

PART 3

.....

經濟社會

- 第十二章 中國核能工業的發展與挑戰
- 第十三章 中國能源轉型及其面臨的挑戰
- 第十四章 習近平的金融改革
- 第十五章 中共社會治理革新：中央與地方社會工作體系的建置
- 第十六章 持續惡化的中國網路與言論環境
- 第十七章 中國「數字絲綢之路」發展現況與未來趨勢

第十二章 中國核能工業的發展與挑戰

黃恩浩*

壹、前言

近年面臨激增的能源需求，中國核能工業的發展相當快速，已具備自主設計建設第三代核電機組的能力，中國將成為未來世界上最大的核電廠市場，美國作為全球核能大國地位將會受到挑戰。核能發電在中國能源安規劃全和經濟發展戰略中主要扮演三個角色：第一，發展核電可以增強能源供應安全，因為核電可提供大量「基本負載電力」（Baseload Power），而且對技術和燃料的進口要求卻很少；第二，核能工業在二氧化碳排放和空氣污染方面相對清潔，至少與中國目前主要的燃煤火力發電相比是如此。隨著裝置容量的擴大，核電在減少中國碳排放方面可以發揮的作用愈來愈大；第三，中國過去 40 多年核能技術成功「國產化」已成為其工業戰略的一部分，並可減少對國外能源與技術的依賴。由於中國領導人習近平於 2020 年底的第七十五屆聯合國大會中，承諾要在 2030 年達到「碳達峰」及 2060 年達到「碳中和」。因此，本文所要分析的議題是，究竟這「雙碳政策」目標對中國當代核能工業發展有什麼影響與挑戰？

自 2000 年以來，隨著中國核能工業的快速發展，中國可說是當今國際上部署最多民用核電廠的國家。根據「世界核能協會」（World Nuclear Association, WNA）的統計，自 1985 年中國建立第一座核電廠以來，目前正在運作的核反應爐數量已經增加到 56 座，另還有 26 座正在建造中，¹企圖達成在「2035 年核能滿足電力需求 10%」的目標。²於 2019 年至 2023

* 黃恩浩為財團法人國防安全研究院國防戰略與資源研究所副研究員。

¹ “Nuclear Power in China,” *World Nuclear Association*, February 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>.

² 白宇，〈張廷克：2035 年核能發電量占比將達 10% 左右〉，《中國能源新聞網》，2024 年 4 月 15 日，https://www.cpnn.com.cn/news/hy/202404/t20240415_1693192.html。

年間，中國核能發電占總發電總量已提升到平均 4.5% 左右（圖 12-1），可運轉核電容量高達約 54,362MW（百萬瓩 / 度）（圖 12-2）。在 2020 年，中國核能發電量已經超過核電大國法國，而成為僅次於美國的全球第二核電大國，中國當前對核電的投資已經占全球新增核電投資的一半

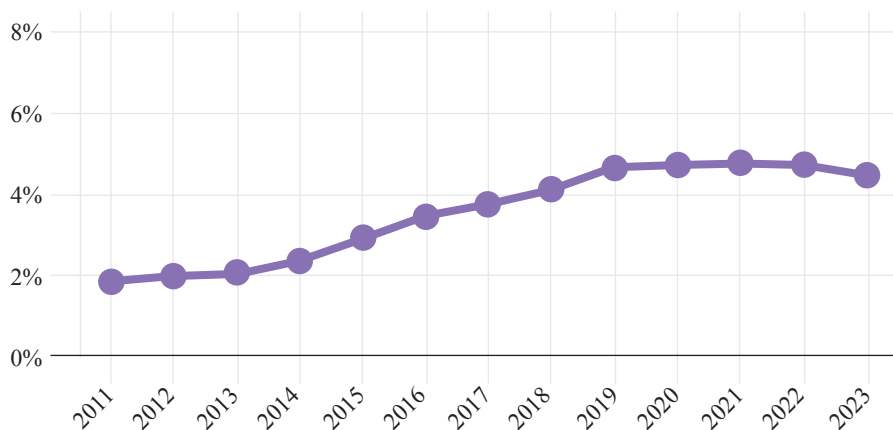


圖 12-1 中國核電占總發電量的百分比

資料來源：〈中華人民共和國 2023 年電力數據〉，《低碳力》，2024 年，<https://lowcarbonpower.org/zht/region/中華人民共和國>。

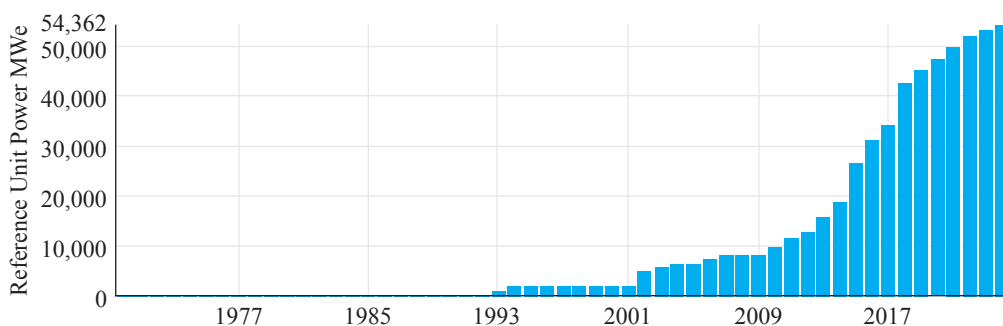


圖 12-2 中國可運轉核電容量

資料來源：“Nuclear Power in China,” *WNA*, February 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>.

以上。目前中國核電總量約 5,700 萬瓩 / 度，未達「十四五規劃」定調的 7,000 萬瓩 / 度，但其核能擴張速度仍居全球之冠。³

基於習近平在 2020 年承諾要於 2030 年前要達到碳排放峰值，並力爭在 2060 年實現碳中和，這「碳达峰」與「碳中和」的「雙碳政策」目標亦被列入中國「十四五規劃」中，這使得發展核電支持能源低碳轉型的潛在作用更加明顯。在 2021 年 10 月，中國國務院更重申核電將在 2030 年之前實現碳排放峰值方面發揮重要作用。⁴ 外界目前對未來中國核能發電能量的預測差異相當大，例如：相較於 2021 年的 407TW（百萬兆瓩 / 度），在 2035 年將從 1,000TW 提升到 2,000TW；2050 年將從 3,000TW 提升到 4,000TW。⁵ 在 2018 年 11 月更有《路透社》（*Reuters*）消息表示指出，核電總容量在 2030 年左右將可能達到 120GW 到 150GW（十億瓩 / 度）。⁶ 然而，目前正在建設中容量為 23.5GW 電廠，預計在 2022 年到 2028 年間連接電網，並且還有 43.6GW 電廠在規劃中，因此到 2030 年容量達到 100GW 電廠的可能性相當大。另外，「中國核能協會」（China Nuclear Energy Association）聲稱中國可以加速完成反應爐的建設，從每年 6 座到 8 座提升至每年 10 座，預計於 2030 年將擁有更多安裝容量達 300GW 的電廠（圖 12-3）。⁷

