



《2022 世界核能產業工業現況報告》 評析

計畫名稱：111 年度「國家總體能源政策發展規劃及決策
支援能量建構」(2/2)

計畫主持人：洪明龍

計畫研究人員／作者：黃至弘

產出日期：中華民國 111 年 11 月 11 日



目 錄

中文摘要	1
Abstract	2
一、前言	3
二、全球核電發電趨勢	3
(一) 使用核電的國家	3
(二) 目前 53 座反應爐建置中，亞洲佔 41 座；26 座確定工期延宕 4	
(三) 核能裝置數量與容量近四年微幅下滑	7
(四) 核能發電量微幅增加，但發電占比下滑且創下新低	7
(五) 核能機組平均壽命已超過 30 年，且六成機組高於平均值 ...	9
三、再生能源電力供應超越核電貢獻	11
(一) 風光電力佈建與發電實績持續大幅成長	11
(二) 再生能源投資決策高，近年來亞洲已趕上歐美國家	12
(三) 再生能源均化成本下降且低於核能及化石燃料均化成本 ...	14
四、戰爭與核災對核電的挑戰	16
資料來源	17



圖目錄

圖 1、全球使用核能發電的國家及啟用期程.....	4
圖 2、全球核反應爐啟用與關閉數量歷年變化.....	5
圖 3、全球核反應爐數量及裝置容量歷年變化.....	7
圖 4、全球核能發電量與發電占比歷年變化.....	8
圖 5、各國核能發電量與發電占比近兩年變化情形與歷史峰值	9
圖 6、全球核反應爐服役年齡分佈情形.....	10
圖 7、至 2050 年全球核反應爐數量變化預測.....	10
圖 8、全球核電與風光電力之裝置容量與年發電量變化情形.....	12
圖 9、2004~2021 年間全球能源投資決策變化情形	13
圖 10、2012~2021 年各區域及美中能源投資決策變化情形	14
圖 11、2009~2021 年主要能源之均化成本變化情形.....	15



表目錄

表 1、全球正在建置中的核反應爐（截至 2022 年 7 月 1 日）	6
表 2、各發電類型的年度變化及長期變化情形.....	12



中文摘要

《2022 世界核能產業工業現況報告》於 2022 年 10 月 5 日發表，提供核能發電設施的運行、生產、建設和除役訊息，也評估現有和潛在國家興建中項目的狀況。報告亦比較全球再生能源與核能的發展，發現 2021 年核能發電占比首度低於 10%、風光電力持續大幅成長趨勢並首度超越核電貢獻等結果。報告另就目前國際情勢發展，分別評估戰爭情況下核電廠的安全挑戰，以及福島災後現場與非現場的挑戰。

Abstract

The World Nuclear Industry Status Report 2022 (WNISR2022), published in 5th October, 2022, provides a comprehensive overview of nuclear power plant data, including information on operation, production, construction and decommission of reactors as well as the status of newbuild programs. WNISR2022 also provides the comparison of development between nuclear power and renewable energy, indicating that nuclear energy's share of global commercial gross electricity generation in 2021 dropped to 9.8 percent - the first time below 10%. Meanwhile, wind and solar provided more global power and surpassed the contribution of nuclear power. Further, WNISR2022 provides the evaluation and challenges of two issues as “Nuclear Power and War” and “Fukushima Status”.



一、前言

《世界核能產業工業現況報告》(World Nuclear Industry Status Report, WNISR)自 1992 年開始不定期發布，自 2008 年起改為每年出版，召集人為德國專家 Mycle Schneider，邀集國際專家共同編撰報告，提供國際上核能發展現況、探討重要議題，並以可靠、準確、公正的態度進行評析，是國際間受到高度重視的核能報告。2022 年 10 月 5 日發表的 WNISR2022，由來自加拿大、法國、德國、日本和英國，分別服務於德國、英國、日本頂尖學研機構的九位跨學科專家所貢獻。按慣例該報告提供了核能發電設施的運行、生產、建設和除役訊息，也評估現有和潛在國家興建中項目的狀況。此外，該報告亦比較全球再生能源與核能的發展，並就目前國際情勢發展，撰擬了「核電廠與戰爭」、「福島狀況」等章節，分別評估戰爭情況下核電廠的安全挑戰，以及福島災後現場與非現場的挑戰。另「除役狀況報告」則關注了目前已關閉的 200 多座核反應爐現狀。

二、全球核電發電趨勢

(一)使用核電的國家

WNISR2022 報告指出，核能發電歷史係自 1954 年蘇聯首度將核能發電併網開始（如圖 1），至 1970 年《核武禁擴條約》(nuclear Non-Proliferation Treaty, or NPT) 生效時，緩慢增加為 14 個國家¹。70~80 年代是核能發展的高峰，新增 16 個國家加入使用核電行列²；其後至 2020 年間有 6 個國家（墨西哥、中國、羅馬尼亞、伊朗、阿拉伯聯合大公國和白俄羅斯）首次啟用核反應爐，累計總共 **36 個**國家正在使用或曾經使用核電。截至 2021

¹ 依序為：俄羅斯、英國、美國、法國、德國、加拿大、比利時、日本、義大利、瑞典、西班牙、荷蘭、瑞士、印度

² 依序為：巴基斯坦、斯洛伐克、哈薩克、保加利亞、阿根廷、亞美尼亞、烏克蘭、臺灣、韓國、芬蘭、斯洛文尼亞、匈牙利、巴西、立陶宛、南非、捷克

年底，已有 **3 個** 國家（義大利、哈薩克、立陶宛）分別於 1987、1998、2009 年中止了核電廠的運行；**15 個** 國家正在部署新的反應爐³，可發現多為亞洲國家，其中孟加拉為首次啟用；**18 個** 國家目前沒有任何部署計畫，其中 **8 個**⁴ 國家制定了逐步廢核、不新建或無計畫擴展政策。

