源政策。
- 「安全性確認無虞的核能電廠，會尊重原子力規制委員會的判斷，決定是否可再啟動的責任仍在政府」。也就是這個明確由政府負責的態度，與之前民主黨政府一直迴避不願面對的態度，是截然不同的。
- 「對於民主黨政府所制定，不再新設或增

表6：31個擁有核能電廠的國家

國家	裝置容量(GW)	佔總發電比例	國家	裝置容量(GW)	佔總發電比例
 阿根廷	935	7.0%	 荷蘭	485	3.7%
 亞美尼亞	376	45.0%	 巴基斯坦	400	2.7%
 比利時	5,943	51.7%	 羅馬尼亞	1,310	20.6%
 巴西	1,901	3.0%	 俄羅斯	23,084	17.8%
 保加利亞	1,906	35.9%	 斯洛伐克	1,760	53.5%
 加拿大	12,679	14.8%	 斯洛維尼亞和克羅埃西亞	696	37.9% + 8.0%
 中國大陸	12,570	1.9%	 南非	1,800	4.8%
 捷克	3,686	33.8%	 西班牙	7448	17.5%
 芬蘭	2,721	32.9%	 瑞典	9,399	37.4%
 法國	63,236	75.2%	 瑞士	3,252	39.5%
 德國	20,339	26.1%	 臺灣	4,927	20.7%
 匈牙利	1,880	43.0%	 烏克蘭	13,168	48.6%
 印度	4,780	2.2%	 英國	10,962	17.9%
 日本	47,348	28.9%	 美國	101,229	20.2%
 南韓	17,716	34.8%	 荷蘭	485	3.7%
 墨西哥	1,310	4.8%			

數據來源：Michael Dittmar，Taking stock of nuclear renaissance that never was Sydney Morning Herald，2010/08/18。

設核能機組能源政策，新政府會根據專家的意見，做出政治判斷」。也就說未來有可能再新設或增設核能機組。

這些事件的發展說明了即使富有如日本的國家，並且親身遭受福島災變，現階段也無法放棄核能，背後的原因有必要讓民眾了解。

韓國政府在完成核能電廠的安全檢查之後，今年再一次宣示，韓國的核能電廠安全無虞，能源政策不變。依其國家能源基礎規劃（National Basic Energy Plan, 2008-2030），預計韓國的核能發電佔比，在2030年，將達到60%。換句話說，到2030年，韓國核能發電量的佔比將有可

能超越日本——目前無論發電量和裝置容量都是亞洲第一的國家，而成為核能發電量佔比最高的亞洲國家。此外，若與現在全球核能發電佔比最高的法國相比，到2030年，韓國亦不遑多讓。

中國的核能發展計畫，也因為福島事故而短暫放緩腳步，但隨即宣示依其國家政策——十二五規劃，積極發展核電。中國將主導未來全球的核電發展，已經規劃的核電裝置容量，從2009年的12GW，在2035年，增加到128GW，成長超過十倍。屆時，中國不但是亞洲第一大核電國，並且有可能取代美國成為全球第一大。

越南，另外一個最靠近我們的國家，繼中國、韓國之後，也宣示積極發展核電的能源政策，「至2020年原子能和平用途發展策略」（Strategy on Peaceful Utilization of Atomic Energy up to 2020），已經選定10個潛在的廠址，並且已經開始整地，預計兩年後動土興建，第一部核能機組預計2020商轉，並且每年增加一部1GW的核能機組，到2030年達到10GW，成為東南亞最重要的核電國家。

總結來說，距離我們最近的國家：菲律賓、日本、韓國、中國、越南，除了菲律賓沒有足夠的資金與技術能力，加上政治不穩定等因素，並沒有核能發展計畫。其他四國，日本是目前，無論是核電裝置容量或發電量，亞洲第一大國。韓國的核能政策規劃，到2030年，將成為核能發電佔比最高的亞洲國家，屆時韓國的核電佔比，甚至可能超過法國——目前全球核電佔比最高的國家。而越南，一個目前還沒有核能電廠的國家，其政策規劃目標是，在2030年成為東南亞最重要的核電國家。中國將主導未來全球的核電發展，在2035年，不但是亞洲第一大核電國，並且有可能取代美國成為全球第一大。

慎重考慮核電的深遠影響

福島第一核電廠事故已經引起全球對於未來核電角色的疑問，但這並未改變中國、印度、俄羅斯和韓國等國的政策，這些國家的政策正在推動核電的擴張。在新政策情境中，在2035年之前，核電增加的電力產出會超過70%，只比去年（WEO-2010，福島事故之前）的推估值略微減少。

倘若未來核能的成長大幅低於預期，雖然可能為再生能源創造更多的機會（而非確定，如果

政府的財務因而惡化，反而會減少對再生能源的補貼），但一定會提高對化石燃料的需求：全球煤炭需求將會增加，增加量等於目前世界第一大煤炭出口國——澳洲燃料煤出口的一半；天然氣需求也會增加，增加量相當於世界第一大天然氣出口國-俄羅斯當前天然氣出口的三分之二。最終結果將對能源價格造成額外的上漲壓力，並引起能源安全的額外負面效應，使得面對氣候變遷的挑戰，更加艱難和更加昂貴。

對國內資源有限，尤其原先規劃高度發展核電的國家，將會產生嚴重的後果。新興經濟體，大多數在亞洲，由於迫切需要滿足增長快速的電力需求，其挑戰難度將會更高。這就不難理解，為什麼我們周邊的國家，仍然繼續積極發展核電的原因。

參考資料：

- 1.OECD/IEA, World Energy Outlook 2011, 2011/12.
- 2.Strategy on Peaceful Utilization of Atomic Energy up to 2020, government announcement of Viet Nam.
- 3.National Basic Energy Plan, 2008-2030, government announcement of Korea.
- 4.十二五規劃，中華人民共和國政府公布文件。
- 5.Michael Dittmar, Taking stock of nuclear renaissance that never was, Sydney Morning Herald, 2010/08/18。
- 6.自由時報（2012/12/31），日重新擁核？安倍擬建新核電廠。

（本文作者為行政院原子能委員會核能研究所研究員兼諮議委員）