



2016 年全球核能產業現況

—2015 年全球核能發電量成長 1.3%，主要是中國大陸新增核能發電的貢獻

蕭國鑫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

截至 2016 年 7 月 1 日為止，全球共有 31 個國家，計 402 部核子反應爐營運中，總裝置容量 348GW。其中 2015 年核電總發電量 2.44 兆度，占全球總發電量 10.7%，約等於全球初級能源消費之 4.4%；而 2015 年全球的核能發電量成長 310 億度(+1.3%)，主要是中國大陸核能發電量增加的貢獻。

2015 年到 2016 年上半年，全球共有 15 部新核子反應爐開始商業化運轉，包括中國大陸 11 部，俄羅斯及美國各 1 部、韓國 2 部。到 2016 年中期，全球正在興建中的核能機組數量共 58 部(總裝置容量 56.6GW)，包含中國大陸 21 部、俄羅斯 7 部、印度 6 部，合計三個國家興建的反應爐數量占全球的 60%。

1960 年到 2016 年期間，全球共有 164 部核子反應爐被關閉，平均運轉年限約 25 年；其中 56 部運轉超過 30 年，22 部超過 40 年。而 2015 年有 8 部核能機組提早關閉運轉，包括位於臺灣的核一廠 1 號機，因為燃料把手斷裂維修後，就沒有再被允許運轉。

目前正在興建核子反應爐的 14 個國家中，有 9 個國家共 38 部反應爐的興建進度落後，其中 6 部已興建超過 10 多年。另在 1977 年至 2016 年間，總計有 17 個國家、共 92 部核子反應爐興建計畫被放棄或中止。而潛在新加入核能建設國家，在 2015 年的核能建設進度均落後；而智利及立陶宛國家甚至已暫停核能建設，印尼也放棄了核能推展的相關計畫。

到 2016 年中期，全球商轉的核子反應爐平均運轉年約 29 年。其中 215 部的反應爐營運已經超過 30 年，59 部已經超過 40 年(美國占 37 部)。另到 2016 年中為止，美國已有 81 部反應爐被允許可延長到 60 年的運轉週期。法國也允許部分反應爐延役 10 年，但到 2025 年反應爐的總數量需減少到目前的 3/4 到 1/2 目標。比利時亦有 3 部反應爐被批允延役 10 年，但前提是到 2025 年所有的反應爐需全面除役。

2015 年全球再生能源的裝機容量增加 147GW (風電 63GW、太陽光電 50GW、其他 34GW)，占全球淨增加裝置容量 60% 以上；而核電合計併網裝置容量僅增加 6.5GW。發電量方面，太陽光電與風電分別增加 630 億度與 1,250 億度，成長超過 33% 及 17%，而核電發電量僅增加 310 億度(+1.3%)，且完全是中國大陸的貢獻。

2015 年全球再生能源投資金額 2,859 億美元，而中國大陸就投資 1,029 億美元(占當年總投資金額 36%)，印度、英國、美國、墨西哥及智利等國亦顯著推動再生能源的投資；但是 2015 年全球新的核電廠投資金額尚不及再生能源投資總額的 1/10。未來因為老舊的核電廠需要提高其安全等級而增加營運成本，加以近期化石能源價格處於相對低檔，核能電力的批發價格已下滑到接近或低於發電成本，使得核能產業的信用評等遭到降等，導致銀行的融資金額遭到限制或拒絕。對於新建的核能電廠，由於整體營運的成本提升，加上興建時期冗長，營運期間具有難以預測的風險性，以及信貸及融資方面困難性增加，導致民間企業的投資意願大為降低；除非是政府政策的大力支持與投資，否則未來的核能產業可能會呈現萎縮狀況。

關鍵字：核能、再生能源、延役、裝置容量



一、前言

核能產業的安全性一直是被討論的議題，特別是日本福島事件後，各國均非常重視核能發電的安全性。在提高整體營運的安全係數後，相關核能發電之核電廠建設、營運與維護成本均相對增加，且興建時期冗長，更增加其營運成本及風險性；因此，許多核電公司的信用評等遭到降級；除非是政府政策的大力支持，否則在信貸及融資方面將更顯困難。

2015 年是近 25 年來核能工業發展最順遂的一年，共有 10 部新的機組加入運轉。雖然較 2014 年新增加運轉反應爐的裝置容量約 11GW，核能發電量增加 310 億度[1]；但由於核電廠的興建成本高與建設時間長，加上安全性考量，所以目前興建中的核電廠約有 2/3 的數量進度落後，甚至部分新加入興建核電廠的國家亦延緩推行或放棄。而再生能源的發展成本逐漸降低，建設快且門檻低；且如新的風電和太陽光電，未來可能提供比新核能發電成本更便宜的電價，特別是先進工業國家近幾年致力於再生能源的發展，對於再生能源的投資金額遠遠超過對核電的投資；促使再生能源蓬勃發展，而核能產業就相形失色。例如 2015 年再生能源新增加運轉的裝置容量超過核能的 13 倍；電力生產方面，再生能源的發電量較 2014 年增加 2,500 億度（風電與太陽能發電量各增加 630 億度及 1,250 億度，遠高於核能發電量增加之 310 億度）。因此，未來新開發國家因為經濟發展需求，除了致力於新的核能廠興建計畫，特別是中國大陸的大量擴展，以及俄羅斯及印度對興建核能廠的投資外，也會積極的發展再生能源。

車諾比爾(Chernobyl)及福島(Fukushima)核子事故為史上兩次最嚴重的核能工安事故。在車諾比爾事故滿 30 年後，仍有約數百萬人繼續住在輻射污染地區，預計未來 50 年仍將會有約 4 萬個致命癌症情況[1]。而福島核災已滿 5 年，目前仍有約 10 萬人未能回到原本的家園中；其未來的核能廠內的清污工作，高度污染水流入地下，以及

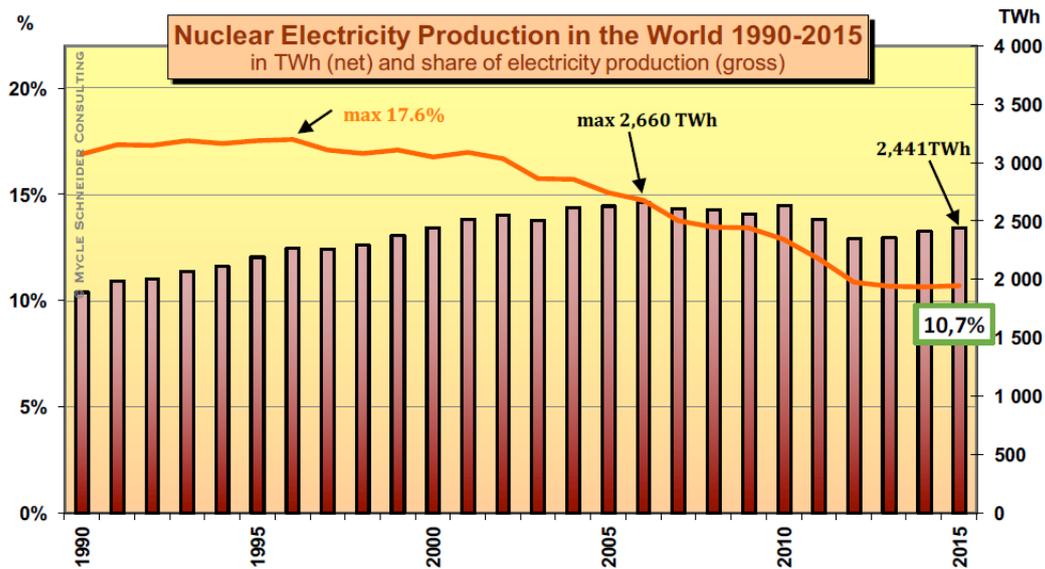
民眾的健康追蹤等，相關之淨化廢棄物管理、健康後果評估和所涉及的費用，才是更需要關注的議題。

