

中共海軍艦船推進系統 未來發展分析

Analysis on the Future Development of PLA Navy Propulsion Systems

翟文中 先生

提 要：

- 一、隨著中共海外利益擴張，其海軍戰略朝向「近海防禦、遠海防衛」方向過渡。未來，遠海部署將是中共海軍任務規劃的重要項目，艦艇海上持久力就成為任務成敗的關鍵性因素；因此，共軍積極地進行艦船推進系統的升級與強化。
- 二、共軍水面主戰艦船現多以燃氣渦輪機做為主機，並採「整合動力系統」設計，此動力布局可提高負載與調配靈活度外，亦為艦船部署電能武器做好準備；另中共核動力航艦的發展係戰略學界關注的焦點，本文也將對其核反應器的技術路線進行分析比較。
- 三、就中、短期而言，中共核潛艦的推進系統不會出現改變，相反地柴電潛艦推進則牽扯到複雜的定型問題，由於採用「絕氣推進系統」(AIP)的「史特林」引擎仍存有操作限制，且新近發展的燃料電池、鋰離子電池與核電池等技術優勢，使其在匿踪與持久力上均優於傳統史特林引擎；故中共海軍未來極可能在當中擇一做為絕氣推進系統之用，相關發展值得關注。

關鍵詞：中共海軍、整合動力系統、絕氣推進系統、核反應器

Abstract

- 1.As China's overseas interests expand, the strategic concept of the People's Liberation Army Navy(PLAN)is rapidly the transition of its tasks from defense on the near seas to protection missions on the far sea. In the future, blue-water deployments will become a critical component of PLAN mission planning, making the endurance of naval vessels at sea a decisive factor for operational success. As a result, PLAN actively upgrading and strengthening its ship propulsion systems.
- 2.The majority of PLAN surface combatants are equipped with gas turbines as their prime movers, introducing an Integrated Power System(IPS)de-

sign that combined propulsion and electric system into a single system. This arrangement not only improves power distribution flexibility, but also prepares the vessels for future deployment of directed-energy weapons. Given the strategic significance of China's development of nuclear-powered aircraft carriers, this paper will analyze the technical roadmap of relevant nuclear reactor systems.

3. In the short to medium term, major changes to the propulsion systems of PLAN nuclear-powered submarines are unlikely. On the other hand, diesel-electric submarines propulsion development involves more complex system finalization choice challenges. Currently, the PLAN submarines deployed Stirling-based air-independent propulsion(AIP)system suffer from multiple operational limitations. Recently developed AIP technologies such as fuel cells, lithium-ion batteries, and nuclear batteries provide more superior stealth and endurance than Stirling engines. It is highly likely that the PLAN will adopt one of these newer technologies for future AIP systems.

Keywords: PLA Navy, Integrated Power System, Air-Independent Propulsion, Nuclear Reactor

壹、前言

近年來，隨著中共海軍造艦速度加速與活動海域不斷擴大，其兵力發展已成為當代戰略研究的熱門議題，惟在探討其海軍裝備建設的論述中，多將焦點置於艦船偵蒐性能與飛彈射程的分析，甚少對推進系統的發展進行深入研究。由於軍艦推進與海軍戰略及戰術間存在著緊密關係，故英國海權學者柯白(Julian S. Corbett)在著作《德芮克與都鐸王朝海軍》(Drake and the Tudor Navy)書中指出：「海軍戰略的精義是海上持久力，亦就是艦隊在海

上活動能力的程度；海軍戰術的精義在於動力性質，亦就是人類控制艦隊或是艦船運動到達何種程度」。¹更確切地說，為能落實「近海防禦、遠海防衛」海軍戰略，中共海軍艦船必須擁有良好的機動性與最佳的持久力，²故推進系統性能係其遠洋部署與走向「藍水海軍」的重要支撐。

撰文主要目的即在對中共海軍推進系統的發展進行探討，首先說明共軍水面艦船推進系統的發展，聚焦於燃氣渦輪機的引進與國產化，同時探討採用「整合電力推進」(integrated electric propulsion, IEP)的可能發展；其次，對共軍潛艦傳

註1：Julian S. Corbett, *Drake and the Tudor Navy: With A History of the Rise of England as a Maritime Power, Vol.I* (London: Longmans, Green, and Co., 1898), p.2。

