

2015 全球核能工業現況報告

by

Mycale Schneider, Antony Froggatt, Julie Hazemann, Tadahiro Katsuta, M. V.

Ramana, and Steve Thomas

(翁英琪譯 徐光蓉校稿)

綱要與結論

綱要

- 從五十年前開始商用核電廠運轉至今，日本首度整年零核電。
- 全球開始動工的核電廠數目由 2010 年 15 座跌至 2014 年的 3 座。
- 62 座興建中的反應爐，比前一年少 5 座，其中至少四分之三進度延宕。14 個建造核電廠國家中 10 個國家所有工程皆落後，而且是慢許多年。5 座機組被列在“興建中”超過 30 年。
- 全球核能總發電量，連續三年占整體電力比率低於 11%。
- 亞瑞華公司(AREVA)遭標準普爾信評公司降級為“垃圾”，2015 年 7 月 9 日股價跌到歷史新低，從 2007 年以來損失 90%；嚴格說已破產。
- 中國、德國、日本—世界最大四個經濟體中的三國—加上巴西、印度、墨西哥、荷蘭及西班牙，水力以外的再生能源的發電量都比核能發電多。上述八國人口總共超過 30 億，佔全球總人口的 45%。
- 英國，包含水力發電在內的再生能源總發電量，超過核能發電。
- 與 1997 年氣候變遷有關的京都議定書簽訂時相比，2014 年的風力發電每年增加 6,940 億度，太陽能增加 1,850 億度，無論是風力或太陽能，都超過核電增加的 1,470 億度。

《2015 全球核能工業現況報告》提供整體性詳細的核能電廠數據，包括運作、發電及建造資訊；針對現今使用核能國家及潛在新進國家的新建工程狀況進行評估。此次報告提

供工程進展變化分析；另外有兩個新章節，一章是描述第三代反應爐(III+)進度嚴重落後問題（包括 EPR, AP1000, AES-2006）並且分析成因。第二章探究所謂”進步型”反應爐之歷史與發展。〈福島現況報告〉提供災害發生以來四年，福島電廠及周遭地區狀況綜合的更新。

〈核能與再生能源比較〉章節特別比較在核能、風與太陽能的投資、裝置容量以及發電的整體比較數據。

最後，附件一列出有核電廠運轉的 30 國各國的概述，並分別對中國、法國，美國及日本進行較深入討論。

反應爐狀況與核計畫

開始運轉與關閉。2014 年如同 2013 年，有 5 座反應爐開始運轉（3 座在中國、1 座在阿根廷、1 座在俄羅斯），1 座關閉（美國的 Vermont Yankee）。2015 前半年，中國有 4 座，南韓 1 座機組開始運轉，但有 2 座關閉（比利時的 Doel 1 和德國的 Grafenrheinfeld）。

運轉與興建數據

運轉中的核反應爐。全球有 30 個國家有運轉中的核電廠，較去年少 1 國。總共 391 座反應爐（較去年增加 3 座），總裝置容量 337GW（較去年增加 5GW）。2014 年日本沒有一座核能機組發電，本報告將日本 40 座反應爐列為”長期停機”（LTO）狀態。除日本反應爐外，1 座瑞典的反應爐（Oskarshamn-2）也符合”長期停機”狀態，且其主要的業主要求將之提早關閉。在去年《國際核能工業狀況報告》中被列為”長期停機”的 2 座機組已不屬於該分類：1 座南韓反應爐，Wolsong-1，於 2015 年 6 月重啟運作，另 1 座印度反應爐，Rajasthan-1 將除役。福島第一及第二核電廠的 10 座反應爐，被視為永久關閉，因此，不計入營運中核電廠之列。於 2015 年 7 月評估，日本可能最多僅 2 座反應爐（位於鹿兒島的 Sendai-1 號和 2 號機）將於 2015 年重啟。

核工業持續走下坡：扣除長期停機反應爐，全球共計 391 座反應爐運轉中，比起 2002 年高峰期的 438 座少了 47 座。總裝置容量在 2010 年達最高，368GW；之後衰退 8%至 337 GW，與二十年前水準相當。2014 年，核電年發電量達 24,100 億度，比去年多 2.2%，但比 2006 年歷史高峰仍少 9.4%。

