

# 中國第四代核電技術「領航」世界

## 自主第三代技術打破西方壟斷 出口海外閃耀全球

2023年3月25日6時55分，隨着168小時試運行試驗圓滿完成，中國西部地區首台「華龍一號」核電機組正式具備商業運行條件。這一次，「華龍一號」真正擁有了「中國心」——由中國完全自主研發的核電神經中樞「和睦系統」。作為大國重器，核電不僅是先進生產力的象徵，更關乎一國的能源安全與發展。中國核電起步晚、發展曲折，但經過數十年的不懈努力，中國核電從無到有、從弱到強，不僅依靠擁有自主知識產權的第三代核電技術打破了外國壟斷，也成功「出海」巴基斯坦，鑄成了一張閃亮全球的「中國名片」，第四代核電技術更跑出了「領航」世界的加速度。

大公報記者 張寶峰

### 國產核安中樞「和睦系統」獲IAEA頂級認證

「華龍一號」是我國具有自主知識產權的三代核電技術，滿足我國核安全法規標準和國際原子能機構的安全要求。中廣核研究院有限公司黨委副書記、總經理盧向暉對大公報表示，「華龍一號」在安全性提升的基礎上，反應堆堆芯功率較國內二代核電機組提升了約9%，整體上達到國際先進水平。

作為核電站的「神經中樞」，數字化儀控系统涉及核反應堆的緊急制動，對安全性、可靠性和確定性的要求極高。但由於中國核電起步較晚，很長一段時間內不得不使用國外相關系統。如今，隨着「和睦系統」與「華龍一號」雙劍合璧，這一「卡脖子」問題終於宣告解決。

新中國成立後第一個核電計劃被命名為「581工程」，意思是1958年的第一號工程。工程原計劃在前蘇聯援助下，建設一座石墨水冷堆核電站。然而中蘇關係驟然破裂後，蘇聯專家全部撤離回國並帶走了全部資料和數據信息。新中國第二個核電計劃「820工程」是由清華大學提出的5萬千瓦熔鹽增殖堆核電站。但由於前期研發不到位，材料、技術和工藝不成熟，也被迫停止。直至1991年秦山核電站併網發電，才正式結束內地無核電的歷史。經過數十年發展，中廣核在運核電機組28台，在建核電機組16台，設備國產化能力達100%。中國廣核集團也已成長為中國最大、全球第二大核電企業。

中廣核數字科技有限公司董事長孫永濱表示，「目前和睦系統已應用於包括「華龍一號」在內的27台在運在建核電機組，實現多堆型覆蓋，為國家節省上百億元建設資金」。關鍵核心技術的突破使「和睦系統」平台的整體技術達到國際先進水平，安全性和可靠性設計也達到國際領先水平。如今，「和睦系統」已經通過國際原子能機構（IAEA）獨立工程審評（IERICS）報告，中國造核電站「神經中樞」獲得國際頂級認證，拿到了進入國際市場的「入場券」。

2022年4月18日，「華龍一號」海外首堆示範工程巴基斯坦卡拉奇K-2/K-3項目全面建成投產，中國擁有自主知識產權的第三代核電技術成功出口國外。此外，自主技術四代核電高溫氣冷堆示範工程也已成功併網發電；海上浮動堆、一體化小型堆等各種先進核電技術正在齊頭並進研發當中。

### 美學者：中國四代核電領先我們15年

在一代代中國核電人的不懈努力下，如今，中國核電在設計製造、施工安裝、調試運行、維修處理、運營管理等各環節，都取得了舉世矚目的成就，並從世界核電領域的邊緣逐步走到了舞台中央。可以說，中國核電已從核電技術的追趕者變為並肩者，部分環節已經成為備受矚目的領跑者。

美國信息技術與創新基金協議（ITFT）在一篇文章中指出，儘管中國的核電技術是在引進西方技術背景下發展起來的，並且也曾遭遇



▲巴基斯坦員工在「華龍一號」海外首堆工程——巴基斯但卡拉奇2號機組控制室工作。

美國的技術封鎖，但卻成功突破重圍，並成為世界領先的核電建設者。麻省理工學院核科學與工程教授雅各布·布魯爾諾諾點評稱：「事實上，中國已是世界核技術領先者，特別是部署第四代核反應堆的能力，比美國領先10至15年。」