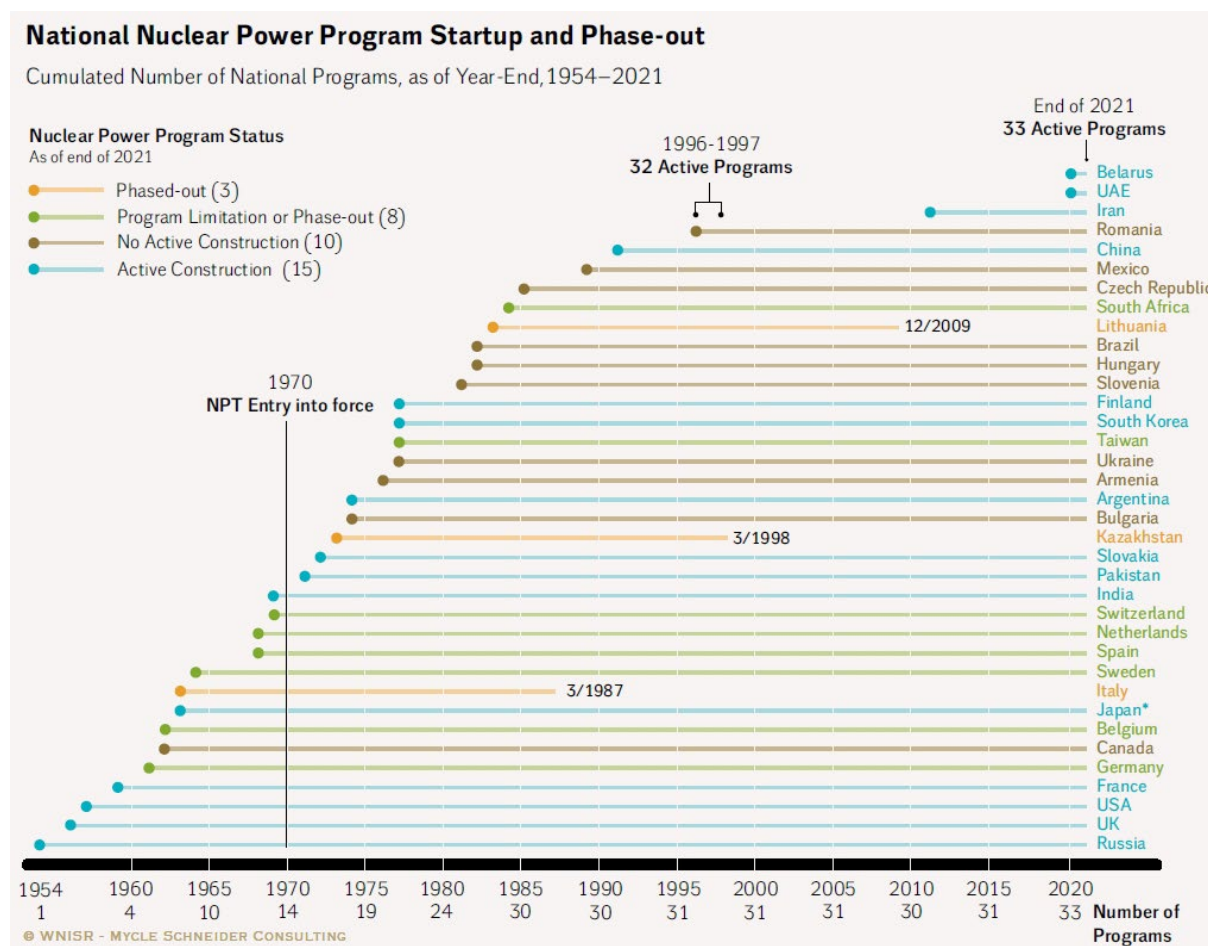


圖 1、全球使用核能發電的國家及啟用期程

(二) 目前 53 座反應爐建置中，亞洲佔 41 座；26 座確定工期延宕

依年度展開全球啟用與關閉的核反應爐數量變化情形(如圖 2)，在 1974 及 1984~85 年的三個年份是顯著成長期，每年分別完成 26、33、33 座反應爐併網；其後則是互有消長，以十年為區間觀察，在 90 年代 (1992~2001)

³ 中國、印度、俄羅斯、韓國、土耳其、孟加拉、斯洛伐克、阿拉伯聯合大公國、英國、美國、阿根廷、白俄羅斯、法國、伊朗、日本

⁴ 南非、臺灣、瑞士、荷蘭、西班牙、瑞典、比利時、德國

共起動 51 座與關閉 25 座，數量比約 2:1；進入 21 世紀的第 1 個十年（2002~2011）則是起動 36 座與關閉 61 座，第 2 個十年（2012~2021）則是起動 62 座與關閉 44 座。進一步觀察 2021 年正在建置中的 **53 座** 反應爐（如表 1），其中有 **10 座** 是 2021 年開始；以國家區域來看，中國 21 座最多，整個亞洲則多達 41 座，東歐國家次之，而這些裝置的供應商主要是俄羅斯（20 座）及中國（17 座），且 90% 以上為發展核武的國家。另外，報告也指出，至少有 **26 座** 反應爐確定比預定時程延後完工。