發電量佔比。過去 3 年的核電佔全球發電量比率穩定，2014 年在 10.8%，是從 1996 年歷史高峰 17.6%，後持續下滑至此。核電在全球初級能源中佔比穩定在 4.4%，是自 1984 年以來的最低水準。

如同前幾年，核能發電最多的前五國“五巨頭”，依序發電量多寡為美國、法國、俄羅斯、南韓以及中國 – 2014 年這五國的總核能發電量佔全球核電三分之二（2014 年佔 69%）。美國與法國就佔全球核電量的一半，而法國就佔歐盟總核電量的一半。

反應爐之年齡。除中國外，沒有太多新建核電廠計畫，導致全球運轉中的核反應爐機組平均年齡不斷攀升，2015 年年中，達 28.8 年。有一半以上，也就是 199 座機組，運轉已超過 30 年，包括 54 座已經超過 40 年。美國核反應爐有三分之一，33 座，運轉已超過 40 年。

延役。對於反應爐要超過原始設計規劃的運轉年限繼續使用(延役)的規範，各國情況不同。美國約有四分之三的反應爐已經獲得延役許可，使得運轉年限可延長至 60 年之久；而法國則只核准延役 10 年，且安全管制當局明確表示：無法保證所有機組都通過 40 年深入徹底的檢查。再者，核電廠延役與法國政府宣示於 2025 年將核能佔比，由目前四分之三減為二分之一的目標扞格不入。比利時 2 座反應爐（現為 3 座）申請 10 年期延役雖已經國會通過，卻尚未獲得安全管制機關許可；上述延役方案並不會損及 2025 年逐步淘汰核能的法定目標。

預測未來。如果目前運轉中的反應爐都於 40 年停止運轉，2020 年反應爐數目會比 2014 年還少 19 座，總裝置容量增加 1.5GW。到 2030 年，將有 188 座機組（178GW）必須更

換 - 比過去 10 年更新速度快 5 倍。即使所有申請反應爐延役都通過，2020 年運轉中的反應爐數目只多 4 座，增加 2.1GW；至 2030 年，需要新建 154GW（169 座新反應爐）取代被關閉的反應爐。

建造。與前幾年相同，有 14 國正在興建核能電廠。2015 年 7 月止，有 62 座反應爐興建中，比 2014 年 7 月少了 5 座，總裝置容量為 59GW，比起去年少 5GW。新核電計畫中約 40%（24 座）位於中國。

- 62 座興建中的機組，從開工到完工平均為 7.6 年。
- 14 個國家興建反應爐，其中 10 國遭遇嚴重進度延宕，多半數年以上。全球興建中核電廠工程至少四分之三（47 座）進度落後。其餘 15 座興建中機組有 9 座在中國，不是這 3 年才開始，不然就還沒到預計的運轉日期。所以工程是否是依進度，很難評估。
- 有 5 座反應爐被列入“興建中”之行列超過 30 年。美國田納西州的 Watts Bar-2 機組是紀錄保持者，從 1972 年 12 月開工。俄羅斯 2 座機組（BN-800, Rostov-4）以及斯洛伐克的 Mochovce 3 號及 4 號 2 部機組興建已超過 30 年。烏克蘭的 Khmel'nitski 3 號及 4 號機組即將邁入施工 30 年，其建造時間分別達 29 年及 28 年。再者，宣布取消與俄羅斯簽訂的興建協議，將會使工程遭遇更多的延宕。
- 印度 2 座機組 Kudankulam 2 號機及快速滋生反應爐原型設計（PFBR）被列入“興建中”行列分別為第 13 年及 11 年。位於芬蘭的 Olkiluoto 電廠的第 3 號機組，在 2015 年 8 月正式屆滿開工 10 周年，其業主已放棄宣布預期啟用時間。
- 2005 年以後開始興建的 40 座核能機組（分屬 9 國）－除了阿根廷 1 座機組外，其餘都在亞洲或東歐－建造時間長短變動大，從 4 年到 36 年，平均為 9.4 年。