### 使用氣體冷卻 降堆芯熔毀風險

專家表示，要安全如期達成「雙碳」目標，核電「蓄能」勢在必行。年初，國家重大科技專項標誌性成果、全球首座第四代核電站傳來捷報——山東榮成石島灣高溫氣冷堆核電站商業示範工程圓滿通過168小時連續運行考驗，正式投入商業運行，標誌着我國在第四代核電技術研發和應用領域達到世界領先水平。

高溫氣冷堆是指「具有高溫特徵、使用氣體進行堆芯冷卻」的核反應堆技術，是國際公認的第四代核電技術先進堆型，具有「固有安全性」、即在喪失所有冷卻能力情況下、不採取任何干預措施，反應堆仍能保持安全狀態，不會出現堆芯熔毀和放射性物質外洩。同時，高溫氣冷堆所具有的固有安全性、發電效率高、應用領域廣等優良性能，使其在核能發電、熱電冷聯產及高溫工藝熱應用等領域商業化應用前景廣闊，將有助於優化能源結構、保障能源供給安全，推動實現「雙碳」目標。

石島灣高溫氣冷堆示範工程2012年12月開工，由中國華能、清華大學、中核集團共同建設，具完全自主知識產權，2021年12月首次實現併網發電。示範工程先後攻克多項世界級關鍵技術，設備國產化率達到93.4%，創新型設備600多台（套）。華能石島灣核電公司總經理張延旭表示，示範工程成功研製出2200多套世界首台（套）設備，研發高溫氣冷堆特有的調試運行六大關鍵核心技术，鞏固我國在高溫氣冷堆先進核電技術領域的全球領先地位。

效益相當於種植近216萬公頃森林，面積可覆蓋11個深圳或20個香港，為推動粵港澳大灣區綠色低碳轉型、生態文明建設，亦貢獻了重要力量。



▲大亞灣核電站是內地首座百萬千瓦級大型商用核電站。



▲2021年1月30日，「華龍一號」全球首堆福清核電5號機組成功投入商運，標誌着中國打破國外核電技術壟斷進入核電技術先進國家行列。

### 中國核電發展簡史

#### 核電起步階段 (1970年—1993年)

1983年，中國確定了發展壓水堆核電的技術路線，明確了核電發展方向。1991年12月15日，中國第一座自主設計和建造的秦山核電站成功併網發電，結束了中國無核電的歷史。



#### 適度發展階段 (1994年—2005年)

這個階段，核電發展方針為「適度發展」。1996年，引進法國M310技術並消化改進的秦山核電廠二期2台650兆瓦機組工程開工建設。2004年兩台機組全部投入商運。

#### 積極發展階段 (2006年—2011年)

2006年《核電中長期發展規劃》明確指出「積極推進核電建設」。其間，中國引進歐美國家第三代核電技術，並在此基礎上不斷創新，形成了具有自主知識產權的第三代技術。

#### 安全高效發展階段 (2011年至今)

2011年日本福島核洩漏事件後，國家對所有在運在建核電項目開展大排查，制定最嚴格的安全標準，建立健全國家核應急綜合體系。中國核電進入安全高效發展新階段。

大公報記者張寶峰整理

### 「那時，整個中國核工業只是『小學生』」

#### 發憤圖強

上世紀90年代，剛工作兩年多的邢繼被派往法國核電公司Framatome設在深圳的現場技術部擔任工程師。在那裏，他第一次見到當時國際上最先進的核電設計圖紙，第一次接觸到現代化設計管理體系。那時，整個中國核工業都只是「小學生」——沒有高標準的設計，裝備製造水平也十分落後，甚至連符合法國技術要求的水泥、鋼筋等基本材料都需要進口，核電人才的匱乏更是超出想像。運行核電站的核心技術人員是操縱員，中國最早一批核電站操縱員在法國受訓每人所花的費用，相當於一般人體重的黃金價格，所以他們被稱為核電「黃金人」。

伴隨國際合作，大批中國核電人在引進、消化吸收中埋頭學習國外先進核電技術。有一次，邢繼發現某個型號的轉讓技術資料不完整，便請對方項目經理來討論如何補充完善，外方項目負責人卻傲慢地說：「這很容易，讓你們的工程師放下手中的鉛筆打開複印機，就學會了。」意思是直接抄就行，沒有必要弄明白為什麼這麼設計。

邢繼意識到，「只是從國外買技術和設備，不可能掌握核電的核心技術，也不可能實現出口。」後來成為「華龍一號」總設計師的邢繼心裏始終憋着一股勁，一定要建造一座完全由中國自主設計、建造並管理運營的百萬千瓦級核電站。