二、全球核能發展近況

過去二十年全球核能發電占全球總發電比例，除了 1999 年、2001 年及 2015 年(+0.05%)稍有增加外，發電占比幾乎都在下降中，並從 1996 年高峰期的 17.6% 下降到 2015 年的 10.7% (圖 1)。其中 2015 年全球的核能發電量成長了 1.3%，主要是中國大陸增加了 31% 貢獻的結果。

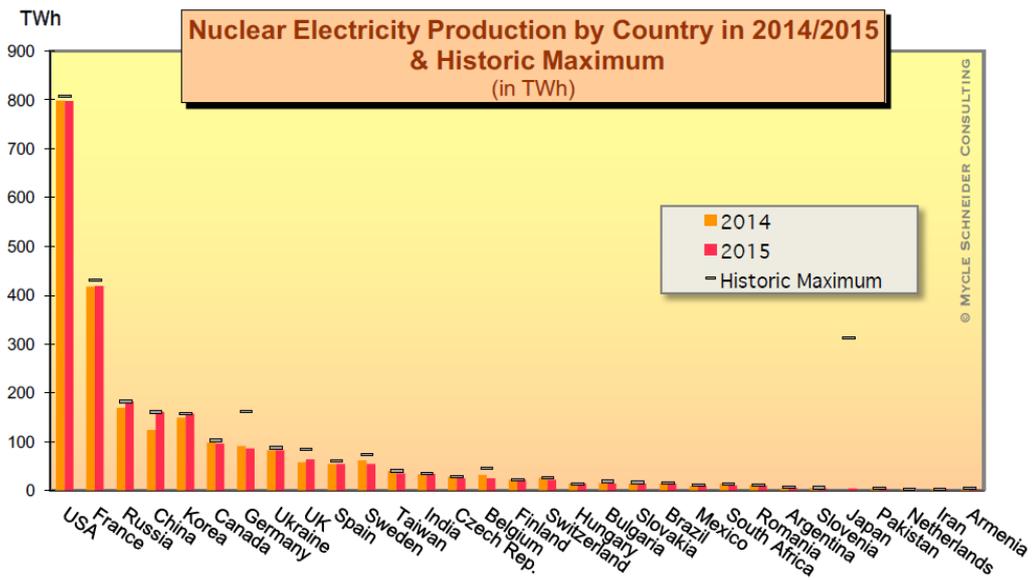
(一)全球核能發電狀況

2015 年全球前 5 大核能發電國家，依序為美國、法國、俄羅斯、中國大陸與韓國，約占全球核能總發電量 70%；其中的美國和法國就占了全球核能發電量的一半。在全球 31 個國家使用核能發電中，11 個國家的核能發電量較 2014 年些微上升，15 個國家下降，另有 5 個國家約略持平。而中國大陸、匈牙利、印度、俄羅斯與韓國等 5 國在 2015 年有最多的核能發電量，並以中國大陸、俄羅斯及韓國的併網發電增加量最為明顯(圖 2)。因為中國大陸在 2015 年增加了 8 部核子反應爐商業化運轉(核能歷史上為美國在 1976 年、1985 年及 1987 年、法國在 1981 年有此紀錄)。另外，2015 年阿根廷因為 2014 年增加了第三部核子反應爐營運，墨西哥的第二部反應爐重新上線運轉，所以這兩個國家在 2015 年的核能發電量增加 20% 以上；但是比利時與南非則因反應爐的壓力容器問題，核能發電降低量超過 20%(圖 3)。



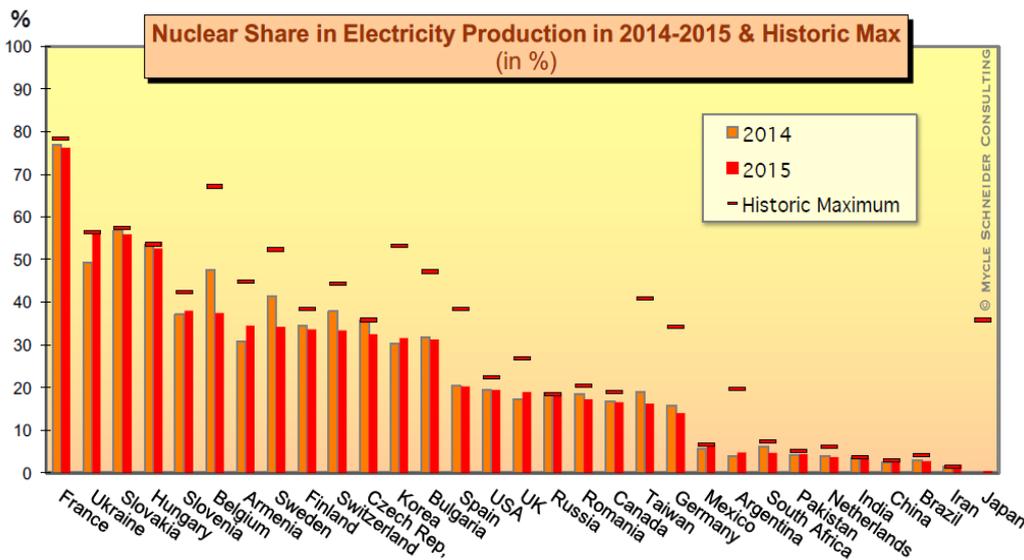
Sources: IAEA-PRIS, BP, MSC, 2016

圖1、1990年-2015年全球核能發電量與占比



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖2、2014年、2015年全球各核能發電國家年發電量及歷史最大發電量示意圖



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

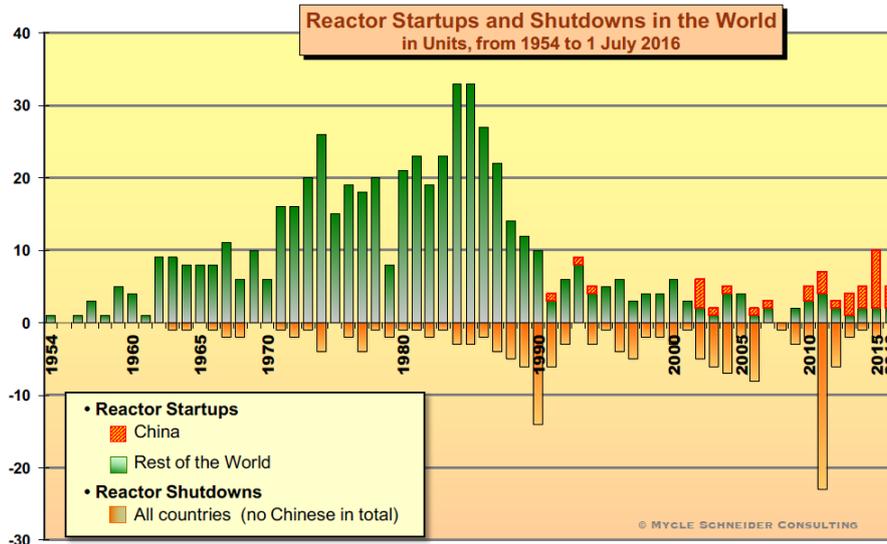
圖 3、2014 年、2015 年全球各核能發電國家年發電量及歷史最大發電量占比