就核能發展戰略而言，中國主要是以「熱堆—快堆—聚變堆」（熱中子核反應爐—快中子核反應爐—核融合爐）的「三步走」發展戰略，

3 盛嘉麟，〈中國電力發展領先世界〉，《中時新聞網》，2023 年 5 月 7 日，<https://www.chinatimes.com/opinion/20230507003013-262110?chdtv>。

4 中華人民共和國國務院，〈國務院印發《2030 年前碳达峰行動方案》〉，《新華社》，2021 年 10 月 26 日，https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/26/content_5645001.htm。

5 Sha Fu, Xuan Du, et al., “China’s New Growth Pathway: From the 14th Five-Year Plan to Carbon Neutrality Synthesis,” Report 2020 on China’s Carbon Neutrality, *Energy Foundation*, December 2020, https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2020-12/Full%20Report_Synthesis%20Report%202020%20on%20China%27s%20Carbon%20Neutrality_EN.pdf。

6 “China Likely to more than Triple Nuclear Power Capacity by 2030 - Official,” *Reuters*, November 18, 2018, <https://www.reuters.com/article/idUSL4N1XJ3AR/>。

7 “China Able to Accelerate World’s Fastest Nuclear Power Expansion,” *Bloomberg News*, March 5, 2024, <https://www.bnnbloomberg.ca/china-able-to-accelerate-world-s-fastest-nuclear-power-expansion-1.2042616>。

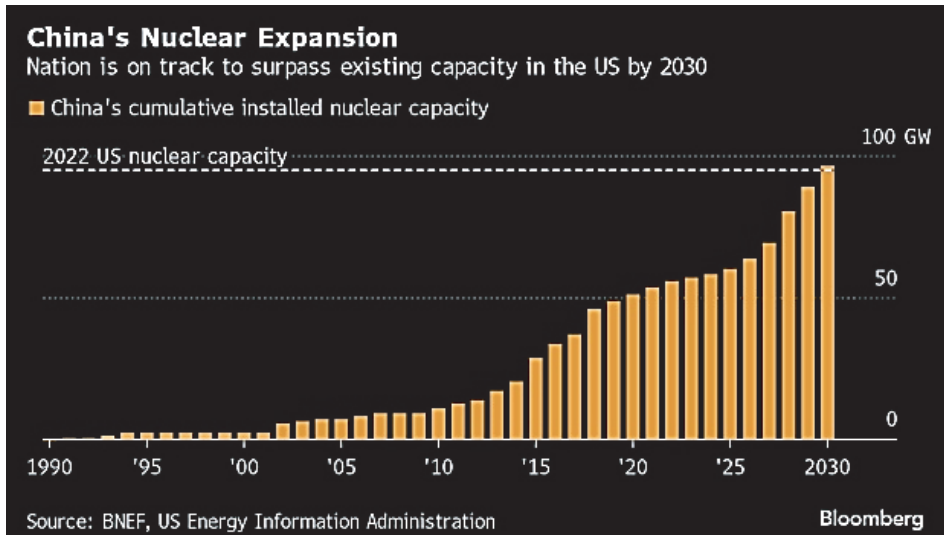


圖 12-3 中國的核能擴張

資料來源：“China Able to Accelerate World’s Fastest Nuclear Power Expansion,” *Bloomberg News*, March 5, 2024, <https://www.bnnbloomberg.ca/china-able-to-accelerate-world-s-fastest-nuclear-power-expansion-1.2042616>.

該戰略是中國相關部門與科學家在 1983 年北京舉行的「核能發展技術政策論證會」上首次提出，也是中國目前核能發展的總體戰略。⁸ 在可預見的未來，中國若持續積極擴張核電產能，中國將可能在 2030 年之前超過核電總量領先全球的美國。到 2030 年之後，如果中國核能工業發展能夠成功從傳統核分裂（熱中子反應爐）過渡到更先進的核分裂（快中子反應爐）或核聚變（核融合）系統，那麼中國將在核能發電技術的開發和部署方面領先世界各國。一旦如此，中國可能會在具有戰略意義的核能領域占有主導地位，此不僅會影響全球核能技術、核安全、核擴散，也會影響氣候變遷、電力政策、國際貿易和多邊治理等議題。⁹ 本文研究重點在於，

⁸ 白宇，〈快堆發展後勁十足〉，《中國能源新聞網》，2024 年 4 月 10 日，https://www.cpn.cn/news/hy/202404/t20240410_1691981.html。

⁹ Philip Andrews-Speed, “Nuclear Power in China: Its Role in National Energy Policy,” *The Oxford Institute for Energy Studies (OIES) Paper*, January 6, 2023, pp. 6-7.

探討中國目前核能工業在「雙碳」目標下的建設，以及其核能政策發展可能面臨的挑戰。

貳、當代中國核能工業的發展

於 1953 年的中國第一個五年計畫中，首次提及民用核能發展的可能性，但隨後因為注意力轉向開發原子彈而被擱置一段很長時間。¹⁰ 早在 1969 年，中國在軍事上就已經成功開發了核動力潛艦反應爐，但直到 1970 年因上海發生電力供應危機才逐漸將民用核能重新納入國家議程。即便如此，核能進展仍然緩慢，因為當時負責核事務的關鍵機構（國務院工業和信息化部的國家航天局與國家原子能機構）都不願將發展核能的注意力從軍事轉為民用，加上當時中國國務院的水利電力部也不支持民用核能發電，北京政府直到 1978 年才正式宣布中國將發展民用核能。¹¹ 然而，當時不同政府機構間對於不同核能技術選擇仍存有政治鬥爭，爭論問題包括：究竟是要發展「壓水反應爐」（Pressurized Water Reactor, PWR）或是「壓水重水反應爐」（Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR）？以及，究竟是要進口技術還是發展本土技術？¹² 中國當時主要偏好壓水堆反應爐（PWR），並在技術上採用了外國設備和中國設計相互結合的折衷方案。該方案催生了浙江省秦山一號電廠的建設，該電廠容量為 300MW。廣東省大亞灣還建有 2 個 944MW 的反應爐，採用法國設計，香港中電集團作為合資企業的合作夥伴，這些首批電廠都已在於 1994 年投入商業運營。¹³

¹⁰ Benjamin K. Sovacool and Scott V. Valentine, *The National Politics of Nuclear Power: Economics, Security, and Governance* (London: Routledge, 2013), pp. 190-208.