開始施工與新建議題

開工。2014 年有 3 座反應爐開始施工：阿根廷、白俄羅斯及阿拉伯聯合大公國各 1 座。相較 2010 年，15 座開始興建，中國就佔 10 座，2013 年則有 10 座反應爐開工。2014 年中國沒有新的核電廠開工。2015 年上半年有兩座完工，是 2015 年至今僅有的啟用。歷史資料顯示，開工最多是 1974 年，44 座開工；從 2011 年一月到 2015 年中，僅 26 座核電廠開工，比 1970 年代一年的開工還少。

工程取消。從 1977 年至 2015 年間，18 國共計 92 座（每八座反應爐計畫就有一個），不是放棄廠址，就是工程擱置。

引進新核電國家計畫延宕。只有 2 個新核電國家在興建反應爐：白俄羅斯與阿拉伯聯合大公國。其他可能的新核電國家推動核電發展計畫被一再延宕，可能的國家包括：孟加拉、埃及、約旦、波蘭、沙烏地阿拉伯、土耳其和越南。

第三代反應爐的延宕

車諾堡核災發生至今 29 年，還沒有任何新一代或所謂第三代反應爐正式運轉發電，芬蘭與法國的建造計畫，進度嚴重落後多年。18 座屬於第三代設計（8 座西屋公司 AP1000、6 座 Rosatom 的 AES-2006 與 4 座 AREVA 的 EPR），其中 16 座進度延宕 2~9 年。諸多進度落後的原因浮現：設計問題、缺乏具技術人力、品質管控問題、供應鏈問題、電力公司和／或設備供應商事前的準備籌畫很差以及財務短缺。標準化沒有發生，引入模組化設計，似乎只是將品管問題，從興建的場址轉到為模組工廠。法製 EPR 鍛造的反應爐出現許多嚴重瑕疵，可能危及整個與 EPR 有關企業。

進步型核反應爐發展狀況

小型模組式反應爐（SMR）的構思已存在幾十年，十多款基本設計被提出討論。美國政府自 1990 年代以來，資助小型模組反應爐發展，但迄今核能管制委員會仍未收到任何小

型模組反應爐許可的申請案。俄羅斯的浮動點機組設計，是種會浮游式反應爐，2002 年獲得許可；2 座反應爐於 2007 年起造，部分因財務因素，進度一再延遲。南韓小型模組反應爐被稱為進步型系統整合模組反應爐（SMART），花費 20 年發展；2012 年該設計獲管制當局許可，但至今尚無機組售出。中國正興建 1 座高溫氣冷式反應爐。南非的小石床模組反應爐－是長期以來被視為全球最進步的小型模組反應爐計畫－因為無法吸引任何私人投資或客戶，在耗費約 10 億美元之公款後，於 2010 年放棄；而該設計根本未完成。印度自 1990 年代以來著手發展進步型重水反應爐（AHWR），至今還沒有任何興建計畫。阿根廷於 2014 年 2 月開始建造 1 座以壓水式反應爐為基礎的小型機組，稱為 CAREM，此款是 1980 年代以來自行發展設計的反應爐，據報導，每仟瓦電力的成本為 17,000 美元，創下全球興建中反應爐的最昂貴紀錄。儘管政府大規模的資助，美國的小型模組反應爐發展所受到的市場注意程度遠遠比媒體宣傳低；小型模組反應爐一開始應比缺乏競爭力的大型高價反應爐昂貴許多，假設學習曲線可以降低成本這件事從未在核電業被證實；小型模組反應爐還面對來自能源效率提升和再生能源技術的激烈競爭，後者已經因為量產在經濟規模上領先模組型反應爐幾十年。