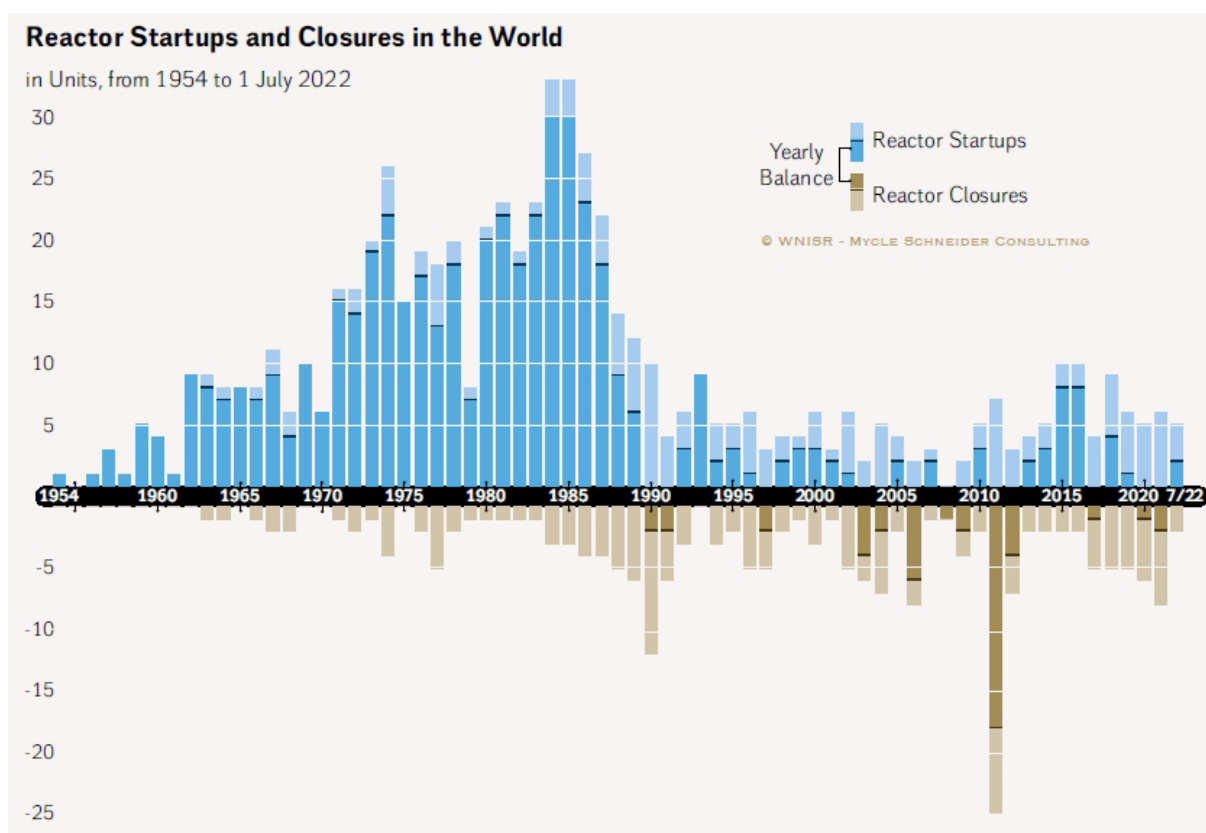


圖 2、全球核反應爐啟用與關閉數量歷年變化



表 1、全球正在建置中的核反應爐（截至 2022 年 7 月 1 日）

項目 國家	反應爐數量			裝置 容量 (MW)	建設開始 (年份)	併網時程 (年份)	施工 延期 (座)
	總數	自主	外購 (供應國)				
中國	21	17	4 (俄)	20,932	2012–2022	2022–2028	3
印度	8	4	4 (俄)	6,028	2004–2021	2023–2027	6
俄羅斯	3	3	0	2,650	2018–2021	2023–2026	0
韓國	3	3	0	4,020	2013–2018	2023–2025	3
土耳其	3	0	3 (俄)	3,342	2018–2021	2024–2026	1
孟加拉	2	0	2 (俄)	2,160	2017–2018	2023–2024	0
斯洛伐克	2	0	2 (俄)	880	1985	2022–2023	2
阿拉伯聯合大公國	2	0	2 (韓)	2,690	2014–2015	2023	2
英國	2	0	2 (法)	3,260	2018–2019	2027–2028	2
美國	2	2	0	2,234	2013	2023	2
阿根廷	1	1	0	25	2014	2027	1
白俄羅斯	1	0	1 (俄)	1,110	2014	2022	1
法國	1	1	0	1,630	2007	2023	1
伊朗	1	0	1 (俄)	974	1976	2024	1
日本	1	1	0	1,325	2007	2025	1
總計	53	32	21	53,260	1976–2022	2022–2028	26

供應商及數量：俄羅斯 20 座、中國 17 座、韓國 5 座、印度 4 座、法國 3 座、美國 2 座、阿根廷 1 座、日本 1 座。

(三)核能裝置數量與容量近四年微幅下滑

觀察全球反應爐數量與裝置容量變化情形（如圖 3），發現運轉中反應爐數量自 1987 年起突破 400 座，其後逐年變化幅度不大。受福島事故影響，於 2012 年數量大幅減少至 383 座，然後略有回升，於 2018 年達到歷史峰值的 449 座；近四年則逐漸下滑，2021 年底減少為 437 座，至 2022 年中持續下降到 411 座。運轉中的裝置容量，發展趨勢基本上與反應爐數量相符，歷史峰值同樣出現在 2018 年，達 396.5 GW，2021 年微降至 364 GW。