¹¹ Yi-chong Xu, *The Politics of Nuclear Energy in China* (Hampshire: Palgrave Macmillan, 2010), pp. 16-47.

¹² M.V. Ramana and Eri Saikawa, "Choosing A Standard Reactor: International Competition and Domestic Politics in Chinese Nuclear Policy," *Proceedings of the ICE, Energy*, Vol. 36, No. 12, November 2011, pp. 6779-6789.

¹³ Xu, *op cit*.

在中國首批核電廠投入運營後，北京決定在「適度發展核電」政策下建造另外 4 座核電廠，以維持技術專業但限制資本需求。時任總理李鵬是該政策的主要支持者。由於政府決策分散、企業參與者數量的增加，以及與外國政府和供應商的互動日益增多，核子反應爐設計決策的政治背景比以前更加複雜，結果導致這 4 座核電廠採用了美國、俄國、法國、加拿大等四個國家的四種不同設計。這種分散的核能發展策略違背了傳統觀念，即「標準化」的反應爐設計可以降低成本並提高建造、運作和維護效率，從而提高安全性。¹⁴ 然而，當時的這種分散式決策卻允許中國可以嘗試國外不同的合作夥伴和核能技術，並可避免一系列標準化核電廠「通用設計」問題所帶來的可能風險。

在 21 世紀的今天，對於大規模、低排放的基本負載能源需求觸發了全球對核能的興趣，就如同水電一樣。根據中國 2005 年到 2020 年《中長期核電發展規劃》設定了到 2020 年運營 45GW（百萬瓩／度）的目標，新建廠位於沿海和內陸快速經濟增長的地區。¹⁵ 再者，隨著全球對溫室效應和空氣污染相關議題的擔憂，各國開始更加強調核能對環境的益處。中國早在「十二五規劃」（2011-2015 年）中就將 2020 年的目標提高到 80GW。到那時，中國已有 3 家公司在發展和投資核能，北京對核能提供的優惠電價也遠高於燃煤電力。自 2000 年以來，中國將更新核電廠設備視為其核能政策的一部分，北京乃於 2004 年啟動了第三代核電機組的招標程序，最後由美國西屋電氣公司（Westinghouse Electric）的 AP-1000 反應爐和法國阿海珐公司（Areva）的歐洲壓水反應爐（EPR）得標，並於 2009 年開始建造首批第三代核電機組，直到 2018 年才完全投入使用。

中國核工集團（CNNC）和中廣核集團（CGNPG）在法國提供的核能技術基礎上，開發了與法國有略有不同的反應爐設計，就是自主研發的「華龍一號」反應爐。¹⁶ 其中兩個華龍一號反應爐分別於 2021 年 1 月和

¹⁴ Ramana and Saikawa, op cit.

¹⁵ 呂錫民，〈中國核電現狀與未來〉，《工程與技術》，第 9 卷第 24 期，2019 年 12 月，頁 125-138。

¹⁶ “Hualong One Joint Venture Officially Launched,” *World Nuclear News*, March 17, 2016, <https://www.world-nuclear-news.org/c-hualong-one-joint-venture-officially-launched-1703164.html>.

2022 年 3 月投入商業運營。現實而言，中國逐步實現核能技術本土化有兩個意涵：首先，這意味著中國的核能發展將不受美中雙方關係惡化所影響；其次，有利於中國相關研究機構和企業開發各種新技術並進行出口，這些項目包括：高溫氣冷、熔鹽和快中子反應爐，以及浮動式核電廠與核融合（核聚變）。值得關注的是，華能集團首次運行的兩個「高溫氣冷核反應爐」（High Temperature Gas-cooled Reactor, HTR）已於 2021 年 12 月接入電網。¹⁷ 根據《南華早報》在 2021 年的報導，中國核工和中廣核集團都計畫要在南海建造遠洋浮動核子反應爐。¹⁸

中國在 2011 年日本福島第一核電廠發生事故後，曾放緩整體核電的發展，所有新建廠的建設被暫停，所有正在運營或建設中的廠房都要接受安全檢查，在內陸地區建廠的計畫也被擱置。直到於 2012 年底，北京才允許重新啟動沿海廠的建設（圖 12-4），但因安全之故乃將 2020 年的核電容量目標從 80GW 降至 58GW。¹⁹ 截至 2022 年 6 月，中國核能已投入運營的核電容量為 55.8GW，仍低於 2020 年修訂後的目標。²⁰ 雖然目前未達到 2020 年核電容量的目標，但在「十四五規劃」（2021-2025 年）卻設定核電安裝容量到 2025 年要達到 70GW 的目標。²¹ 自 2022 年底起，另外有 23.5GW 的容量核電廠正在建設中，預計將在 2022 年到 2028 年期間連接到電網，其計畫中的容量為 43.6GW 亦未超過 2020 年的標準。²² 自 1990 年代以來，中國就透過多種政策與途徑來支持民用核電發展，在目前強調「雙碳」的能源政策下，中國更重視核電發展，做法如下：第一，

¹⁷ “Nuclear Power in China,” *World Nuclear Association*, February 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>.

¹⁸ Stephen Chen, “China’s First Floating Nuclear Reactor May Withstand Once-in-10,000-years Weather Event, Engineers Say,” *South China Morning Post*, December 14, 2021, <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3159566/chinas-first-floating-nuclear-reactor-may-withstand-once-10000>.

¹⁹ Y. C. Xu, “The Struggle for Safe Nuclear Expansion in China,” *Energy Policy*, Vol. 73, October 2014, pp. 21-29.

²⁰ “China Keeps Enlarging Nuclear Power Generation Capacity in 2022,” *The State Council of the PRC*, June 26, 2022, https://english.www.gov.cn/news/videos/202206/26/content_WS62b7b0b7c6d02e533532cc28.html.

²¹ *World Nuclear Industry Status Report 2022* (Paris: MacArthur Foundation et al., October 2022), pp. 66-70, <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-lr.pdf>.

²² “Nuclear Power in China,” op cit.