### 外企談合作漫天要價：讓出型號主導權

#### 自立自強

2011年日本福島核事故後，如何確保中國核反應堆達到國際最高安全標準，便成為中國核電人面臨的一道重要考題。然而當時中國在相關的核電站非能動研究技術領域基礎薄弱。若執行改進方案，立即就會遇到諸多技術瓶頸。當時中國核電企業首

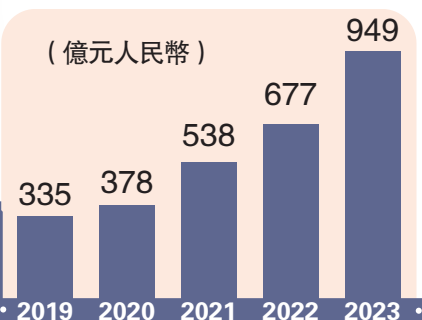
先想到的也是最快捷的方案——與國外合作夥伴共同解決技術問題。然而，一家長期合作的國際知名企業負責人當即提出合作條件：「你們必須把整個型號拿出來共享。」而這則意味着中國將失去對型號的主導權。

權衡之下，中方最終選擇放棄合作，轉而組建研發團隊進行自主攻關。研究人員從理論研究開始，制定初步方案，再進行原理性實驗，驗證理論的可能性。一步又一步，一關又一關，幾年之後終於啃下了這塊「硬骨頭」。後來，那位外企負責人再次找到中國核電企業，並表示可以無條件繼續合作。中方負責人當即回答說：「上次那個問題，我們已經自己解決了，希望將來還有機會合作。」從「求合作」到「被求合作」的故事，再次印證了「必須把核心技术掌握在自己手裏」的硬道理。



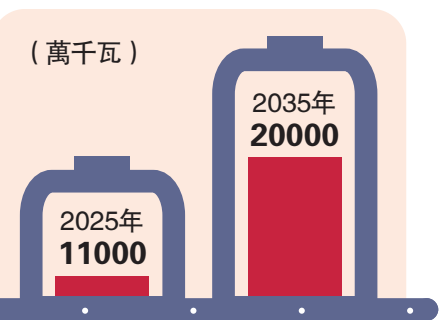
▲中廣核自主研發中國首個核級數字化儀控系统「和睦系統」。受訪者供圖

### 中國核電工程建設投資完成額



資料來源：《中國核能發展報告2024》藍皮書

### 2025-2035年中國核電裝機容量發展規劃



\*包括在運和在建裝機容量  
資料來源：前瞻產業研究院

### 取乎其上 居安思危

#### 熱評

古語云「取乎其上，得乎其下；取乎其下，得乎其下；取乎其下，則無所得矣。」可以說，中國核電工業的發展史正是這句話的生動寫照。

早期起步階段，中國核電工業只是希望能夠通過技術合作實現快速成長。但外交關係的翻覆，卻狠狠地給中國人上了一課。

後來邁入發展期，中國核電工業雖然與外國建立起密切的合作關係，但由於缺乏自主核心科技，所以從根本上始終存在仰人鼻息、受人遏制的隱患。在外國頻繁的「拋白眼」「暗

要價」「卡脖子」之後，中國的核電工業終於覺醒，並且篤定了研發自主科技的路向，開啓了強勢崛起的搶灘之路。

如今，中國核電工業在發展數量、質量、速度、種類等各個方面，都處於國際領先地位，也為接下來佔據有利競爭地位奠定了基礎。

在事關長遠戰略的大國重器領域，躺平者自多後顧之憂，穩立者從來都居安思危。正是在這樣的心態考量下，中國核電工業才實現了從無到有、由弱到強的亮麗蝶變。

大公報記者張寶峰

### 大亞灣電站投產30年 供港1/4電力

#### 功不可沒

作為中國內地首座大型商用核電站，大亞灣核電站一直被視作改革開放的標誌性工程。在世界核電領域權威評比「法國電力集團安全業績挑戰賽」中，大亞灣核電基地連續11年奪得「能力因子」第一名，累計冠軍數達到39項，佔該項賽事冠軍總數的一半以上，是全球獲得冠軍最多的核電基地。

2024年是大亞灣核電站投產30周年。自全面建成以來，大亞灣核電基地累計上網電量已近1萬億千瓦時。其中大亞灣核電站2台機組累計實現上網電量4334.94億千瓦時，輸送香港的電量累計達3145億千瓦時，佔香港總用電量的四分之一，為滿足香港電力供應、改善能源結構發揮了積極作用。

截至2024年6月30日，大亞灣核電基地6台機組已累計實現上網電量9597億千瓦時，環保