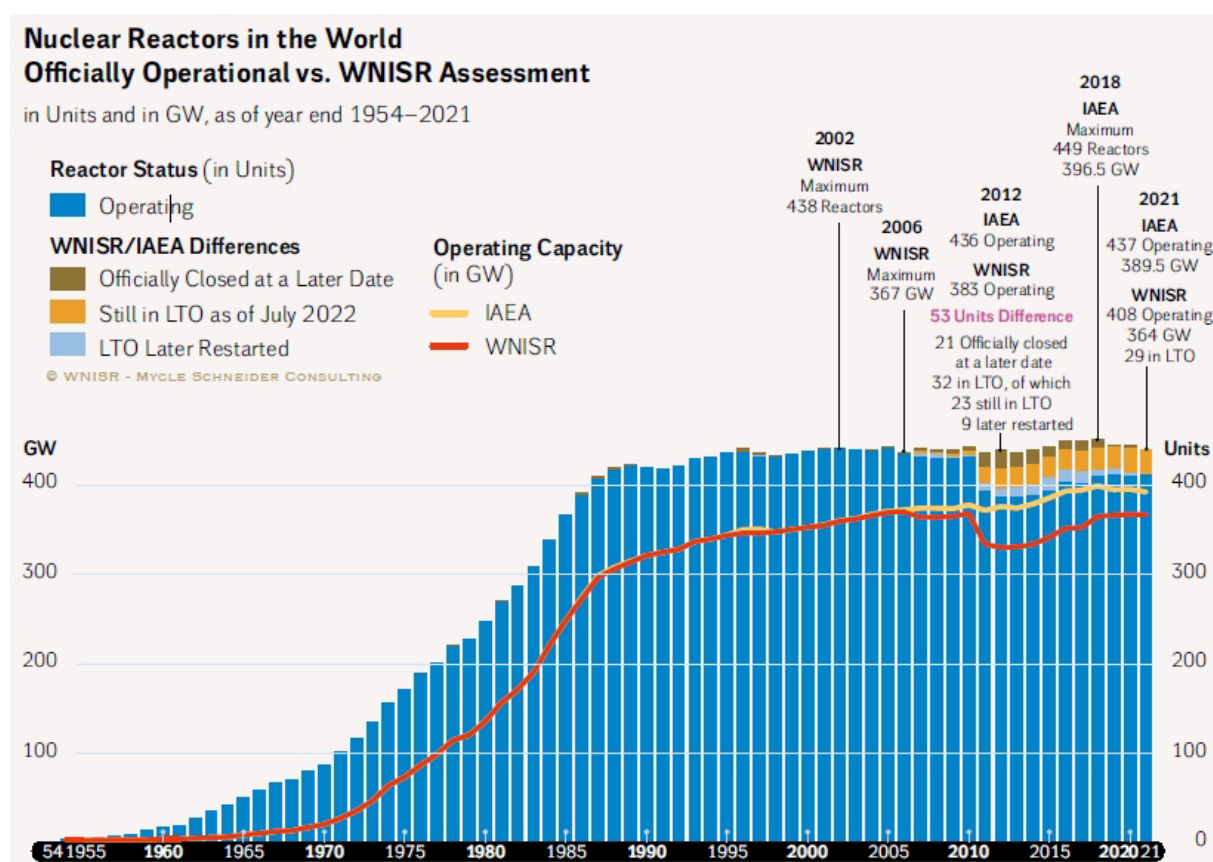


圖 3、全球核反應爐數量及裝置容量歷年變化

(四)核能發電量微幅增加，但發電占比下滑且創下新低

進一步觀察全球核能發電量及發電占比變化情形（如圖 4），發現核能發電量與上述趨勢相符，但峰值出現較早，為 2006 年的 2,660 TWh（2 兆

6,600 億度電)，其後於 2012~2013、2020 年分別有一波小降幅⁵，於 2021 年再回升到 2,653 TWh。發電占比部份，1996 年即出現峰值，達當年度總發電量的 17.5%，其後呈現不斷下滑的趨勢，2021 年降至 9.8%，是 40 年來的新低，也是首次低於 10%，與峰值(17.5%)相比，降幅達 40%。

Nuclear Electricity Production 1985–2021 in the World...

in TWh (net) and Share in Electricity Generation (gross)

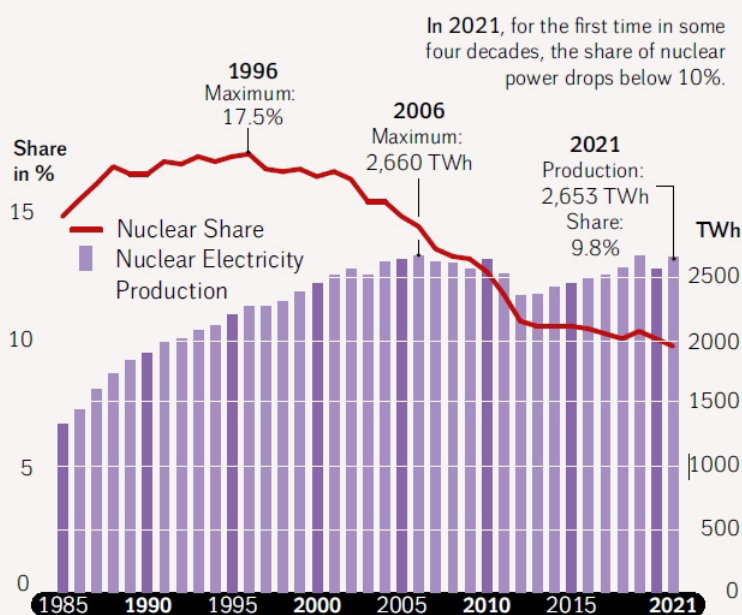


圖 4、全球核能發電量與發電占比歷年變化

報告整理了 33 個使用核能發電的國家在過去兩年的發電量與發電占比變化情形（如圖 5）。僅 6 個國家的發電量達到了該國的歷史新高⁶；發電占比部份，有 7 個國家的核能發電占比較前一年提升⁷，9 個國家下降⁸，17 個國家持平（變化不到 1%）。