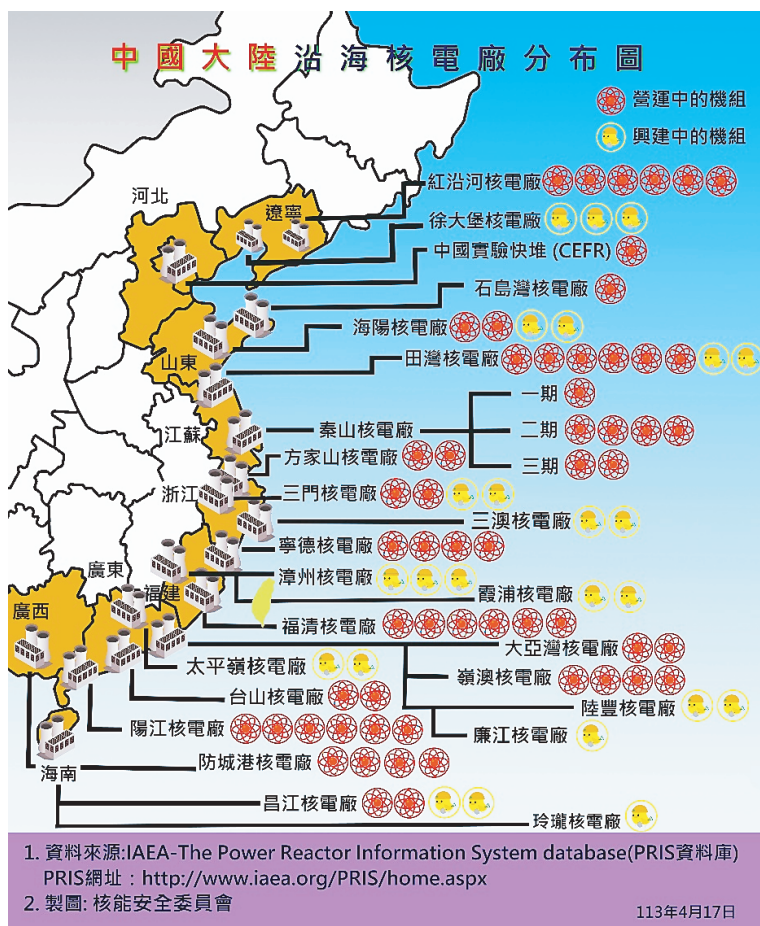


圖 12-4 中國大陸沿海核電廠分布圖

資料來源：行政院核能安全委員會，2024 年 4 月 17 日，<https://www.nusc.gov.tw/施政與法規/政策與計畫/兩岸交流專區/中國鄰近台灣核電廠分布圖> (2024.04) --2_15_2535_5260.html。

核電廠通常會獲得優惠的售電價格和運行時間分配。雖然電力市場改革有可能破壞這種優惠待遇，但最近能源安全的焦點導致了這種優惠待遇的延續；第二，政府透過國家開發銀行等國營銀行，向主導中國核電產業的大型國營企業提供廉價債務資本；第三，中央和省級政府協助整合土地並安排新核電廠址的輸電連接。

參、中國核反應爐技術的演進

中國近年積極擴張核能的動力來自於，一方面不僅要滿足巨大國內經濟發展對能源需求，另一方面則是試圖以擴大核電來降低燃煤發電所產生的碳排放問題。中國擴大核能的使用的確為全球氣候變遷帶來了好處，卻也帶來了地緣政治挑戰；換言之，中國的核實力和安全承諾有利於核反應爐技術發展，更有利於中國的能源安全、電網穩定、經濟發展、減少空污，以及減緩全球氣候變化。然而，麻省理工學院核科學與工程教授布翁吉奧諾（Jacopo Buongiorno）就提出警告：「如果中國開始向其他國家出口核能技術，人們擔心的是此類計畫將導致這些國家對中國地緣政治經濟的依賴，當然這樣的邏輯也適用於俄國。」²³ 關於全球核反應爐的技術分類與發展，主要是依據美國能源部在推出第四代核反應爐概念時提出四代技術類型為基礎。²⁴ 中國民用核反應爐的技術發展主要是從西方國家引進第二代技術開始，概要分析如下：

一、第二代反應爐

第二代反應爐是一系列於 1990 年代前所建造的商業核反應爐的總稱，類型包括：壓水反應爐（PWR）、加拿大氘鈾核反應爐（Canadian Deuterium-Uranium Nuclear Reactor, CANDU）、沸水反應爐（Boiling Water Reactor, BWR）、改進型氣冷反應爐（Advanced Gas-cooled Reactor），以及俄國「水—水高能」反應爐（Water-Water Energetic, WWER / Voda Voda Energo Reactor, VVER）等。就中國而言，其擁有的第二代反應爐為法國

²³ Catherine Clifford, “How China Became the King of New Nuclear Power, and How the U.S. is Trying to Stage A Comeback,” *CNBC*, August 30, 2023, <https://www.cnbc.com/2023/08/30/how-china-became-king-of-new-nuclear-power-how-us-could-catch-up.html>.

²⁴ Tooraj Jamasb, William J. Nuttall, and Michael G. Pollitt, *Future Electricity Technologies and Systems* (Cambridge: Cambridge University Press, 2006). 補充說明：第一代反應爐（Generation I reactor, Gen I）是指美國在 1950 年代到 1970 年代所建造的商用反應爐，其為一系列的早期實驗性核反應爐與電站，包括：碼頭市核電站（Shippingport Atomic Power Station）、鎂諾克斯氣冷反應爐（Magnox Reactor）、天然鈾石墨氣冷反應爐（UNGG Reactor）、恩里科·費米核電站（Enrico Fermi Nuclear Power Station）以及德勒斯登核電站（Dresden Nuclear Power Plant）等。

法馬通公司（Framatome）進口的 M310 與中國核工業集團公司研發的 CNP300 和 CNP600。²⁵

二、第二代升級版反應爐

在 PWR 基礎上，中國將 1990 年代從法國阿海珐公司所引進的 900MW 三冷卻迴路設計，升級為淨輸出功率 1,000MW（1,080MW 總輸出功率），且可使用壽命為 60 年的反應爐。中國將此升級版的第二代反應爐稱為「中國升級版壓水核反應爐」（China Pressurized Reactor, CPR），簡稱 CPR-1000。這是中國目前使用最多的核反應爐類型，目前有 22 個機組在運行，大部分組件都在中國建造。由於法國阿海珐公司對 CPR-1000 仍保有技術上的智慧財產權，所以牽制了中國 CPR-1000 技術的出口。²⁶

三、第三代反應爐

第三代核反應爐的安全性和經濟性都明顯優於第二代反應爐，包括：先進的核燃料管理技術、更高的熱效率、被動核安系統與標準化設計，因此第三代比第二代的維護和投資成本更低。在中國運作中的第三代核反應爐下列幾種：

（一）加拿大 CANDU-6

目前中國有 2 座 CANDU-6 核反應爐（重水反應爐）分別坐落中國浙江的秦山核電廠，其中第一座和第二座機組在 2002 年和 2003 年分別上線。CANDU 核反應器使用燃料可以來自傳統核反應爐的低階再加工鈾，從而減少中國核燃料庫存量。²⁷

²⁵ Jamasb, et al., op cit.