(二)2015 年全球核能啟轉與關閉

2015 年全球共有 10 部核子反應爐開始商業化運轉(1990 年以來最多的一年)，中國大陸占了 8 部(稱為中國效應)，如圖 4，且都是福島事件前就已開始興建的反應爐；另外兩部為俄羅斯的 Beloyarsk-4 號(興建 31 年)及韓國 Shin-Wolsong-2 號反應爐(興建 6.5 年)。同年亦有 2 部反應爐關閉，分別為德國的 Grafenrheinfeld 及英國的 Wylfa-1 反應爐。而比利時的 Doel-1 反應爐因為許可證到期，在 2015 年 2 月關閉，但該國議會 6 月表決通過延役 10 年的申請，並於同年 12 月重新啟動該反應爐。另外，國際原子能總署(IAEA)的線上核子反應爐資訊系統(PRIS)資料庫中，顯示日本有 5 部反應爐關閉，依據 2016 世界核能產業現況報告(World Nuclear Industry Status Report, WNISR)，認為這 5 部反應爐並沒有併網連線，且非來自產業、政治或經濟的決定關閉，而是已經停機多年，其中兩部自 2010 年已關閉，另外三部在日本 311 核子事件後就關閉不再發電。

2016 年上半年全球有 5 部反應爐開始運轉(圖 4)，包括中國大陸

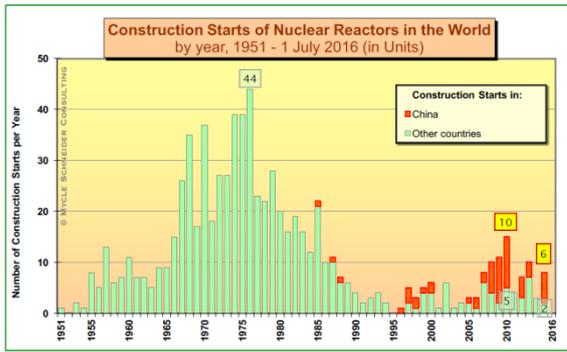
3 部、韓國和美國各 1 部反應爐，但同期並沒有被關閉的反應爐。另外，日本在 2016 年 3 月宣布伊方-1 反應爐(PWR，566MWe)，自 2011 年以來已沒有產生任何電力，將於 2017 年 9 月除役(開始運轉後滿 40 年)。



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

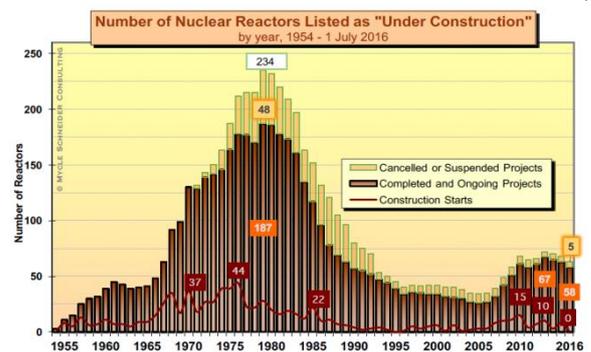
圖 4、1954 年-2016 上半年全球的核子反應爐開始運轉與關閉數目

2015 年全球開工建設的核子反應爐共有 8 部(中國大陸 6 部，巴基斯坦和阿拉伯聯合大公國各 1 部)，低於 2010 年全球開工數 15 部(當年中國大陸占 10 部)(圖 5)。2016 年上半年全球並沒有開工建設的反應爐。目前全球正在興建機組數量，已從 2013 年底的 67 部下降到 2016 年年中的 58 部(圖 6)。



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖 5、1951 年-2016 上半年全球開始興建反應爐數量



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖 6、1954 年-2016 上半年全球興建中的反應爐與放棄數量

截至 2016 年 7 月 1 日為止，全球共有 31 個國家，計 402 部核子反應爐營運中(不包括長期停機)。相較於 2015 年同期增加了 1 個國家(日本重新啟動 2 部反應爐)，運轉的反應爐也比 2015 年中多出 11 部。總裝置容量增加約 3.3%，達到 348GW(表 1)，相當於 2000 年的裝置容量(2006 年達到頂峰 368 GW)(圖 7)。



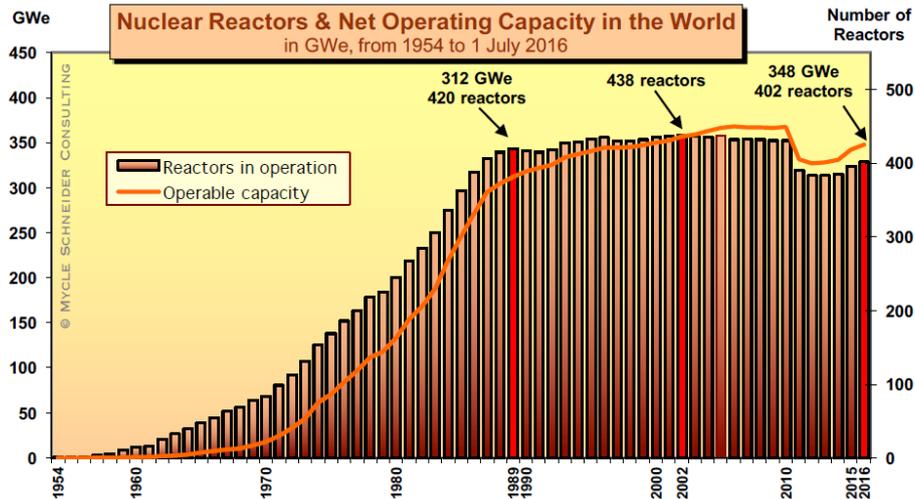
表 1、全球核能分布狀況 (1 July 2016)

| 國家 | Nuclear Reactors | | | | Power | Energy |
|-----------|---------------------|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| | Operates (Reactors) | Capacity (MWe) | Average Age (Years) | Under Construction (Reactors) | Share of Electricity | Share of Commercial Primary Energy |
| 阿根廷 | 3 | 1,632 | 25.8 | 1 | 5% (=) | 2% (=) |
| 亞美尼亞 | 1 | 375 | 36.5 | | 34.5% | (+) ? |
| 白俄羅斯 | | | | 2 | | |
| 比利時 | 7 | 5,913 | 36.3 | | 37.5% (-) | 10.5% (-) |
| 巴西 | 2 | 1,884 | 25.1 | 1 | 3% (=) | 1% (=) |
| 保加利亞 | 2 | 1,926 | 26.8 | | 31% (-) | 18.5% (-) |
| 加拿大 | 19 | 13,524 | 33.0 | | 16.5% (=) | 7% (=) |
| 中國大陸 | 34 | 29,402 | 6.6 | 21 | 3% (=) | 1.5% (=) |
| 捷克共和國 | 6 | 3,930 | 25.0 | | 32.5% (-) | 15.5% (-) |
| 芬蘭 | 4 | 2,752 | 37.3 | 1 | 33.5% (=) | 20.5% (=) |
| 法國 | 58 | 63,130 | 31.4 | 1 | 76.5% (=) | 41.5% (=) |
| 德國 | 8 | 10,799 | 30.1 | | 14% (-) | 6.5% (=) |
| 匈牙利 | 4 | 1,889 | 31.0 | | 52.5% (=) | 17.5% (=) |
| 印度 | 20 | 5,215 | 20.3 | 6 | 3.5% (=) | 1.2% (=) |
| 伊朗 | 1 | 915 | 4.8 | | 1.3% (=) | <1% (=) |
| 日本 | 3 | 2,522 | 32.0 | 2 | 0.5% | <1% |
| 韓國 | 25 | 23,073 | 19.4 | 3 | 31.5% (+) | 13.5% (=) |
| 墨西哥 | 2 | 1,440 | 24.4 | | 7% (+) | 1.5% (=) |
| 荷蘭 | 1 | 482 | 43.0 | | 3.5% (=) | 1% (=) |
| 巴基斯坦 | 3 | 690 | 22.0 | 3 | 4.5% (=) | 1.5% (=) |
| 羅馬尼亞 | 2 | 1,300 | 14.5 | | 17.5% (-) | 8% (=) |
| 俄羅斯 | 35 | 25,443 | 30.7 | 7 | 18.5% (=) | 6.5% (=) |
| 斯洛伐克 | 4 | 1,816 | 24.3 | 2 | 56% (=) | 21.5% (-) |
| 斯洛文尼亞 | 1 | 688 | 34.7 | | 38% (=) | ? |
| 南非 | 2 | 1,860 | 31.6 | | 4.5% (-) | 2% (=) |
| 西班牙 | 7 | 7,121 | 31.4 | | 20.5% (=) | 9.5% (=) |
| 瑞典 | 8 | 8,205 | 36.3 | | 34.5% (-) | 24.5% (-) |
| 瑞士 | 5 | 3,333 | 41.2 | | 33.5% (-) | 19% (-) |
| 臺灣 | 5 | 4,428 | 34.0 | | 16.5% (-) | 7.5% (-) |
| 阿拉伯聯合大公國 | | | | 4 | | |
| 英國 | 15 | 8,883 | 32.4 | | 19% (+) | 8.5% (=) |
| 烏克蘭 | 15 | 13,107 | 27.4 | | 56.5% (+) | 23.5% (+) |
| 美國 | 100 | 100,353 | 36.2 | 4 | 19.5% (=) | 8.5% (=) |
| 歐盟 | 127 | 118,834 | 31.4 | 4 | 26% (-) | 12% (=) |
| 全球 | 402 | 348,030 | 29.0 | 58 | 10.7%(=) | 4% (=) |