⁵ 可能原因為 2011 年福島事故、2020 年新冠疫情

⁶ 依發電量大小排序為：中國、俄羅斯、比利時、捷克、巴基斯坦、阿根廷

⁷ 依發電占比大小排序為：法國、烏克蘭、比利時、日本、巴基斯坦、白俄羅斯、阿拉伯聯合大公國

⁸ 依發電占比大小排序為：匈牙利、保加利亞、芬蘭、瑞典、韓國、亞美尼亞、西班牙、羅馬尼亞、臺灣

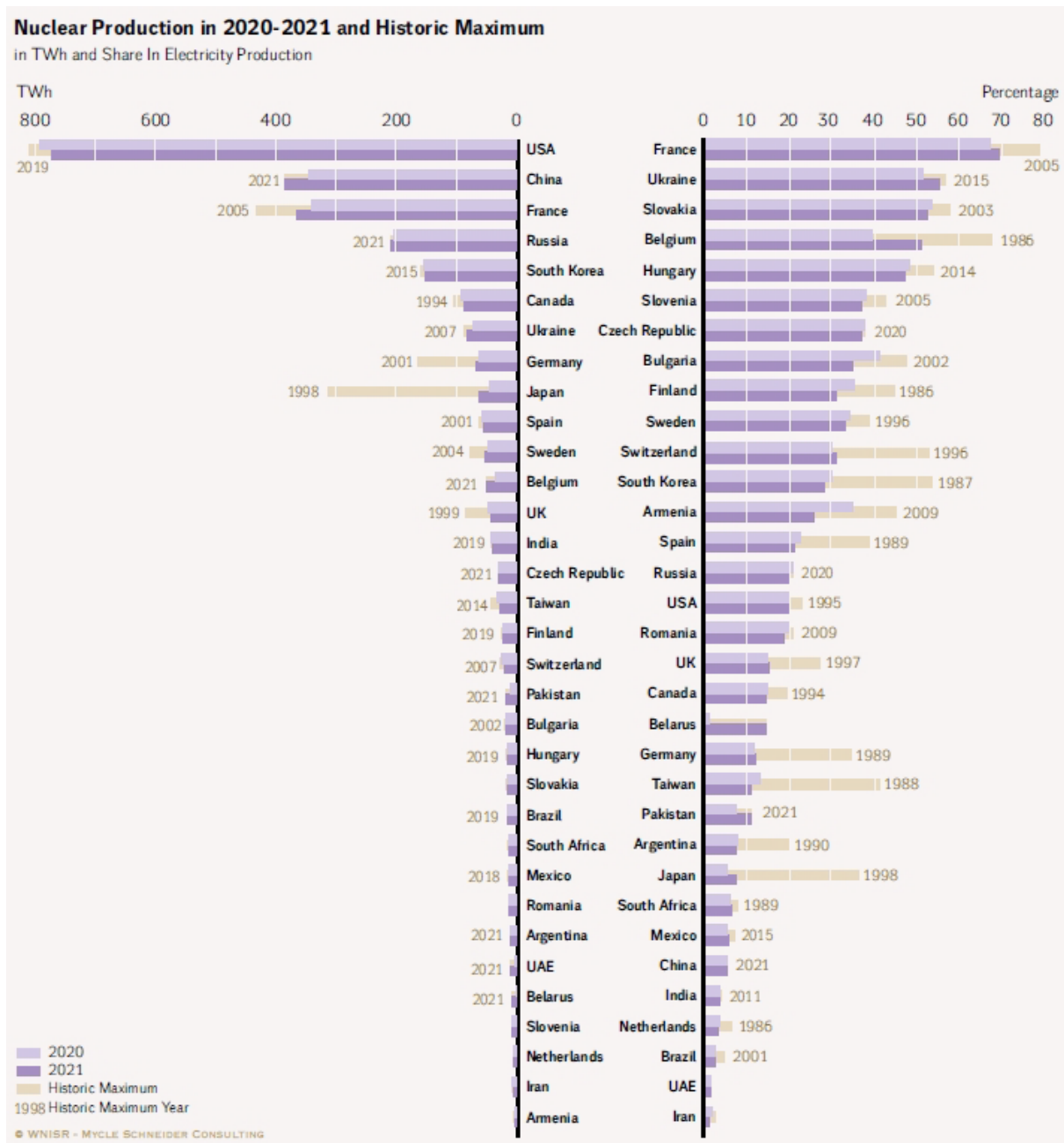


圖 5、各國核能發電量與發電占比近兩年變化情形與歷史峰值

(五)核能機組平均壽命已超過 30 年，且六成機組高於平均值

圖 6 整理了全球 411 座運行中的核反應爐服役年齡，至 2021 年中平均壽命已達 **30.9 年**，有 270 座高於平均值，且有 105 座已超過 40 年的設計年限。以國家別來看，美國與法國的核反應爐平均壽命均高於全球平均，分別為 41.2 年及 36.6 年，預期未來將面臨延役審查或退役除役的負效應。

報告依據兩種情境來預測未來核反應爐的數量變化情形，情境一以目前核電廠設計的 40 年壽命為服役年限，情境二則納入已獲得延役許可且假設該機組可如期服役至許可到期為止。預測結果（如圖 7）顯示，從 2024 年開始裝置數量將逐年下降，係因過去十年施工情形並無大幅提升，平均每年約 6 座反應爐啟動，且建設中的項目多有延遲（如圖 2 及表 1 所示），恐趕不上關閉或除役的數量。

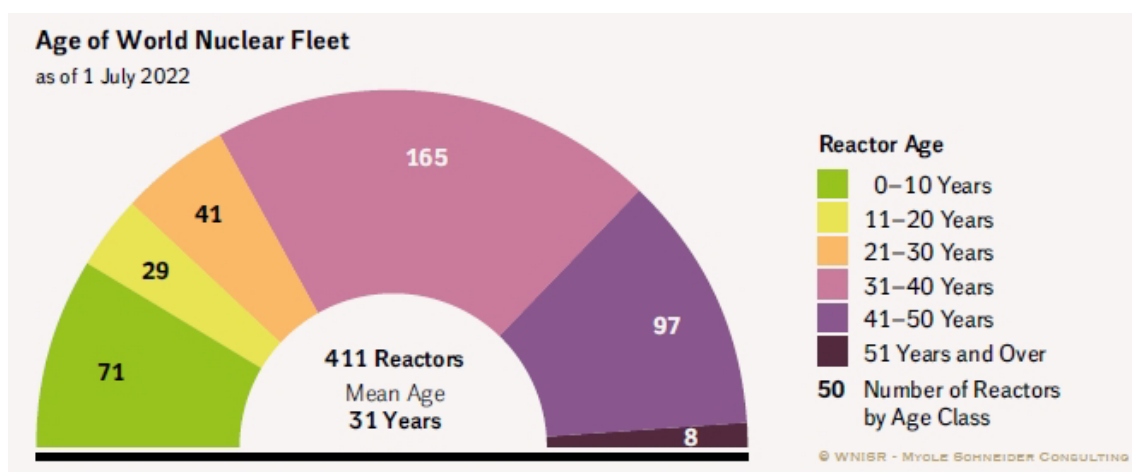


圖 6、全球核反應爐服役年齡分佈情形

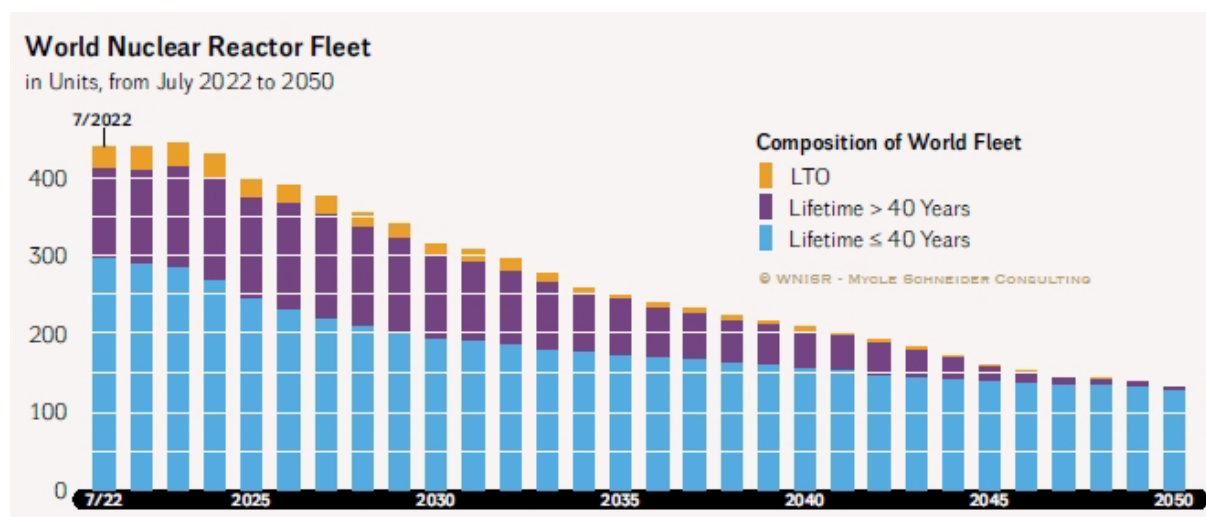


圖 7、至 2050 年全球核反應爐數量變化預測

三、再生能源電力供應超越核電貢獻

(一)風光電力佈建與發電實績持續大幅成長

圖 8 顯示近 20 年全球核能、風能及太陽能的裝置容量與年發電量變化情形。以實績值來看，2021 年全球運行中的核能裝置容量 **364 GW**、核能發電量 **2,653 TWh**，於全球總發電量之占比為 **9.8%**；同時期的風力及太陽光電發電量合計為 **2,895 TWh**（風電：1,862 TWh、光電：1,033 TWh），占比達 **10.2%**，首度超越核電貢獻。