²⁶ 呂錫民，〈中國核電現狀與未來〉。

²⁷ 〈中國浙江的秦山核電廠〉，《當代中國》，2022 年 12 月 15 日，<https://www.ourchinastory.com/zh/5383/秦山核電廠併網發電>；<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20220207004547-260408?chdtv>。

（二）中國 ACPR1000

ACPR1000 是中廣核集團借鑑了日本福島核災經驗，並在第二代 CPR1000 核電技術的基礎上自行研發出的第三代產品，配備了非能動應急高位冷卻水源系統與改進移動式應急電源等多項技術。在核電「走出去」的政策方向上，中國正積極將 ACPR1000 模組標準化、系列化、規模化，以利於出口。²⁸

（三）中國 HPR1000

自 2011 年以來，中廣核集團和中國核工集團將 ACPR1000 和 ACP1000 設計逐步合併，自主開發成名為「華龍一號」的 HPR1000 反應爐。前兩者都是三迴路設計，原先依據法國相同設計，但具有不同的核心，這是屬第三代的 PWR 核電技術。該反應爐設計壽命為 60 年，且採用具有雙層安全殼的被動及主動安全系統組合，是中國出口海外的重要核能技術。²⁹

（四）中國 ACP100

ACP100 是「先進中國壓水爐 100 兆瓦級」的全球首個小型壓水反應爐，又稱「玲龍一號」，亦有 ACP10 與 ACP25 等不同功率規模的型號。該反應爐是中國核工集團所推出先進第三代核電技術的「小型模組化反應爐」（Small Modular Reactor, SMR），採用非能動堆芯冷卻系統、非能動餘熱排出系統、非能動安全殼空氣冷卻系統、自動洩壓系統和非能動可燃氣體控制系統，亦被歸類為第四代反應爐。³⁰ ACP100 適用於分散式

²⁸ 李廈，〈紅沿河核電 6 號機組具備商運條件，我國在運最大核電站全面投產〉，《新浪財經》，2022 年 6 月 23 日，https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-06-23/doc-imizirav0198890.shtml?cre=tianyi&mod=pcpager_mil&loc=23&r=0&rfunc=42&tj=cxvertical_pc_pager_spt&tr=174&wm=5#/index/1。

²⁹ 江飛宇，〈大陸「華龍 1 號」反應爐 通過英國核管標準〉，《中時新聞網》，2022 年 2 月 7 日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20220207004547-260408?chdtv>。

³⁰ 曾智怡，〈導入第四代核能技術？原能會：核廢料處理最棘手〉，《中央社》，2022 年 11 月 30 日，<https://www.cna.com.tw/news/afe/202211300248.aspx>。

發電，還能放置於船上成為海上「浮動核電廠」（Floating Nuclear Power Plant, FNPP），為海上平台與島礁等迅速供電，不須連結在他國建設核電廠電網，只需將浮動核電廠駛入港接電即可完成，且機動性與安全性極高不受緊急事件影響。³¹ 儘管中國目前的 FNPP 發展項目尚不明朗，³² 但中國預計在 2026 年開始將 SMR 投入運作，未來將可能用於建造核動力破冰船與核動力航空母艦。³³

（五）中國 CAP1000 與 CAP1400

中國在 2006 年決定引進美國西屋電氣公司的 AP1000（Advanced Passive PWR）三代核電技術，並決定建設浙江三門一期工程和山東海陽一期工程作為引進技術的專案。AP1000 是一種雙迴路 PWR 的 1,000MW 核電機組，主要特點在於採用被動式安全系統，使得安全相關系統和部件大幅減少，具有競爭力的發電成本、60 年的設計壽命、數位化控制，並且易於建造與滿足客戶需求。於 2008 年，中國以國家設立大型先進壓水爐核電站科技重大專項，企圖在引進 AP1000 技術及專案建設的過程中，並將移轉的 AP1000 技術「國產化」，稱為 CAP1000（China Advanced Passive PWR）。於 2008 年和 2009 年，西屋公司、國家核電技術公司（State Nuclear Power Technology Corporation, SNPTC）與中國達成協議，要開發規模更大的 AP1000，並於 2015 年 4 月名為「國和一號」的 CAP1400 計畫通過國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）通用

³¹ 吳京澤，〈「玲龍一號」全球首堆外穹頂吊裝完成〉，《新華網》，2024 年 2 月 6 日，<http://www.xinhuanet.com/photo/20240206/602f05709be24e848a42e5290135e62d/c.html>。

³² 藍孝威，〈陸在南海部署浮動核反應堆，美憂恐引發災難性後果〉，《中時新聞網》，2024 年 5 月 11 日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240511001077-260409?chdtv>。

³³ 張國威，〈核動力航母練手，陸開建核破冰船〉，《中時新聞網》，2018 年 6 月 28 日，<http://tw.sports.yahoo.com/news/核動力航母練手-陸開建核破冰船-215010653--finance.html>；楊俊斌，〈陸造核動力破冰船，闖北極新航道〉，《中時新聞網》，2020 年 2 月 9 日，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20200209000119-260301?chdtv>。補充說明：中國打造核動力破冰船不僅是為了因應北極航道與南極科研的需求，也是為了建造核動力航母鋪路，而這在美蘇軍事發展史上都有先例，例如：美國在研製其首艘核動力航母企業號之前，就曾建造了核動力貨輪、驅逐艦和巡洋艦；前蘇聯則是通過建造核動力破冰船，為研製大型核動力水面戰艦積累了豐富的經驗。

反應爐安全審查。³⁴ CAP1400 是中國具有自主智慧財產權的三代核電技術，由中國國家電投集團（SPIC）所屬上海核工程研究設計院負責設計。第一台 CAP1400 反應爐壓力槽在 2017 年 3 月通過壓力試驗，同年 12 月「CAP1400 關鍵設計技術研究」通過驗收，目前有 2 台國和一號機組正在建設中。³⁵

（六）歐洲 EPR

歐洲 EPR 全稱為「進化動力反應爐」（Evolutionary Power Reactor），屬第三代 PWR 設計，主要是由法國法馬通公司、法國電力公司（Électricité de France S.A., EDF）和德國西門子公司（Siemens AG）聯合設計開發。目前該型反應爐在中國台山核電廠有 2 座 EPR 核反應爐在運作，一號機已於 2018 年 6 月 6 日啟動併網發電，二號機亦於 2019 年啟動併網。³⁶