註：(=)：與上年度相比約略相等、(+): 較上年度增加、(-): 較上年度減少

Source: IAEA-Pris, as of 24 June 2016.

BP, “Statistical Review of World Energy”, June 2016



Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖 7、1954 年-2016 上半年全球的核子反應爐運轉數與累計裝置容量

2015 年全球的核電發電量 2.44 兆度，占全球總發電量 10.7%，約等於全球初級能源之 4.4%。其中的核能發電量比 2014 年成長了 1.3% (約增加 310 億度，但仍比 2006 年歷史最高水平低約 8.2%)；其中所增加的核能發電，幾乎都是來自於中國大陸新增核能發電的貢獻 (2015 年中國大陸核能發電成長 30% 或 370 億度)。另外到 2016 年中期，全球營運中的核反應爐平均運轉年約 29 年；而正在興建中的反應爐有 58 部 (總裝置容量 56.6GW)，並以中國大陸 21 部占比最大，俄羅斯 7 部次之、印度 6 部再次之，合計三個國家興建中的反應爐占全球的 60%。

(三)2015 年核能廠提前關閉、淘汰及延誤施工

2015 年，包含日本、瑞典、瑞士、美國和臺灣等，共有 8 部核能機組提早關閉運轉；其中臺灣的核一廠 1 號機因為燃料把手斷裂後，就沒有再被允許運轉。另外在 1960 年-2016 年中，有 164 部核子反應爐已被關閉 (圖 8)，平均運轉年限約為 25 年；其中有 56 部運轉超過 30 年，更有 22 部超過 40 年的運轉年齡。

全球正在興建中反應爐的 14 個國家中，有 9 個國家共 38 部反應

爐出現進度落後情形。雖然中國大陸極力推展核電，但是興建中的 21 部反應爐，有 11 部是在過去三年內開始或尚未達到預計的啟動運轉日期，所以難以評估進度是否依計畫進度進行。而在上述進度落後的興建中反應爐，有 6 部已超過 10 年(包含 3 部超過 30 年，另 3 部為 10~14 年)。

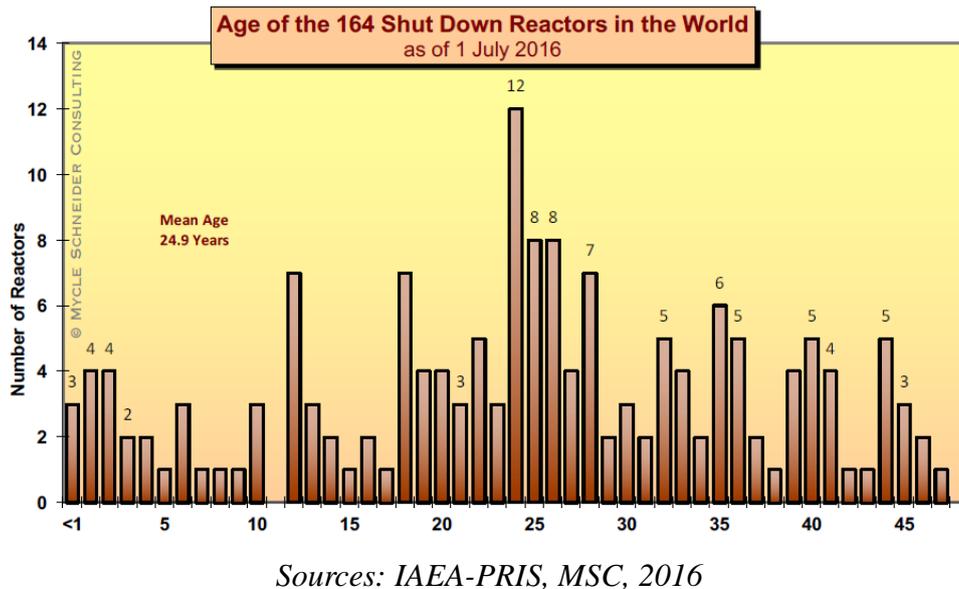
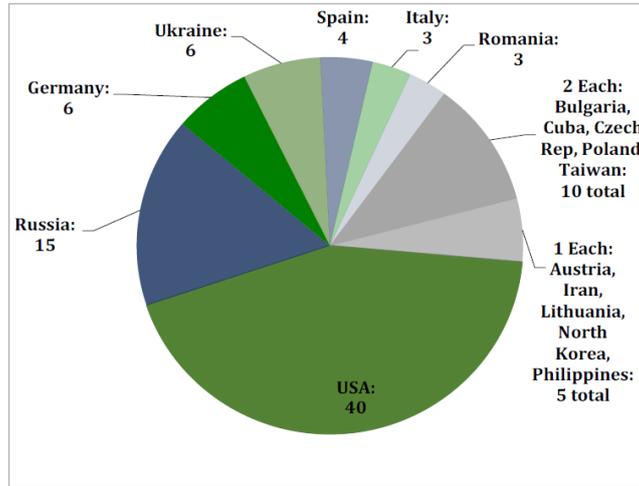


圖 8、1960 年-2016 年 164 部核子反應爐被關閉的年限

總計在 1977 年至 2016 年間，在核能發展的不同階段，共有 17 個國家、計 92 部核子反應爐的興建計畫被放棄或中止(圖 9)。而新加入興建核電廠的阿拉伯聯合大公國和白俄羅斯，目前建設進度相關資訊仍相當缺乏；其他潛在的新加入核電建設國家，包括孟加拉、埃及、約旦、波蘭、沙烏地阿拉伯、土耳其和越南等，在 2015 年的核電建設推展進度均落後；甚至如智利及立陶宛國家已暫停、並擱置核能建設，而印尼也放棄了核能推展的相關計畫。

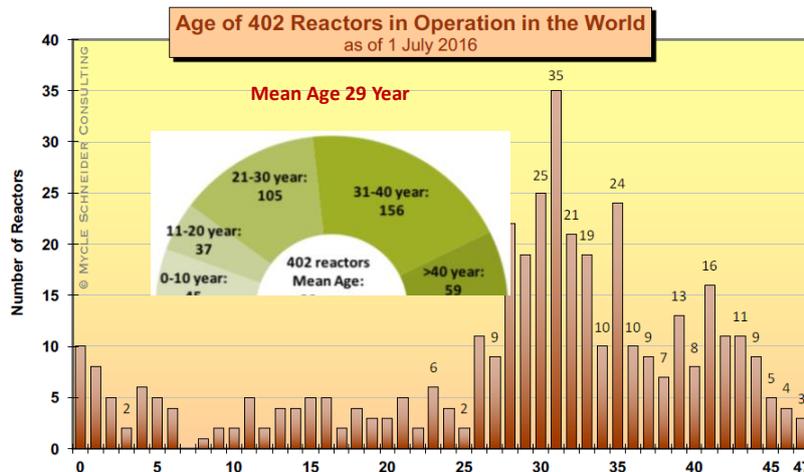


Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖 9、1977 年-2016 上半年全球計有 17 個國家 92 部核子反應爐興建計畫被放棄或中止