進一步觀察圖 8 的年度變化（相較前一年）及長期變化（裝置容量以 2000 年為基準、年發電量以 1997 年為基準）趨勢，其結果整理如表 2。從裝置容量的短期年度變化趨勢來看，核能持平、風電增加 91 GW（**成長率 12.4%**）、太陽光電增加 138 GW（**成長率 19.4%**）；年發電量短期年度變化趨勢則為：核能增加 100 TWh（**成長率 3.9%**）、風電增加 266 TWh（**成長率 17%**）、太陽光電增加 187 TWh（**成長率 22%**）。

從裝置容量的長期變化趨勢來看，核能增加 40 GW（**成長率 11%**）⁹、風電增加 807 GW（**成長 47.4 倍**）、光電增加 847 GW（**成長 847 倍**）；年發電量長期變化趨勢則為：核能增加 390 TWh（**成長率 3.9%**）、風電增加 1,850 TWh（**成長率 470%**）、太陽光電增加 1,320 TWh（**成長率 260%**）。

綜上所述，目前全球以風力及太陽能為主的再生能源電力，不管是短期還是長期均呈現大幅成長的趨勢。

⁹ 若將長期停機的 25.4 GW 扣除，實際上核能總裝置量僅增加 14 GW，成長率 4%。

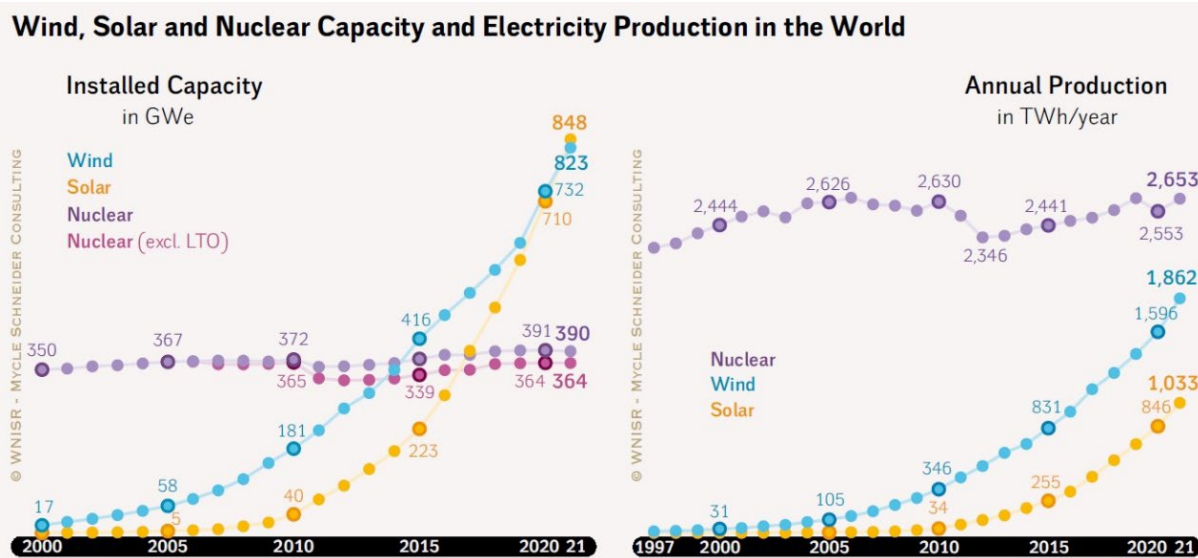


圖 8、全球核電與風光電力之裝置容量與年發電量變化情形

表 2、各發電類型的年度變化及長期變化情形

項目	發電類型	年度變化		長期變化*	
		增加量	成長率	增加量	成長率
裝置容量	核能發電	~0 GW	0%	40 GW	11%
	風力發電	91 GW	12.4%	806 GW	47.4 倍
	太陽光電	138 GW	19.4%	847 GW	847 倍
年發電量	核能發電	100 TWh	3.9%	390 TWh	17%
	風力發電	266 TWh	17.0%	1,850 TWh	470%
	太陽光電	187 TWh	22.0%	1,320 TWh	260%

*長期變化比較基準年分別為：裝置容量 2000 年、年發電量 1997 年

(二)再生能源投資決策高，近年來亞洲已趕上歐美國家

圖 9 顯示 2004~2021 年間全球對幾種能源的投資決策情形，如前所述，2021 年開始建設的核反應爐共有 10 座，其總裝置量約 8.8 GW，總投資約為 **240 億美元**；再生能源方面，扣除水力部份的總投資額達到 **3,660 億美**

元，其中風能和太陽能分別為 1,460 億美元及 2,040 億美元。REN21 的評估報告則指出，2021 年全球在電力部門的總投資，有 69%為再生能源、23%為化石燃料以及 8%的核能，顯示兩份報告評估的趨勢與占比基本上相符。