註2：《新時代的中國國防》，中共國務院新聞辦公室，2019年7月24日，http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/zhengce/2019-07/24/content_5414325.htm，檢索日期：2025年9月24日。

統「絕氣推進系統」(air independent propulsion, 以下簡稱AIP)的發展進行分析,涵蓋現用的「史特林引擎」(Stirling Engine)及可能採用的「質子交換膜燃料電池」(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)、「鋰離子電池」(Lithium-ion Battery)與「核電池」(Nuclear Battery)。最後,透過比對「壓水式」反應器 (pressurized water reactor, PWR)與「第四代反應器技術」³運用於航艦推進的限制與機會,分析中共核動力航艦可能採用的核反應器構型。透過完整的分析說明,除有助掌握共軍艦船推進系統的當前狀況與未來發展外,亦期有助探索中共海軍戰術運用與戰略發展走向。

貳、中共水面艦船推進系統概述

一、1978年,中共決議放棄先前「早打、大打、打核戰爭」的臨戰準備狀態,提出「和平時期建軍」的軍事發展戰略,

並開始積極地推動「國防現代化」。⁴為拉近與西方國家海軍間的戰力差距,1980年代中共開始研建「052型」飛彈驅逐艦。值得一提的,此計畫引進美國「通用電氣公司」(General Electric)生產的「LM2500」燃氣渦輪機,此型主機係當時甚至到目前為止全球性能最佳的水面艦船推進主機。⁵1989年「天安門事件」後,美國為首的西方國家開始對「中」實施武器禁運,由於後續無法再取得該型主機,該造艦計畫僅建造2艘後便終止。⁶此後十餘年間,共軍新造的「051B、C」等型式飛彈驅逐艦,又回到過去以蒸汽透平機做為原動機。

二、前蘇聯的解體則為中共引進先進技術開啟了「機會之窗」。經過多次磋商,中共由烏克蘭引進「UGT-25000」燃氣渦輪機,解決無法取得先進艦用推進系統的困局。1993年,兩國簽署「UGT-25000」燃氣輪機生產許可證及單機銷售合同,

註3：第四代反應器技術由「第四代國際論壇」(Generation IV International Forum, GIF)於2002年對外宣布,論壇於2000年由美國「能源部」(Department of Energy)倡議成立,2001年中正式運作,計有13國參與並成為會員國。該論壇依清潔、安全、具成本效益、能持續滿足日增的能源需求與材料能防止被轉用於武器擴散,並免於遭受恐怖攻擊等指標,選出第四代反應器技術設計,計氣冷式快中子反應器(gas-cooled fast reactor, GFR)、鉛冷式快中子反應器(lead-cooled fast reactor, LFR)、熔鹽反應器(molten salt reactor, MSR)、鈉冷式快中子反應器(sodium-cooled fast reactor, SFR)、超臨界水冷式反應器(supercritical water-cooled reactor, SWCR)與超高溫氣冷式反應器(very high-temperature gas reactor, VHTR)等6種,為便於閱讀,本文均簡稱氣冷、超高溫氣冷、鉛冷、鈉冷、超臨界水冷式與熔鹽。參見“Generation IV Nuclear Reactors,” World Nuclear Association, 30 April 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors>, 檢索日期:2025年9月26日。

註4：張琪閔、莊水平,〈由中共近代領導人淺析建軍備戰深化之研究〉,《海軍學術雙月刊》(臺北市),第50卷,第5期,2016年10月1日,頁98-99。

註5：“Type 052 Luh-class Multirole Destroyer,” GlobalSecurity.org, <https://www.globalsecurity.org/military/world/china/luhu.htm>, 檢索日期:2025年9月19日。

註6：Tshering Chonzom, “The 1989 Arms Embargo and China,” Institute of Peace and Conflict Studies, 30 December 2004, https://www.ipcs.org/comm_select.php?articleNo=1603, 檢索日期:2025年9月22日。

烏國同意提供中共10部該型渦輪機，並轉讓相關技術協助「中」方進行該主機的國產化，⁷「052B、052C」首批飛彈驅逐艦就配備該型渦輪機。到了1998年，中共進行該型主機的國產化計畫，並由「中國船舶重工集團」（以下簡稱中船重工）領軍負責；2004年，首部國產型燃氣渦輪機被命名為「GT-25000」，2011年，該型燃氣渦輪機正式實現全面國產化。其後，參與國產化計畫的「西安航空發動機公司」（隸屬中國航空發動機集團有限公司，以下簡稱西航公司），為打進軍用市場，參酌烏克蘭設計並開發與「GT-25000」性能相仿的「QC-280/QD-280」系列燃氣渦輪機。