(四)核能運轉年齡與延役

依據表 1 所示，到 2016 年中期，全球還在商轉的核子反應爐平均運轉年齡約 29 年；若扣除中國大陸較新的 34 部機組(平均運轉年齡 6.6 年)，其他國家平均運轉年已達 31 年。其中超過一半或 215 部的反應爐營運已經超過 30 年，甚至有 59 部已經運轉超過 40 年(美國 37 部)，如圖 9 所示。

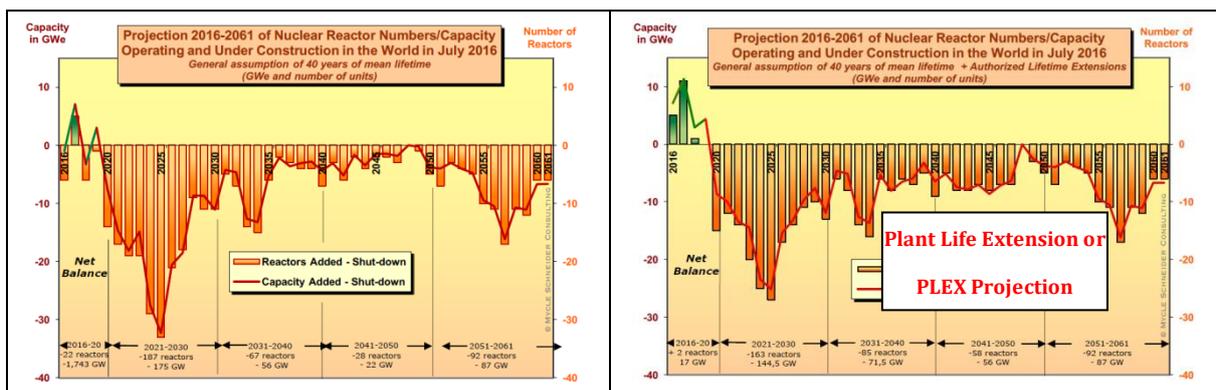


Sources: IAEA-PRIS, MSC, 2016

圖 8、目前全球運轉的 402 部核子反應爐平均運轉年齡分布

至 2016 年中期，美國 100 部運轉的反應爐中，已有 81 部反應爐的全生命週期許可證，得到批准延長運轉到 60 年。法國安全當局也明確表示，核子反應爐延役 10 年是允許的，但在安全前提下，不能保證所有的反應爐都能通過 40 年的深入安全評估。此外，法國目前的核能政策目標是，到 2025 年境內的反應爐數量減少到目前的 3/4 到 1/2，但此與反應爐延長使用壽命並不衝突。另外，比利時有 3 部反應爐亦被批准延役 10 年，但與國家預定在 2025 年核能全面除役的目標，並不會發生衝突。

針對未來營運的反應爐數量做預測，如果目前所有運轉的反應爐全生命週期為 40 年，預計到 2020 年將有 59 部反應爐被關閉，即使正在積極興建的反應爐均如期完成，裝置容量推估亦會下降 1.7GW；且到 2030 年就有 187 部反應爐被關閉(裝置容量減少 175GW)(圖 9、圖 10)。如果目前所有提出的反應爐延役申請均被允許，依目前規劃興建的反應爐數量，推估可運轉的反應爐數量只增加兩個，在 2020 年裝置容量增加 17GW。但是到 2030 年需要多額外增加 144.5GW 的核能裝置容量，以取代 163 部反應爐的除役。



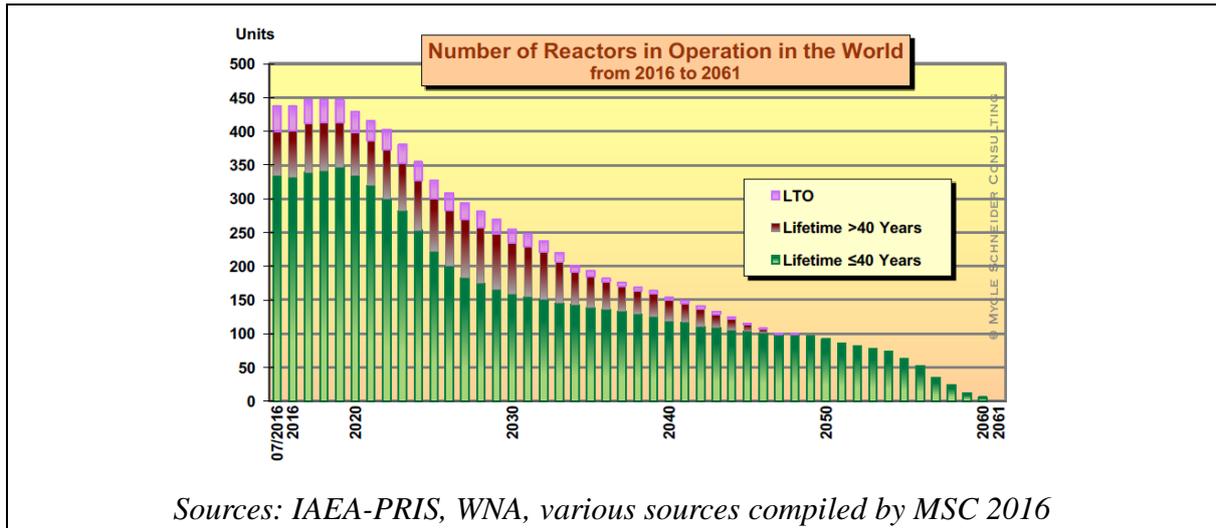


圖 9、推估 2016 年-2061 年全球核能反應爐數量及裝置容量
(依據 2016 年全球核能營運中及興建中數據)

(五)新加入核能建設國家的興建進度

核電擴展到新的國家進度是極其緩慢的，在過去二十年裡，只有羅馬尼亞(1996 年)和伊朗(2011 年)首次啟動反應爐。同一時間的哈薩克斯坦和立陶宛則關閉其國內的核電廠。而阿拉伯聯合大公國將在 2017 年啟動 Barakah 核電廠的反應爐，白俄羅斯在 Ostrovets 工地施工建築的核電廠正在按計畫進行。但在安全考量下，興建的工程成本已顯著提升。依據資料顯示，所有新加入核電廠興建國家的進度都落後，主要是預期成本節節上升緣故。

三、車諾比爾及福島核子事故

(一)車諾比爾核子事故

車諾比爾核子事故於 1986 年 4 月 26 日，發生在現今的烏克蘭地區，至今已經滿 30 年。此核能事故發生原因為當時在技術設計測試過程中，引用不恰當的反應器操作程序，使得氫氣發生爆炸，隨後暴露在反應爐中的石墨慢化劑失火，接著連續燃燒 10 天，促使更大量的放射性輻射物質釋出。估計爆炸和大火燃燒結果，反應爐內大約 1/3

的放射性物質進入大氣層，並飄散到歐洲地區，推估歐洲的土地面積有 40% 被污染；並有超過 600 萬人生活在現今之白俄羅斯、俄羅斯和烏克蘭受輻射污染的地區。此事故導致約有 13 萬人在事件初始即刻撤離，約 40 萬人最終無家可歸，約 55 萬名訓練有素的工人，在蘇聯軍隊參與的災害管理中受到最高的輻射劑量。