（七）俄國 VVER-1000 與 VVER-1200

「水—水高能反應爐」（WWER / VVER）是一種以 PWR 為設計基礎的「水冷水控能源反應爐」，為俄國國家原子能公司旗下液壓機實驗設計局所研發的壓水反應爐。VVER 核電機組主要安裝在俄國（前蘇聯），但也出口到中國、芬蘭、德國、匈牙利、捷克、斯洛伐克、保加利亞、印度和伊朗等國。VVER 是中俄在核能領域的主要合作方向，例如：江蘇田灣核電站和徐大堡核電站機組的建設。田灣核電站採用 VVER-1000 的一期工程 1 號、2 號機組主要由俄國於 1999 年到 2000 年建造生產並在 2007 年投入使用，3 號和 4 號機組於 2012 年至 2013 年建造，並於 2018 年投入

³⁴ 康樸，〈「國和一號」的自主創新之路〉，《人民網》，2024 年 9 月 6 日，<http://finance.people.com.cn/BIG5/n1/2024/0906/c1004-40314186.html>。

³⁵ 曹煜，〈「國和一號」產業鏈聯盟在滬成立 2023 年將全面實現 100% 設備國產化〉，《新華財經》，2022 年 2 月 28 日，https://web.archive.org/web/20220228135713/https://www.cnfin.com/hg-lb/detail/20220228/3546733_1.html。

³⁶ 小山，〈中國重啟了台山核電站 EPR 反應堆〉，《法國國際廣播電台》，2022 年 8 月 17 日，<https://www.rfi.fr/tw/中國/20220817-中國重啟了台山核電站 epr 反應堆>。

使用。³⁷ 在 2018 年中俄雙方簽訂核電合作契約，計畫持續合作建設田灣核電站 7、8 號機組以及徐大堡核電站 3、4 號機組，並採用俄國設計屬第三代反應爐的 VVER-1200 核電機組（並裝配中國自產的汽輪發電機組），該機組是俄國目前主推出口海外的三代核電技術，設計有雙層安全殼，外層用於應对外部衝擊和物理影響，內層用於確保堆芯設備和管道周圍的氣密性。³⁸

四、第四代反應爐

第四代與第三代最大不同之處在於，第四代更為先進可利用核廢料發電，而不是非得要用濃縮鈾，甚至其自身產生的核廢料亦可回收循環再利用。³⁹ 第四代的種類也更加多樣化，透過新的反應爐技術、材料和製造技術，不僅降低成本也提高電廠安全性，例如：小型模組化反應爐（SMR）、高溫氣冷反應爐（HTR）、氣冷式快反應爐（Gas-cooled Fast Reactor, GFR）、鈉冷快中子反應爐（Sodium-cooled Fast-neutron Reactor, SFR）、鉛冷式快反應爐（Lead-cooled Fast Reactor, LFR）、液態氟化鈦反應爐（Fluoride-cooled High Temperature Reactor, FHR）、熔鹽燃料反應爐（Molten Salt-fueled Reactor, MSR）等。⁴⁰ 中國研發的第四代反應爐是高溫氣冷反應爐（HTR）：HTR200 與 HTR600，以及興建中的鈉冷式快中子反應爐（SFR）：CFR600。在 2023 年 12 月 6 日，中國國家能源局宣布，山東榮成石島灣 HTR 電站是全球首座第四代核電廠，不僅完成 168 小時連續運轉驗證並正式運作，而且中國具完全自主智慧財產權，設備國產化超過 90% 以上。⁴¹

³⁷ 〈俄國家原子能集團：2022 年對俄中核能合作來說是成功的一年〉，《俄羅斯衛星通訊社》，2023 年 1 月 3 日，<https://big5.sputniknews.cn/20230103/1046857252.html>。

³⁸ 周慧盈，〈中俄簽核電大單，俄國疑似搶了美國生意〉，《中央社》，2018 年 6 月 9 日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/201806090112.aspx>。

³⁹ 張詠晴，〈比爾蓋茲將讓中國成為世界第一核電強國？〉，《天下雜誌》，2017 年 11 月 30 日，<https://www.cw.com.tw/article/5086508>。

⁴⁰ David Szondy, “Generation IV, the Future of Nuclear Power,” *NEW ATLAS*, April 15, 2022, <https://newatlas.com/technology/generation-iv-future-nuclear-power/>.

⁴¹ 楊昇儒、張淑伶，〈全球首座第四代核電廠在中國商轉〉，《中央社》，2023 年 12 月 6 日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/202312060272.aspx>。

肆、中國核能工業面臨的挑戰

中國近年來加速核電發展速度，其核電容量的提升將可能超越美國而成為全球第一。然而，一旦中國核能工業擴展的速度太快，亦將可能面臨在安全和監管上出現漏洞的安全隱憂。此外，由於中國政府體制是高度集權的政治環境和資訊不透明也不充分，使得外界難以得知中國核能安全是否達到世界標準，以及其監管機構的獨立性為何，這些種種都可能讓中國的核能安全面臨挑戰。⁴² 在 2024 年 3 月 4 日至 5 日，中國核電董事長盧鐵忠在中國人大和政協「兩會」期間對媒體提到，其預估未來北京每年能批准多達 10 台核電機組的建造。⁴³ 此乃是延續過去 2 年，北京連續核准了每年新造 10 台核電機組的方向。除了建構能源安全，「積極發展核電」與「穩步推進」建設亦是中國近年企圖達到「雙碳政策」目標的行動計畫之一。在 2024 年 3 月 26 日至 29 日舉行「博鰲亞洲論壇」的「加速邁向零碳電力」對話中，中國廣核集團副總經理施兵在有關電力脫碳的會議上表示，中國的核電裝機已超過 1 億瓩 / 度，並且聲稱中國核電容量在「今年肯定會超過美國，成為全球第一核電大國」。⁴⁴ 從中國正積極發展核電的政策方向來看，未來其可能面臨的挑戰如下：

一、核工業快速發展的隱憂

卡內基國際和平基金會（Carnegie Endowment for International Peace）核能政策計畫（Nuclear Policy Program）資深研究員希布斯（Mark Hibbs）在《美國之音》（*Voice of America*, VOA）的採訪中提到，中國在核電發展領域大量複製其他先進國家過去取得的成功經驗。中國核電計畫能迅速發展有幾個原因，包括：具有部署這項技術和克服任何反對聲音的政治意

⁴² 許湘筠，〈中國核電快速發展，訊息不透明帶來安全隱患〉，《美國之音》，2024 年 4 月 5 日，<https://www.voacantonese.com/a/china-nuclear-power-concerns-20240405/7557959.html>。