三、中共海軍最終採用「中船重工」開發的「GT-25000」渦輪機做為水面主戰軍艦推進主機，⁸並由「西航公司」與「哈爾濱汽輪機廠」負責製造。⁹2013年5月，黑龍江省及哈爾濱市人民政府與「中船重工」第703研究所集資組建「中船重工-龍江廣瀚燃氣輪機有限公司」，而海軍現

用的燃氣渦輪機，則悉數由該公司生產。除「QC-280/QD-280系列」外，衍生型尚有「CGT25-D」與「GT-25000 SS Cycle」等型式，主要做為出口與工業用途。¹⁰此外，「中國航空工業集團瀋陽發動機設計研究所」（代號606所）開發具中間冷卻器的「QC-280I型」燃氣渦輪機；¹¹「中船重工」-第703研究所則自主研發了「CGT40型」燃氣渦輪機，¹²兩者均具備更大功率，可做為航艦與兩棲突擊艦等大型水面艦的推進主機。

四、其中特別的是，中共水面艦艇僅飛彈驅逐艦裝備燃氣渦輪機，此系統構型已由早期的「柴油機與燃氣渦輪機組合」過渡到當前的「全燃氣渦輪機組合」；另一方面，中共其他水面主戰兵力與大型艦艇，包括「054、056型」護衛艦、「071型」綜合登陸艦、「075型」兩棲攻擊艦與各型綜合補給艦，均以柴油機做為原動機，並採「雙柴油機聯合」（Combined Diesel and Diesel，CODAD）系統構型。前揭

註7：潛望者，〈中國引進最成功的燃氣輪機，不僅打破美國制裁，還讓海軍進步30年〉，騰訊網，2024年11月3日，<https://news.qq.com/rain/a/20241103A066GY00>，檢索日期：2025年9月18日。

註8：參與「UGT-25000」國產化計畫的主要單位，包括「中船重工」第703研究所、西安航空發動機公司與哈爾濱汽輪機廠，703研究所負責監製，採購的設計藍圖則與西安航空發動機公司共享。〈船用燃機國產化代表-GT-25000燃氣輪機技術與性能〉，百度百科，2022年12月13日，<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1752088470544333447>，檢索日期：2025年9月25日。

註9：〈052B導彈驅逐艦(旅洋-I級)〉，MDC軍武狂人夢，<http://www.mdc.idv.tw/mdc/navy/china/052b.htm>，檢索日期：2025年9月21日。

註10：〈鑄射：引進H-25型燃氣輪機--中國重型燃氣輪機研製又一個新起點〉，國際燃氣網，2019年4月9日，<https://gas.in-en.com/html/gas-3063595.shtml>，檢索日期：2025年8月13日。

註11：〈中國研燃氣輪機功率世界第一，兩台就能帶動7萬噸航艦〉，新浪軍事，2018年6月11日，<http://mil.news.sina.com.cn/jssd/2018-06-11/doc-ihcufqif7282583.shtml>，檢索日期：2025年9月22日。

註12：〈CGT40燃氣輪機正式發布，42兆瓦功率，可讓055大驅增至2萬噸！〉，騰訊網，2024年12月14日，<https://news.qq.com/rain/a/20241214A069Y500>，檢索日期：2025年9月24日。

艦船採柴油機做為動力源的主因，係該主機的系統簡單、技術成熟且維護成本較低。後續為滿足遠海部署與快速突防的戰略與戰術需求，共軍新建的「076型」兩棲攻擊艦¹³與「901型」綜合補給艦¹⁴等艦船，均改採燃氣渦輪機做為原動機，凸顯這種趨勢的未來發展正「方興未艾」。

五、此外，中共亦引進西方海軍的「整合動力系統」(integrated power system, IPS)設計，¹⁵此系統可將艦上所有動力整合至單一系統，發電、輸電、配電與負載能及時調整，可提高電力轉換靈活度取得最佳負載分配，這種動力構型為艦船部署電能武器提供有利條件。¹⁶再者，由於動力與電力供給來自「分散式電力系統」(distributed power source)，因此艦船承受戰損時，也具有較佳的韌性與生存