最近一項獨立健康評估，推估 50 年內將會再陸續發生約 4 萬個致命的癌症。目前已有 6 千多名甲狀腺癌病例已經確定，未來可能再增加 1.6 萬人。而在白俄羅斯和烏克蘭地區，發生白血病的風險已增加 5 倍。其它之心血管疾病、中風、精神健康、出生嬰兒缺陷，以及其他受嚴重放射性影響的國家，上述症狀的發病率均顯著增加。另外強而有力的證據顯示，兒童的肺功能受損、呼吸困難、血球數降低，高度貧血和感冒等症狀均已被證實。

1986 年發生事故後，對該建築物的補救措施為將被毀壞的核電廠全部加蓋，即以石棺的方式掩蔽該建築物。目前由 44 個國家和歐盟資助，共出資 20 億美元成立一個新的安全設施(NSC)計畫。新的安全設施是一個巨大的可移動蓋，可以將被破壞核電廠在拆除過程中的舊石棺提供保護。另外對於核廢料管理，最大的風險是要在 2017 年底與 2019 年 4 月，將核廢料轉移到固態儲存設施(此結構物在 2015 年已完成)，以儲存車諾比爾核電廠發生事故後，所有的液體和固體核廢料。

(二)福島核子事故

2011 年 3 月 11 日在日本東部外海發生了大地震，引發福島第一核電廠嚴重核能事故，雖然已經過了五年，但後續工作仍須面臨許多現場(onsite)與非現場(offsite)的挑戰。

現場挑戰：2015 年 6 月，日本政府修訂福島第一核電廠的中期與長期除役路線圖。關鍵工作包括核廢料移除、燃料碎片移除和產生的污染水限制。

1. 核廢料移除：預計從會計年度 2017 年到 2019 年移除 3 號反應爐內的核廢料、2020 年到 2021 年移除 2 號、2020 年到 2022 年移除 1 號反應爐的核廢料。
2. 熔融燃料拆卸：目前反應爐內的輻射劑量仍然很高，每小時仍達 4-10 西弗(Sievert)，由人工干預是不可能的。當前仍沒有確切的錄影訊息可以確定實際的熔融燃料位置。日本政府規劃在 2021 年開始清除燃料碎片，但目前仍沒有選定使用哪種清除方法。
3. 受污染的水管理：目前每天約有 300 立方公尺的水注入冷卻燃料碎片中；這些高度污染水用過後若未經過妥善處理，會從已破裂的外殼流出，並滲入地下水層中。目前已引用繞道(bypass)系統及抽取地下水的方式將水抽出，並存儲在人工興建的大池中(儲存容量可達 80 萬立方公尺)，以減少污染水的流出量。其中並配合設計凍土牆(frozen soil wall)的設計來減少污染水的滲出，此計畫已在 2016 年 3 月底開始執行。
4. 工人：每天都有 3,000-7,500 工人參與除役的工作，但在現場已發生一些致命的意外；所以日本衛生部(厚生勞動省)在 2015 年 9 月，首次通過、並制定除役任務職業工人的白血病追蹤。

非現場的異地挑戰：主要是撤離數以萬計居民面臨的健康安全問題，淨化廢棄物管理的健康後果評估和所涉及的費用。

1. 撤離人員：依據日本政府資料，截至 2016 年 5 月從福島縣撤離的人數約 92,600 人(2013 年 6 月峰值為 164,000 人)。其中約 3,400 人於相關疏散中死亡，如身體狀況變差或自殺等(列為地震相關死亡)。另外日本政府計畫在 2017 年 3 月解除部分限令，使得災區撤離人數可降至約 2016 年 5 月的一半。但根據福島縣調查顯示，即使限制令被取消或放寬，仍約有 70% 撤離居民不願返回家園，20% 猶豫不決，只有 10% 居民希望



返回。

2. 健康問題，特別是甲狀腺癌發病率的演變。雖然福島縣委員會的結論為：到現在為止，甲狀腺癌的發生無法證實為直接被輻射影響所致，但沒有排除因果關係。另外，日本岡山大學研究得出結論，福島的童年發生甲狀腺癌的機率為日本平均的 50 倍。
3. 屋內與室外疏散地區的去污，即整個福島縣的去污活動，日本政府估計有 80% 以上的房屋、5% 的道路、70% 的森林已進行去污；但是這些清除措施效率，民眾仍保持高度懷疑。
4. 事故成本：日本政府並沒有提供全面的事故意外總成本估算。但根據東京電力公司提供資料，在沒有考慮食品出口和旅遊業等間接影響下，目前的事務損失成本估算為 1,330 億美元，其中有一半以上是做為賠償用。

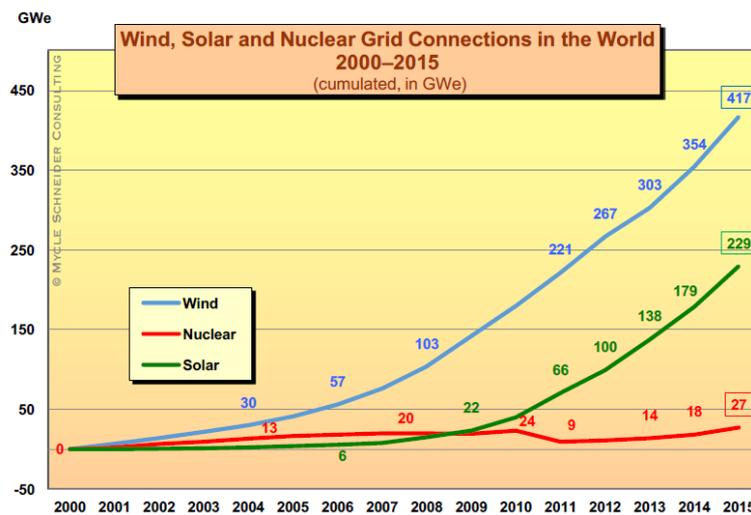
四、再生能源與核能發展比較

(一)核能與再生能源的裝置容量與發電量比較

2015 年全球電力行業的轉型加速，新技術和各國的能源政策，有利於分散系統和再生能源的發展。而 2015 年底在關於氣候變化的 COP21 巴黎協定中，多數國家均致力於推動再生能源。例如在國家自定預期貢獻(Intended Nationally Determined Contributions, INDCs)中，只有 11 個計畫提及核電發展，且只有六個國家提出擴大核電使用說明(白俄羅斯、中國大陸、印度、日本、土耳其和阿拉伯聯合大公國)。但卻有 144 個國家提到使用再生能源，並有 111 個國家明確說明擴大再生能源的使用目標。

2015 年全球再生能源的裝置容量增加 147GW(占全球淨增加裝置容量 60% 以上)。其中風電和太陽光電占新增再生能源裝置容量約 77%(風電 63GW 和太陽光電 50GW)，而合計核電併網裝置容量僅增