⁴³ 饒怡明，〈中國或成第一核電大國，安全是否跟得上？〉，《自由亞洲電台》，2024 年 4 月 12 日，<https://www.rfa.org/mandarin/zhuannlan/jingmaorediansaomiao/econ-04122024134025.html>。

⁴⁴ 紀東，〈中廣核副總經理施兵表示，今年中國的核電裝機肯定會超過美國〉，《香港新聞網》，2024 年 3 月 27 日，<http://www.hkcna.hk/docDetail.jsp?id=100634680&channel=2803>。

願、國家有足夠的經濟資源（特別是擁有建立大量核電廠的工業能力），以及國家對大量電力的需求。希布斯也提到，中國核電發展有很大程度是因為政治權力集中，政府控制了這個產業，核能技術公司為政府所有，並在財政和政治上支持這些公司，當然也會干預電力市場中的價格。⁴⁵ 況且中國集權政治可能為中國的核電安全帶來幾個可能的嚴重問題，包括：⁴⁶

- （一）核安監管能力無法因應核電廠快速擴張：中國在近 20 多年就擁有 50 幾座核反應爐，且未來每年將增加 10 座，所以很難確定中國在未來是否有足夠且充分的能力和資金來監管上百座的核子反應爐。
- （二）核安監管仍不完全透明：中國國務院在 1984 年決定成立國家核安全局，賦予其監督管理中國民用核設施安全的職責和重任，並參考國際原子能總署（IAEA）安全標準建立核能與輻射安全管理體系。經過多次組織調整後，中國目前核能主要由三個國家機構和機構監管：國家能源局、工業和資訊化部，以及生態環境部。迄今為止，中國給外界核安記錄（建造、延壽、停用、廢棄）都是正面的，也未曾發生重大核事故，但實際的監管情形外界仍無從得知，因而可能避開國際的監督。
- （三）核安勞動力短缺對核安全的影響：儘管核安監管員工可以在 4 年到 8 年內接受專技培訓，但在操作層面「安全文化需要更長的時間」，這個問題在監管制度中被放大，因為中國核電監管制度不僅工資低且勞動力數量也相對較低，若不提升核安勞動力的工資與數量則將會提升核安風險。然而，世界核能協會（WNA）就指出，安全問題的確減緩了中國核能工業快速擴張的野心。例如：根據牛津能源研究所（Oxford Institute for Energy Studies）資深研究員安德魯斯皮德（Philip Andrews-Speed）的觀察，儘管核能滿足了中國對能源安全和脫碳需求的擔憂，在福島核災後，中國就暫停了新建核電廠的審批，同時開始積極進行對核安全和河流污染的調查。⁴⁷

⁴⁵ 許湘筠，〈中國核電快速發展，訊息不透明帶來安全隱患〉。

⁴⁶ 同上註。

⁴⁷ Anika Patel, "Q&A: How China is Using Nuclear Power to Reduce Its Carbon Emissions," *Carbon Brief*, August 14, 2023, <https://www.carbonbrief.org/qa-how-china-is-using-nuclear-power-to-reduce-its-carbon-emissions/>.

二、核能仍無法取代燃煤發電

確保國內外充足能源供應以維持經濟成長，就一直是中國建構國家安全的重要關鍵。中國能源結構的特色是「富煤、貧油、少氣」，所以其能源結構在今天仍是以煤炭為主，石油、天然氣、鈾礦與相關可再生能源為輔。⁴⁸ 根據 2023 年的國際能源署（International Energy Agency, IEA）數據，中國電力消耗大部分來自化石燃料，占 63.67%。其中以燃煤所產生的電力為主，占總電力的 60.48%。⁴⁹ 目前，中國核電在整體電力燃料結構的貢獻相當很小，僅占總裝置容量的 2.2%，是所有能源中最少的。在 2023 年，核能發電量僅占全中國累計發電量的 4.86%。⁵⁰

對中國來說，發展核電的確是比燃煤發電更好的選擇，可以為中國提供可靠且大量的無碳電力，此外核電作為以高品質技術為基礎的工業，提供的就業機會也是高科技產業，對中國的長期經濟發展來說是有利的，但目前要讓核電取代燃煤，還有現實上的困難，因為中國的能源安全與電力生產架構仍是以煤炭為主且現階段不易改變。例如：學者希布斯接受《美國之音》採訪曾提到，因為中國在燃煤發電領域幾乎是由強大的國營企業在支撐，不僅擁有的勞動力數量非常龐大，可獲得的利潤非常高且遠遠多於核能產業，所以中國核能發展仍無法取代燃煤發電。⁵¹

值得注意的是，在福島核災後，中國開始禁止在內陸興建核電廠，最近批准新建的核電廠也通常建在海岸附近，其原因不外乎是核電廠運作過程主要利用核燃料分裂釋放出大量熱能，需要大量冷卻水輸入爐心進行熱交換以達到降溫目的。同時，中國大部分核電廠建立在面西太平洋的海岸線上亦會面臨地震與海嘯的潛在風險，但目前外界仍很難知道中國的核電廠是否能夠做到充分的安全防範。

⁴⁸ 中國是全球最大的溫室氣體（CO₂）排放國，排放量占全球近三分之一；每年的燃煤量高於世界上其他國家的總和。中國的地下煤礦儲量為全球之首，北京當局相信能源供給來自本國才能確保能源安全。中國發展新能源發電的同時，也仍在擴大煤電產能。

⁴⁹ 〈中華人民共和國 2023 年電力數據〉，《低碳力》，2023 年 12 月，<https://lowcarbonpower.org/zht/region/> 中華人民共和國。

⁵⁰ 林茂仁，〈中國大陸 2023 年核能發電量占比 4.86%〉，《聯合新聞網》，2024 年 1 月 31 日，<https://udn.com/news/story/7333/7746691>。

⁵¹ 許湘筠，〈中國核電快速發展，訊息不透明帶來安全隱患〉。

三、需處理大量核廢料的問題

一般而言，核廢料是指含具有放射性物質的廢料，大多在核反應爐運作核分裂的連鎖反應中所產生，包括：高放射性的廢棄燃料棒與低階放射性的廢棄物，如核電廠的衣物、工具、裝備、廢水等。就核廢水而言，在福島核災 12 年後，國際原子能總署向日本提交了一份報告認為福島核廢水排放符合全球安全標準，且日本已將氚含量降低到國家安全標準的四十分之一以下，因此日本在 2023 年 8 月下旬就開始分批向海洋排放來自福島電廠逾 100 萬噸含氚的廢水。但北京對此則大肆抨擊日本此舉罔顧太平洋安全，同時自同年 8 月起就全面禁止來自鄰國的所有海鮮產品進口。