圖一：中共「054B型」護衛艦「漯河艦」

資料來源：林芷瑩，〈中國海軍054B護衛艦首艦「漯河艦」交接入列〉，香港01，2025年2月21日，<https://www.hk01.com/%E5%8D%B3%E6%99%82%E4%B8%AD%E5%9C%8B/1096381/%E4%B8%AD%E5%9C%8B%E6%B5%B7%E8%BB%8D054b%E8%AD%B7%E8%A1%9B%E8%89%A6%E9%A6%96%E8%89%A6%E6%BC%AF%E6%B2%B3%E8%89%A6%E4%BA%A4%E6%8E%A5%E5%85%A5%E5%88%97>，檢索日期：2025年9月19日。

力。目前中共航艦「福建號」¹⁷、「076型」兩棲攻擊艦與「054B型」護衛艦¹⁸(如圖

註13：“Type 076 Yulan LHA-Propulsion,” GlobalSecurity.org, <https://www.globalsecurity.org/military/world/china/type-076-propulsion.htm>，檢索日期：2025年9月15日。

註14：〈901型綜合補給艦〉，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/wiki/901%E5%9E%8B%E7%BB%BC%E5%90%88%E8%A1%A5%E7%BB%99%E8%88%B0>，檢索日期：2025年9月14日。

註15：又稱為「整合全電力推進」(integrated Full electric propulsion, IFEP)，係在艦船電力推進的基礎上發展而成。目前採IFEP的艦船包括美軍「朱瓦特級」(Zumwalt class, DDG 1000)驅逐艦、英國海軍45型「勇敢級」(Daring class)驅逐艦與「伊莉莎白女王級」(Queen Elizabeth class)航艦等。“DDG 1000,” Naval Sea Systems Command, January 2019, <https://www.navsea.navy.mil/Home/Team-Ships/PEO-Ships/DDG-1000/>; “Type 45 Destroyer Daring Class: World’s First Full Electric Propulsion Combatant Ship,” <https://www.gevernova.com/power-conversion/case-study/type-45-destroyer-daring-class-worlds-first-full-electric-propulsion-combatant-ship/>; “Queen Elizabeth Class (CVF),” August 20, 2020, Naval Technology, <https://www.naval-technology.com/projects/cvf/>，檢索日期：2025年9月12日。

註16：翟文中，〈淺談新一波「海軍軍事革新」--全電力推進與電能武器的發展〉，《海軍學術雙月刊》(臺北市)，第56卷，第2期，2022年4月1日，頁29~30。

註17：“Here’s how China’s Fujian aircraft carrier poses new challenges for Indian Navy,” The Economic Times, May 10, 2024, <https://economictimes.indiatimes.com/news/defence/heres-how-chinas-fujian-aircraft-carrier-poses-new-challenges-for-indian-navy/articleshow/110004788.cms>，檢索日期：2025年8月27日。

註18：“Type 054B Jiangkai III guided missile frigate,” Army Recognition Group, 23 January 2025, <https://armyrecognition.com/military-products/navy/frigates/type-054b-jiangkai-iii-guided-missile-frigate>; Arun Bishnoi, “China Commissions First Type 054B Next Generation Frigate,” Overt Defense, January 27, 2025, <https://www.overtdefense.com/2025/01/27/china-commissions-first-type-054b-next-generation-frigate/>，檢索日期：2025年9月26日。

表一：美、「中」兩國核潛艦噪音值比較表

噪音來源/潛艦型別	噪音強度 (分貝)
海洋背景噪音	90
美國「海狼級」、「維吉尼亞級」核攻擊潛艦	95
中共「093型」核攻擊潛艦	110
中共「094型」核彈道導彈潛艦	120

參考“Submarine Noise,” Submarine Matters, October 6, 2016, <http://gentle seas.blogspot.com/2016/10/submarine-noise.html>，檢索日期：2025年7月21日，由作者自行製表。

一)均已採用IPS構型，研判未來更多新造水面艦船都將採用此設計。持平而論，共軍水面艦船推進系統的設計與性能，確實已達先進海軍水平。

參、中共潛艦推進系統概述

中共海軍潛艦包括柴電動力與核動力兩種不同構型。核潛艦的推進系統較為單純，問世近70年來系統布局未出現太大改變；柴電潛艦的「絕氣推進系統」(AIP)卻出現多次更迭。有關潛艦推進系統發展，說明與分析如后：