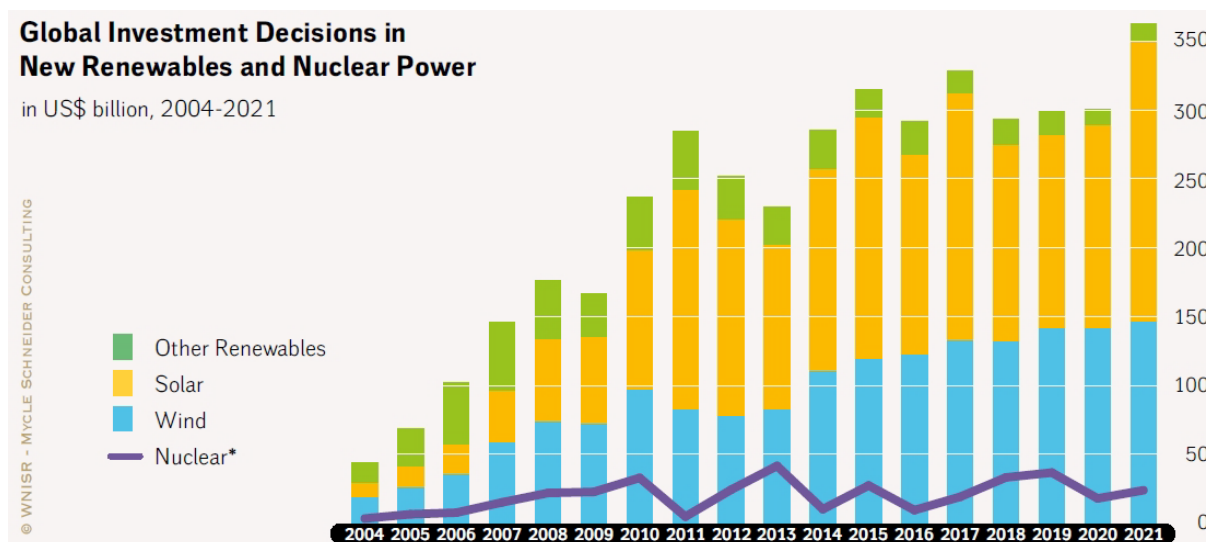


圖 9、2004~2021 年間全球能源投資決策變化情形

圖 10 則顯示了在全球範圍尺度下，區域別的能源投資情形。首先可再次觀察到再生能源與核能的投資額有不小的差異，此外，可看到歐美兩洲對再生能源投資呈現震盪起伏，近五年則是被亞洲地區的加大投資力度所趕上。以中國來看，2008 年對再生能源的投資尚在起步階段（約為 260 億美元），2017 年則成長為 1,420 億美元的歷史新高；近幾年雖受疫情影響且有提高核能的投入，但 2021 年再生能源投資仍有 1,370 億美元的水準，與歐美國家的再生能源總投入相當。

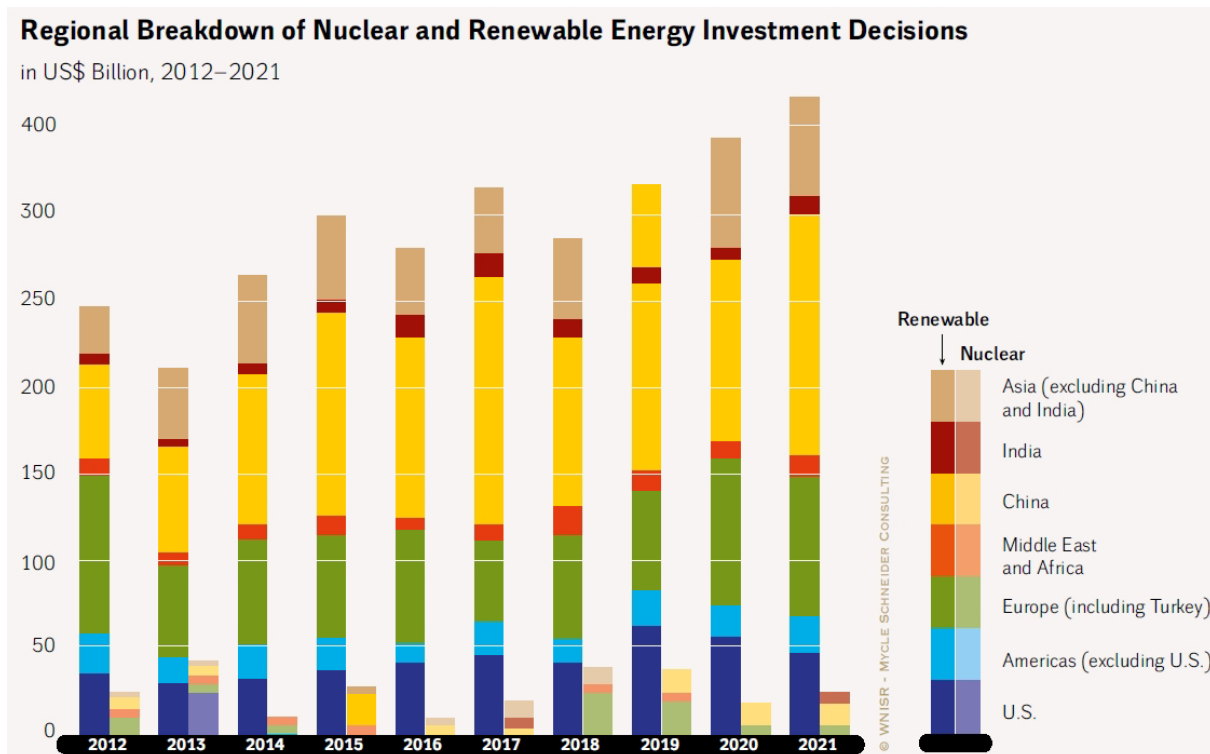


圖 10、2012~2021 年各區域及美中能源投資決策變化情形

(三)再生能源均化成本下降且低於核能及化石燃料均化成本

如圖 11 所示，目前全球範圍內的再生能源發電成本，已大大低於核電、燃煤及燃氣發電成本。進一步觀察變化幅度可發現，在 2009~2021 年間，太陽光電無補貼的均化發電成本由 359 美元/MWh（約每度電新臺幣 10.8 元）下降到 36 美元/MWh（約每度電新臺幣 1.08 元），幅度達 90%；風力發電則從 135 美元/MWh（約每度電新臺幣 4.05 元）下降到 38 美元/MWh（約每度電新臺幣 1.14 元），幅度為 72%；同期的核電成本則從 123 美元/MWh（約每度電新臺幣 3.69 元）上升到 167 美元/MWh（約每度電新臺幣 5.01 元），增長了 36%。

除了該報告所引用的 Lazard 銀行數據外，彭博新能源財經(BNEF)、國際再生能源總署 (IRENA)等機構均有相同趨勢的分析與結論。BNEF 指出風能和太陽能現在是世界上大部分地區最便宜的發電形式，且預計在五年內現有火力電廠的運營成本，將比建造新的光電或風電更昂貴。IRENA 在