經濟與財務

亞瑞華的崩解。4 年累計虧損 80 億歐元，年營業額 83 億歐元但現時債務卻高達 58 億歐元的法國國營整合型核能企業亞瑞華(AREVA)公司技術上已經破產。於 2015 年 7 月 9 日，亞瑞華公司股價暴跌至歷史新低，比 2007 年股價最高峰少 90%。法國國營電力公司(EDF)將接手亞瑞華公司反應爐建造和維修的子公司 AREVA NP 大部分的股權；其子公司將開放外國投資。此舉可能將問題複雜化，使得風險擴及法國電力公司。

Hinkley Point C 核電廠計畫和政府補助。2014 年 12 月，英國利用差價合約模式，仿效躉購饋網電價協議，提供新核電廠長期寬裕的補貼方案，在 Hinkley Point C 核電廠計畫正式調查之後，獲得歐盟委員會的許可。然而，奧地利政府對此決定正式向歐洲法院提

出訴願，盧森堡政府宣布將加入訴願陣營；另有 10 家能源公司也分別提出告訴。據聞，英國財政部內部很擔心此計畫，而所需的投資者仍不知在何方。

運轉成本增加。在一些國家（包括比利時、法國、德國、瑞典及美國），過去一向不大隨通貨膨脹調整之運轉成本，最近急遽攀升，使得核反應爐的平均運轉成本不是僅略低、就是已超過電力批發市場價格範圍。核電廠營運者採取幾種因應措施：法國電力公司乃法國國營事業，也是全球最大的核能經營者，要求大幅漲價以彌補其運轉成本虧損。德國 E.ON 決定較法律規定關閉時程提早六個月關閉一座核反應爐。在瑞典，因為售電收入比預期低而且需要昂貴的投資，十座機組至少有四座機組將比預計時程提早關閉。在美國，電力公司試圖爭取州政府補助，因為在當前市場情況核電不再具競爭力。在比利時，Electrabel 公司（也就是 GDF-Suez 集團的子公司）能否重啟 2 座有嚴重瑕疵的核反應爐，仍屬未定之數。

福島近況報告

受到 2011 年 3 月 11 日（本報告亦稱 311）東日本大地震引發福島第一核電廠事故（福島事故）及其後續事件，發生已過四載。本評估包括對福島電廠及周遭地區所面臨之挑戰分析；至今挑戰依舊嚴峻。

福島電廠之挑戰。現在，反應爐建物內輻射劑量依舊極高（每小時數個西弗），不可能利用人去處理。各種類型的機器人被困在反應爐建物內，只得被棄置，讓問題更加複雜。預計在 2020 年上半年將 1、2 號機中熔化的核燃料殘骸清除，2021 年下半年清除 3 號機組。完整的除役工作將於 2021 年 12 月開始，預計需要 30 至 40 年完成。能否如期執行上述時間表，令人存疑。

每天有大量水（約莫每日 300 立方公尺）灌入用以冷卻核燃料殘骸。營運者東京電力公司為了減少遭污染水的儲存需要，裝設水除污系統並將部份淨化過的水取代淡水，重新灌注。因為技術問題和人為疏失，淨水系統只有相當低的運轉率。

再者，地下水滲入反應爐建物地下室，與原本高度污染水混合，每日淨儲存的污水量由 300 公噸增加到 400 公噸，相當於每 2.5 天增加一座 1,000 立方公尺的儲水槽。儲水容量現在已達 80 萬立方公尺，相當於 320 座奧林匹克標準游泳池。地下水繞道系統和凍土牆正在籌劃中。然而，凍土牆的最初的試驗結果令人失望。

- **1 號機**。2015 年 5 月開始移除建築物頂蓋，這是在災後為了減少輻射物質飄散到環境中而裝設的屏障；頂蓋移除是為了從冷卻儲存池中取出碎片殘渣以及用過燃料棒做準備。
- **2 號機**。因為於輻射強度極高，除了籌畫階段外，除役工作沒有任何進展。
- **3 號機**。碎片殘渣已從用過燃料棒儲存池中移除，開始移除用過燃料棒的準備工作。
- **4 號機**。2014 年 12 月完成用過燃料棒自冷卻池移除，一個非常重要的里程碑。4 號機水池中用過燃料棒數量相當於其他三座反應爐水池用過燃料棒量的總合，萬一用過燃料棒起火，是非常嚴重的潛在危險。