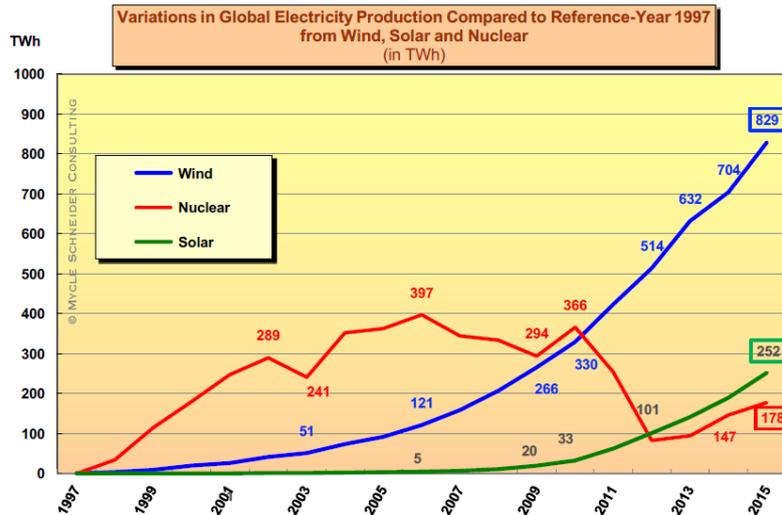
加約 6.5GW。中國大陸在 2015 年底的風電總裝置容量達 146GW(當年增加量 31GW，近於 2013 年兩倍)，總裝置容量已明顯超過 100GW 的預定目標；太陽光電裝置容量增加 14GW，合計達 140GW(超越德國成為全球最大的太陽光電裝置國)；另新增核電裝置容量 7.6GW(占 2015 年全球新增加量 11GW 的 68%)。而自 2000 年以來，全球各地併網風電已達 417GW、太陽光電為 229GW，但核電實際併網且新增加可營運的裝置容量僅 27GW(圖 10) (2000 年基底為 321GW，參圖 7)。



Sources: WNISR, BP Statistical Review 2016

圖 10、2000 年-2015 年全球的風力、太陽能及核能併網發電裝置容量

2015 年全球太陽光電與風電的發電量各增加 630 億度及 1,250 億度，成長率超過 33% 及 17%；而核電發電量僅增加 310 億度(+1.3%)，且完全是中國大陸的貢獻。相較於 1997 年(京都議定書簽字)，2015 年的風電與太陽光電發電量分別增加 8,290 億度與 2,520 億度(圖 11)，核電增加 1,780 億度(2015 年全球核能總發電量 2.44 兆度，參圖 1)。

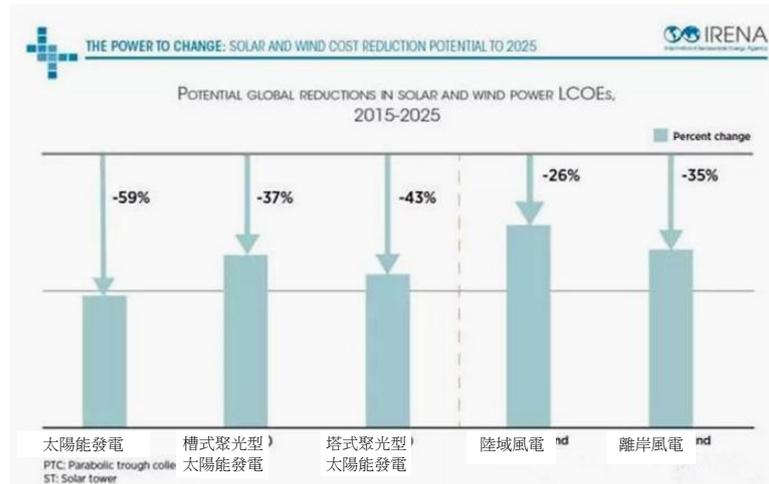


Sources: BP, MSC, 2016

圖 11、1997 年至 2015 年全球的風力、太陽能及核能併網發電量

中國大陸、巴西、德國、印度、日本、墨西哥、荷蘭、西班牙和英國等國，2015 年從非水電的再生能源獲得的電力，均比核電來的多。例如中國大陸從風電生產的電力達 1,850 億度，超過核電之 1,610 億度；印度生產風電 410 億度，超過核電之 350 億度；而美國在 2015 年生產的電力有 8% 來自非水電的再生能源(2007 年僅有 2.7%)，核電則維持在 19% 左右。而歐盟國家的差異特別明顯，1997 年至 2014 年間，風能發電量增加 3,030 億度、太陽光電增加 1,090 億度，而核能發電量則下降了 650 億度。

綜合資料顯示，2015 年全球的再生能源發電持續快速增長，而核電發電量若不包括中國大陸則呈減少趨勢。主要原因為再生能源發電具有小機組規模、交貨期短、易於製造和安裝、可快速擴展及大規模生產等優點，未來會因為接受程度高，並迅速降低系統成本(圖 12)[3] 等特色；對比於核能之高風險、核電廠建設、營運與維護成本高、興建時期冗長等因素；相對地，將會推進再生能源的快速發展。



Source: IRENA, 2016, Sep.

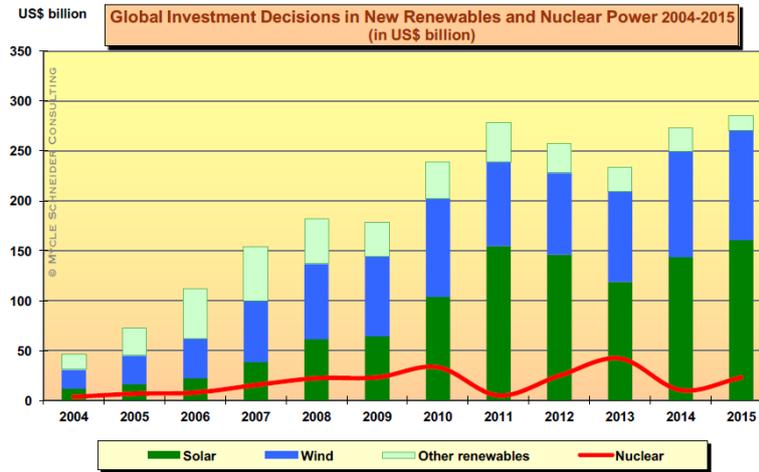
圖 12、國際再生能源署(IRENA)推估 2015 年-2025 年風電與太陽光電的均化發電成本(LCOEs)下降率

(二)核能與再生能源投資經費比較

2015 年全球再生能源投資金額達到 2,859 億美元的歷史高點(2014 年為 2,730 億美元)，並超過了 2011 年的前期高點 2,785 億美元 2.7%；僅中國大陸就投資 1,029 億美元，幾乎是 2013 年的兩倍。墨西哥和智利是第一次進入前十名的投資國家(表 2)，兩國的支出比上年同期增加約一倍；而印度(+44%)、英國(+60%)和美國(+21.5%)亦顯著推動再生能源的投資。但是 2015 年全球新的核電廠投資金額，則遠低於再生能源的投資總額，如圖 13。

表2、近三年全球10大再生能源投資國家[1]

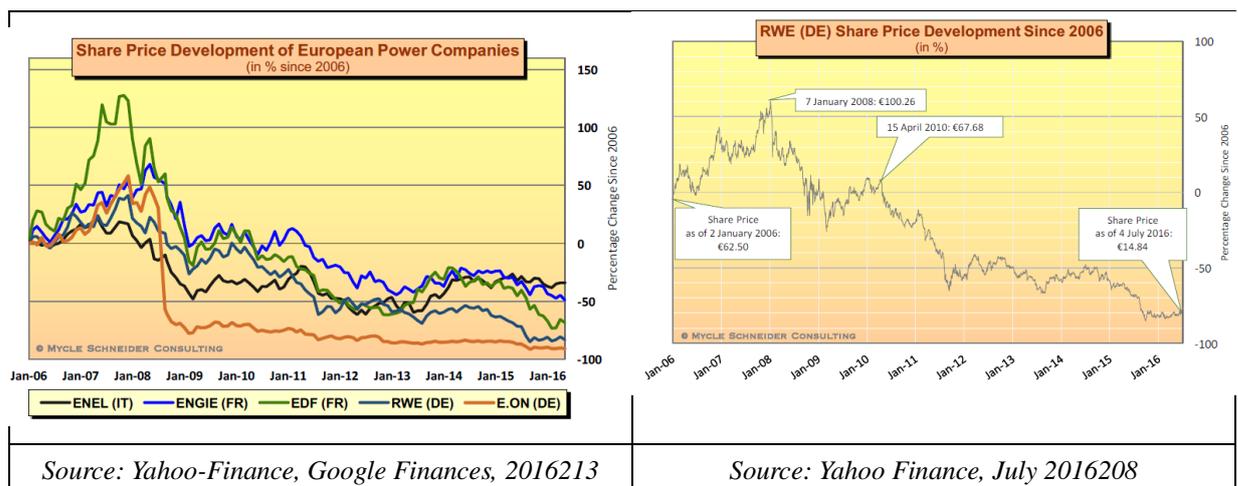
| 國家 | 2015年 (億美元) | 2014年 (億美元) | 2013年 (億美元) |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 中國大陸 | 1,029 | 810 | 542 |
| 美國 | 441 | 363 | 339 |
| 日本 | 362 | 343 | 286 |
| 英國 | 222 | 139 | 121 |
| 印度 | 102 | 71 | 60 |
| 德國 | 85 | 114 | 99 |
| 巴西 | 71 | 74 | 30 |
| 南非 | 45 | 55 | 49 |
| 墨西哥 | 40 | 21 | 15 |
| 智利 | 34 | 14 | 16 |