年度審查後提出，全球陸上風電新增產能的均化發電成本加權平均後，2021 年的實績值為 **33 美元/MWh**（與 Lazard 的 **38 美元/MWh** 相近），較前一年下降了 15%，而光電實績值則是下降 13%，並評估全球現有的 800 GW 燃煤電廠運營成本高於風光電力的發電成本，若將燃煤電廠全數汰換，每年可減少 **320 億美元** 的系統成本，以及每年 **30 億噸** 的碳排放量。同樣地，核電機組的老化通常會導致更高的運轉及維護成本，以及對安全、環境衝擊可能造成的外部成本，進一步拉大了與再生能源發電成本的差距。

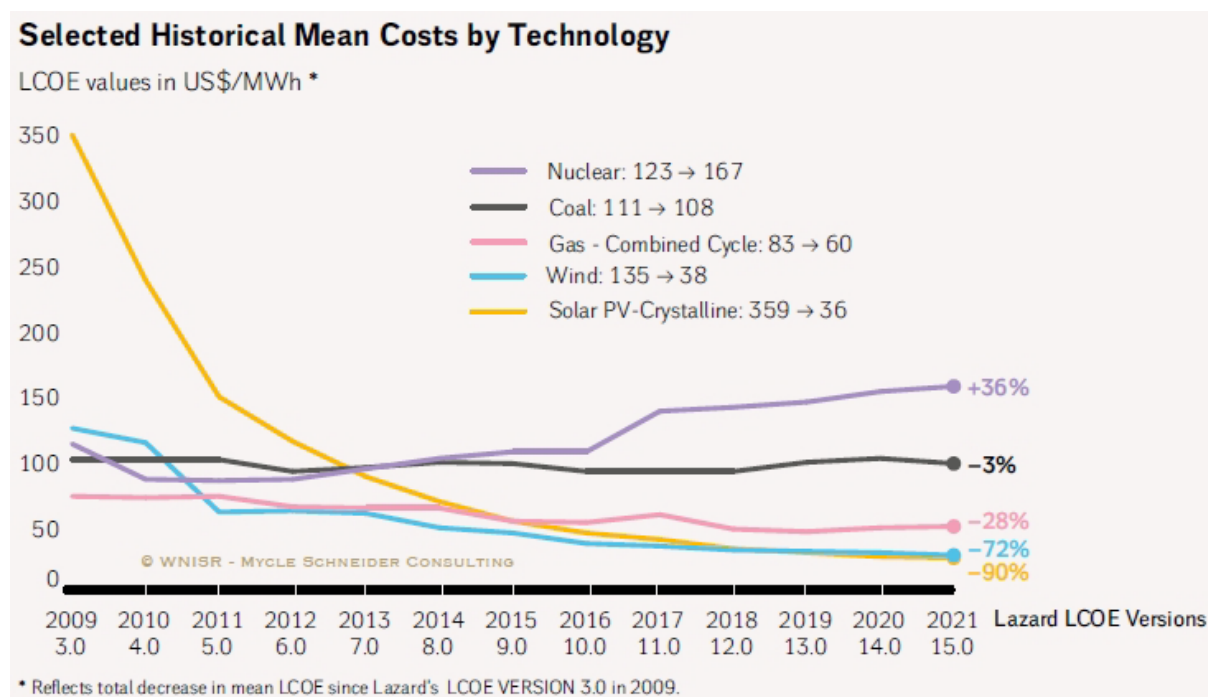


圖 11、2009~2021 年主要能源之均化成本變化情形

四、戰爭與核災對核電的挑戰

該報告追蹤了戰爭期間烏克蘭局勢與核電廠的狀況，以及福島核災的最新情形。戰爭方面，目前世界上沒有核電廠是以戰爭條件下運行的條件所設計，一旦面臨戰爭，關鍵挑戰在於反應爐關閉後，如何持續保持反應爐芯和乏核燃料池的冷卻能力。若殘餘累積的衰變熱無法有效排出，可能導致爐芯在數小時內熔毀，或是乏核燃料池發生火災（數天或數周內），從而導致大量輻射外洩。因此，目前採主動式安全設計的多數核電廠，其以電力趨動、以水為媒介的冷卻系統，存在著許多脆弱性且易受潛在的刻意人為或意外事件影響而失去功能。再者，運行核電設施需要專業、熟練且狀態良好的工作人員，但在戰爭期間或軍事佔領下，操作人員可能會承受嚴重壓力，增加失誤發生率。另外，核電設施定期檢修或因突發狀況需臨時檢修時，外部專家人員以及所需要的備件零組件也可能受戰事影響而無法進入設施或取得，增加核電廠後續運轉的風險與危機。

福島核災方面，目前現場和非現場的局勢仍未穩定。現場的挑戰主要在於機組的乏核燃料池清除、燃料碎片清除及水污染管理。目前安全部門同意排放超過 130 萬 m^3 受污染水至海洋，至少需時 30 年才能完成，然此規劃在日本與國際間仍存在廣泛爭議。非現場的挑戰則是撤離的居民返回災區的意願仍低、食品污染的情況有增加趨勢、受污染土壤的最終處置、健康問題、以及可能提起的訴訟賠償事件等。



五、結論

由全球的核反應爐數量變化（過去與未來預測）、發電占比等趨勢來看，核電發展似已過了高峰期且逐年下降。建置中的核電裝置主要分佈於亞洲（東歐地區次之），顯示未來亞洲的核電將會繼續成長，而歐美大陸主要國家仍是以逐步減核為主軸；核電裝置供應商則以俄羅斯及中國為主，且 90%以上為發展核武的國家所提供，這也表示，由於俄烏戰爭所發起對俄羅斯的制裁，以及潛在的地緣政治情勢變化（如：美中衝突等）均有可能影響核能發展。另一方面，戰爭期間與戰事範圍內的核電廠可能會面臨冷卻系統失效、操作人員壓力、備件零組件短缺等危機，以及核災後對現場與非現場造成的長期影響，則是核電發展時應該要納入考量的議題。此外，受疫情、氣候變遷以及淨零轉型目標等影響，部份國家對核能的政策也有所調整，整體核能發展趨勢尚待進一步觀察。

再生能源發展則受惠於業者投資增加、技術突破、效率提升、建設實績與經驗增加，進而帶動成本下降，然後吸引更多的投資，種種因素形成了良性循環，帶動再生能源發展趨勢不斷上揚，也首度超過核電貢獻，未來仍是國際間用於對抗氣候變遷與達成淨零轉型的主要措施。

資料來源

1. World Nuclear Industry Status Report 2022

<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2022-.html>

2. 報告：全球核電比重創新低 風力與太陽能首度超前

<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202210060013.aspx>