廠區外之挑戰。根據政府數據，到 2015 年 1 月底自福島縣撤離的人數約 12 萬人（2013 年 6 月高峰時 16.4 萬人）。將近 3,200 人死亡與撤離有關，諸如：身體狀況變差或自殺（所有被歸為“地震相關死亡”）。其中約有 1,800 人（超過半數）來自福島縣。即使撤離管制可能解除，許多被撤離民眾已然放棄重返家園。

除污廢料。根據官方估計，到 2014 年底撤離地區內外，因除污活動產生超過 15.7 萬公噸廢料。

福島核災的代價。日本政府尚未提供全面性的事故總花費估算。然而，不考慮對食物出口及觀光衝擊等間接影響，僅各別項目支出總和已達 1 千億美元，其中將近 60% 用在賠償。

核能與再生能源布局

電力部門正處於徹底翻轉的時期，新技術與推展政策有助分散式系統和再生能源立足。通常既有電力公司不擁有分散式系統和再生能源，核工業者與電力公司一則不喜歡發展，或視後者為潛在實質的威脅。

投資。繼 2 年衰退之後，2014 年全球再生能源投資增加至 2700 億美元（+17%），與 2011 年 2780 億美元的歷史紀錄相當，也是 2004 年總投資額的 4 倍。單單中國，於 2014 年花超過 830 億美元（占全球總金額的 31%），約半數投資於風力，半數於太陽能；是投資核能金額（91 億美元）的 9 倍。全球在新核電廠的投資，是再生能源投資的一成不到。

安裝的容量。全球增加的發電裝置量約半數（49%）是新的再生能源（大型水力除外），包含新風力發電 49 GW（高於 2013 年增加的 34 GW）以及 46 GW 太陽能（高於 2013 年增加的 40 GW）。中國加速其風力發電佈局，增加 23 GW，高於 2013 年增加的 16 GW，相當於 2014 年全球增加量的 45%，且風力裝置總容量到達 115 GW，已經超過其 2015 年 100 GW 的目標。中國也增加了 3 GW 的核能發電量，占全球增加量的 65%。

2000 年以來，全球風力發電增加 355GW，太陽能增加 179 GW，分別是核能發電 20 GW 的 18 倍及 9 倍。若將目前處於長期停機狀態的 41 座 37 GW 的反應爐列入考量，則實際運轉中的核能發電裝置容量下降 17 GW。

發電。平均而言，相同裝置容量，核能機組發電量約是再生能源發電量的兩倍（排除大型水力）。然而就實際發電量而言，巴西、中國、德國、印度、日本、墨西哥、荷蘭和

西班牙--上述名單包含世界最大四個經濟體中的三國 – 從非水力的再生能源所發電量都比核能發電多。這 8 個國家代表人口超過 30 億，占全球人口 45%。2014 年中國，和前面 2 年情況相似，單風力發電（1580 億度）就超過核能發電量（1240 億度）。英國 2014 年，包含水力的再生能源發電，數十年來首度超過核能發電量。

美國從 2001 年起，再生能源平均年成長率為 5%。2014 年全美有 13% 的電力來自再生能源，而 2007 年為 8.5%。

2014 年全球太陽能發電量年成長超過 38%，風能超過 10%，核能 2.2 %。與 1997 年簽訂有關氣候變遷的京都議定書時相比，2014 年全球的風力發電增加了 6940 億度，太陽光電增加 1850 億度，無論風或太陽光電皆超過核能增加的 1470 億度。歐盟的數據顯示核能地位的迅速衰退：1997-2014 年的期間內，風力發電增加了 2420 億度，太陽能增加 980 億度，而核電則減少 470 億度。簡而言之，數據並不支持核電所宣稱：核能發電擴展比現代再生能源快，或幾乎同速；再生能源機組小與較低的容量因數的缺點，透過很短的施工準備期、容易生產及安裝、與可快速擴展到量產所彌補。