Sources: FS-UNEP 2015 and WNISR original research

圖 13、2004 年至 2015 年全球的再生能源及核電投資金額

對於老舊的核電廠，由於提高其安全等級需要增加更新設備與維護成本；加上近期的化石能源發電成本下降，相對地引發核能生產的電力批發價格下滑，甚至已接近或低於核能的發電成本[1]；並使得核能產業的信用評等遭到降等，導致銀行的融資金額遭到限制或拒絕，隨後促使股價大幅滑落(圖14)。其中如德國電力公司RWE，於2006年從整體營運中單獨成立核能部門後，2008年起股價就開始滑落，2016年時的股價僅剩初始上市價格的1成左右。



Source: Yahoo-Finance, Google Finances, 2016213

Source: Yahoo Finance, July 2016208

圖 14、歐洲地區的核能公司歷年股價變化

對於新興建的核能電廠，由於興建成本不斷提高、營運及維護成本持續上升，加上興建時期冗長，營運期間具有難以預測的風險性，以及信貸及融資方面困難性增加，導致民間公司的投資意願已大為降低；除非是政府政策的大力支持與投資，否則未來的核能產業將會呈現萎縮狀況。

五、結語

截至 2016 年 7 月 1 日，全球共有 31 個國家、計 402 部核子反應爐仍在營運中(比 2015 年中期多出 11 部)，總裝置容量 348GW。而 2015 年的核電發電量 2.44 兆度，占全球總發電量 10.7%，約等於全球初級能源消費的 4.4%。其中前 5 大核能發電國家，依序為美國、法國、俄羅斯、中國大陸與韓國，合計約占全球核能總發電量 70%，而美國和法國就占了全球核能發電量的一半。另外，2015 年全球的核能發電量成長 1.3%，主要是中國大陸核能發電量增加 31% 的貢獻。

2015 年全球共有 10 部核子反應爐商業化運轉，包括中國大陸 8 部，俄羅斯及韓國各 1 部。2016 年上半年有 5 部反應爐開始運轉，包含中國大陸 3 部、韓國和美國各 1 部反應爐。而 2015 年全球開工興建的核子反應爐有 8 部(中國大陸 6 部，巴基斯坦和阿拉伯聯合大公國各 1 部)，2016 年上半年全球並沒有開工興建的反應爐。即到 2016 年中期，全球正在興建的反應爐機組數共有 58 部(總裝置容量 56.6GW)，並以中國大陸 21 部最多，俄羅斯 7 部次之、印度 6 部再次之，合計三個國家興建中的反應爐占全球 60%。

1960 年-2016 年期間，全球共有 164 部核子反應爐被關閉，平均運轉年限約為 25 年；其中 56 部運轉超過 30 年，更有 22 部超過 40 年的運轉年齡。而 2015 年有 8 部核能機組提早關閉運轉，包含臺灣的核一廠 1 號機，因為燃料把手斷裂維修後，就沒有再被允許運轉。

全球正在興建核子反應爐的 14 個國家中，有 9 個國家 38 部反應

爐進度落後，其中 6 部已超過 10 年(包含 3 部超過 30 年，另 3 部為 10~14 年)。中國大陸雖然極力推展核電，但也有 11 部興建中的反應爐難以評估進度是否依計畫進行。另在 1977 年至 2016 年間，總計有 17 個國家、共 92 部核子反應爐興建計畫被放棄或中止。而潛在新加入核能建設國家，在 2015 年的核能建設興建進度均落後，甚至如智利及立陶宛國家已暫停，並擱置核能建設，而印尼也放棄了核能推展的相關計畫。

2016 年中期，全球商轉的核反應爐平均運轉年齡約 29 年。其中有 215 部的反應爐營運已經超過 30 年，甚至 59 部已經運轉超過 40 年(美國占 37 部)。另在安全無虞及政策允許的情況下會提出延役申請，例如到 2016 年中期，美國已有 81 部反應爐的全生命週期許可證，被批准可延長運轉到 60 年。法國安全當局也在安全前提下，允許反應爐延役 10 年，但到 2025 年反應爐總數量需減少到目前的 3/4 到 1/2 的目標。比利時亦有 3 部反應爐被批允延役 10 年，前提是 2025 年境內的反應爐需全面除役。

車諾比爾及福島核子事故為史上兩次最嚴重的核能工安事故。在車諾比爾事故滿 30 年後，仍有約數百萬人居住在嚴重輻射污染地區，預計未來 50 年有約 4 萬個致命癌症情況。而福島核災滿 5 年後，未來的核能廠內的清污工作，高度污染水流入地下水，以及民眾的健康追蹤等，相關之淨化廢棄物管理、健康後果評估和所涉及的費用(估算費用達 1,330 億美元，其中有一半以上做為賠償)，才是更需要關注的重要議題。

自 2000 年以來，全球各地併網的風力機裝置容量達 417GW、太陽光電 229GW，但核電實際新增併網且可營運的裝置容量為 27GW(2000 年以前的基底為 321GW，合計裝置容量為 348GW)。其中 2015 年全球再生能源的裝機容量增加 147GW(風電 63GW、太陽光電 50GW、其他 34GW)，占全球淨增加裝置容量 60% 以上；核電合



計併網裝置容量僅增加 6.5GW。而在 2015 年，全球太陽光電與風電的發電量分別較 2014 年增加 630 億度與 1,250 億度，成長超過 33% 及 17%，而核電僅增加 310 億度(+1.3%)。

2015 年全球再生能源投資金額達到 2,859 億美元的歷史高點；僅中國大陸就投資 1,029 億美元(占當年總投資金額 36%)，而印度、英國、美國、墨西哥及智利等國亦顯著推動再生能源的投資。但是 2015 年全球新的核電廠投資金額，尚不及再生能源的投資總額的 1/10。

311 福島事件後，大部分老舊的核電廠需要提高其安全等級而增加更新設備與維護成本；加以近期核能電力批發價格下滑到接近或低於核能的發電成本，使得核能產業的信用評等遭到降等，銀行的融資金額也遭到限制或拒絕，並促使股價大幅滑落。對於新建的核能電廠，由於整體發電成本不斷提升，加上興建時期冗長，營運期間具有難以預測的風險性，以及信貸及融資方面困難性增加，導致民間公司的投資意願已大為降低；除非是政府政策的大力支持與投資，否則未來的核能產業將會呈現萎縮狀況。

參考文獻

- [1] The World Nuclear Industry Status Report 2016
- [2] BP stands for BP plc; MSC for Mycle Schneider Consulting
- [3] IRENA, THE POWER TO CHANGE: SOLAR AND WIND COST REDUCTION POTENTIAL TO 2025, 2016, June.