諷刺的是，日本《共同社》在 2024 年 3 月 9 日報導指出，根據 2022 年《中國核能年鑑》對浙江省秦山核電廠等 13 座核電廠的 19 個監測點進行了放射性物質檢查。其中有 15 個地點廢水中的氚含量大大超過福島核電廠年度排放廢水的氚含量，其中以秦山核電廠排放的氚含量最高。⁵² 具體而言，日本福島稀釋後的核廢水釋放到海洋時，預計每年釋放的氚總量將控制在福島核災前的水平，也就是每年 22 兆貝克（Bq）以下。據日本官方調查，中國有 4 座核電廠每年的氚排放量都大大超過日本標準。其中，秦山第三核電廠在 2020 年排放量高達約 143 兆 Bq。其他 3 座，在 2021 年廣東陽江核電廠達約 112 兆 Bq；福建寧德核電廠約 102 兆貝克；遼寧紅沿河核電廠約 90 兆 Bq（圖 12-5）。⁵³

對此學者希布斯就表示，中國對福島核廢水排放的強勢態度是具政治性的而非基於對核安的擔憂，這不僅與中國近年對西太平洋的野心有關，也表現在與中日關係的對立上。⁵⁴ 儘管中國目前核能工業發展迅速，但是

⁵² “China’s 2022 Wastewater Tritium Level Higher than Fukushima’s,” *Nikkei Asia*, March 9, 2024, <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/China-s-2022-wastewater-tritium-level-higher-than-Fukushima-s>; 中國核能行業協會編，《中國核能年鑑——2022 年卷》（北京：中國原子能出版社，2022 年），<https://img.china-nea.cn/heneng/ebook/hnnj/hnnj2022/mobile/index.html#p=1>。

⁵³ 邱國強、李雅雯，〈中媒扭曲福島核廢水採訪，日使館公布全文打臉、揭中國氚排放量更高〉，《中央社》，2023 年 3 月 5 日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/202303050155.aspx>。

⁵⁴ 許湘筠，〈中國核電快速發展，訊息不透明帶來安全隱患〉。

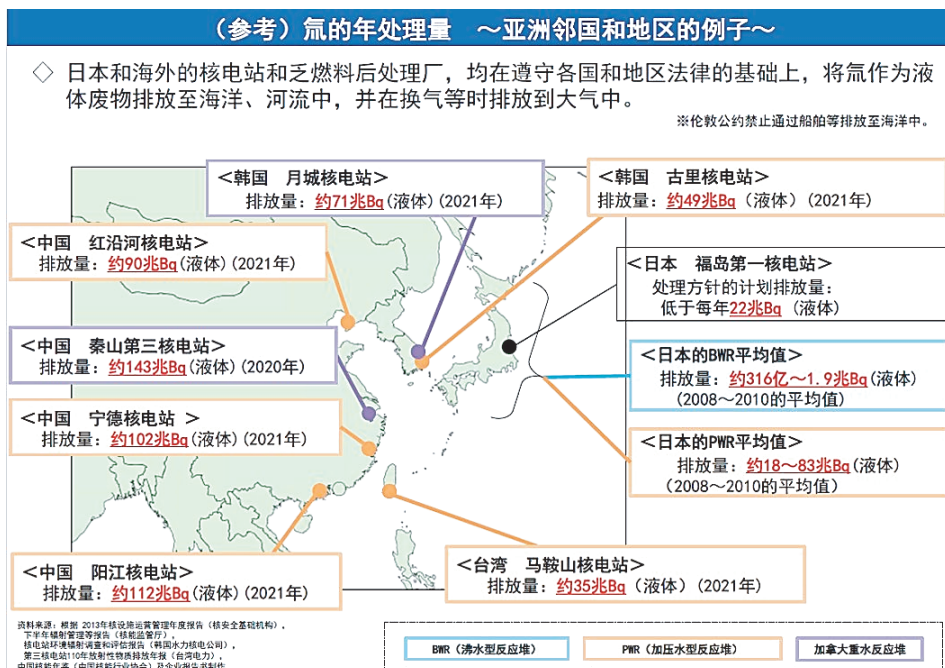


圖 12-5 日本與鄰國核電廠氚水處理量

資料來源：邱國強、李雅雯，〈中媒扭曲福島核廢水採訪，日使館公布全文打臉、揭中國氚排放量更高〉，《中央社》，2023年3月5日，<https://www.cna.com.tw/news/acn/202303050155.aspx>。

與美法日等國家的先進核能工業相比，中國的核能安全經驗相對較短，不見得會比先進核能國家安全。因為核安與核反應爐運作的經驗累積是正相關的。雖然中國迄今尚未有發生重大核安事件，但核廢水排放含氚量太高和大量核廢料產生與儲存仍是其核安關鍵問題，究竟中國會如何透明處理核廢水及廢料問題，仍需要持續觀察。

伍、小結

在能源轉型的世界潮流與國家追求「雙碳」目標的政策下，中國近年積極發展核電計畫，目前正在建設中的核電廠規模居世界之冠。中國核

能行業協會在 2023 年發布的《中國核能發展報告》藍皮書顯示，大陸核電機組長期保持安全穩定運行。截至 2023 年為止，中國在建核電機組 24 部，總裝機容量約 2,681 萬瓩 / 度，為全球第一。在 2023 年，中國運轉中的核電機組為 54 部，總裝機容量約 5,682 萬瓩 / 度，為全球第三。據該報告資料，與燃煤發電相比，中國 2022 年核電發電相當於減少燃燒標準煤近 1.2 億噸，減少排放溫室氣體近 3.1 億噸。⁵⁵ 不可諱言，核電發電量持續增長，的確為中國保障電力供應安全和推動「降碳減排」作出一定程度的貢獻，但是要藉大力發展核能來達成「雙碳」目標仍是不夠的。最後，從中國現階段的核能技術來看，相較於其他先進核電國家，中國核電的發展可謂已相對成熟，且具有經濟性又有產業規模。然而，核燃料循環的後端處理與中國核電發展息息相關，未來中國要如何加快大量核廢料處理以符合中國核電發展政策與國際標準，這是一個值得後續關注的核安問題。未來核廢料處理將有巨大需求與廣大市場，核廢料處理將是中國未來核電產業持續發展關鍵因素。

⁵⁵ 謝守真，〈大陸興建中核電機組 24 部！學者：核電是非常好的能源〉，《經濟日報》，2023 年 5 月 29 日，<https://money.udn.com/money/story/5603/7197842>。