一、核動力潛艦

(一)共軍服役的核潛艦計「093型」核攻擊潛艦與「094型」核彈道導彈潛艦

兩型。海軍發展初期，核潛艦推進系統存在著重大技術缺陷，從而衍生出操作安全問題，如航速過慢，易於被敵方反潛兵力偵測與攻擊，加上官兵暴露於高劑量輻射環境中，對操作人員的健康形成嚴重隱患。¹⁹尤有甚者，核潛艦航行時的噪音過大，成為長期困擾海軍無法有效解決的難題，並對戰術與戰略任務執行形成嚴重制約。然經不斷地改進與系統完善，當前服役中的各型核潛艦，水下航速與美國海軍同型潛艦不相上下，²⁰惟噪音水平仍較美軍同型潛艦高出許多(如表一)。

(二)為解決潛艦航行噪音過高的問題，中共在建造下一代核潛艦時將會引進「泵噴式推進器」(pump-jet propulsor，如圖二)與「自然循環核反應器」(nuclear reactor with natural circulation capability)等嶄新技術，²¹用以拉近與美軍間的「靜音技術差距」(quieting technology gap)。就中共海軍核潛艦推進系統的發展路線而言，鑑於「壓水式」反應器技術已趨成熟並具備長期穩定運行經驗，除非未來引進「第四代」反應器做為替代方案，否則毋須在不同型式反應器間進

註19：CIA Directorate of Intelligence, “China Rethinks Its Nuclear Submarine Program,” December 1984, <https://www.cia.gov/readingroom/docs/CIA-RDP85T00310R000300090003-2.pdf>，檢索日期：2025年9月27日。

註20：Zahra Ahmed, “5 Fastest Submarines in the World,” Marine Insight, February 21, 2024, <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/fastest-submarines-in-the-world/>，檢索日期：2025年9月15日。

註21：Christopher P. Carlson and Howard Wang, A Brief Technical History of PLAN Nuclear Submarines, China Maritime Report No.30(Newport, RI: U.S. Naval War College China Maritime Studies Institute, August 2023), p.19; Julian Kerr, “Future Submarine Pumpjet propulsion technology choice still not well explained,” Australian Defence Magazine, 7 August, 2018, <https://www.australiandefence.com.au/sea/future-submarine-pumpjet-propulsion-technology-choice-still-not-well-explained>，檢索日期：2025年9月12日。

行艱難的技術選擇。共軍在該領域當前重點，應集中於對「壓水式」各子系統進行性能優化與技術升級，特別是降低航行時的輻射噪音與機械震動，以強化潛艦整體的匿踪能力與作戰效能。

二、柴電動力潛艦

不同於中共海軍核潛艦推進系統的發展路線較為穩定，其在柴電潛艦「絕氣推進系統」(AIP)的未來發展上，卻須在多個系統間進行選擇，潛在選項包括燃料電池、鋰離子電池與核電池等。以下將優先說明共軍現行採用的「史特林引擎」及其性能限制，再分析其他型式的AIP優劣，期有助研判中共海軍AIP技術的可能趨勢與水下戰力。

(一)史特林引擎

1. 海軍在1980年代，即著手進行AIP技術的研究，1990年代末期，確立以「史特林引擎」為核心的技術發展路線；²²最初，由瑞典「考克姆公司(Kockums AB)」引進史特林絕氣推進引擎技術。²³其後，經過多年的投入與技術吸收，「中船重工」-第711研究所，於2005年時成功研製具



圖二：美國「維吉尼亞級」潛艦

資料來源：〈世界上最先進的潛艇推進方式：潛艇泵噴推進器〉，每日頭條，2016年5月6日，<https://kknews.cc/military/55g8k.html>，檢索日期：2025年9月11日。

完全自主知識產權的國產「史特林引擎」，其技術指標與瑞典製的「V4-275R」系列產品性能相埒。當前，共軍柴電潛艦使用的引擎係由「上海齊耀動力技術有限公司」提供。²⁴配備「史特林引擎」的柴電潛艦，可在毋須上浮補充氧氣的情況下，利用柴油和液態氧燃燒產生熱能，驅動引擎發電提供推進所需的動力。相關評估指出，配備該型引擎的「039B型」潛艦，在4節航速下可潛航2,300至2,500浬，航程較早期的「039A」高出數倍。²⁵

2. 該引擎雖具備結構簡單與易於維護

註22：〈深度：淺談中國海軍039潛艇，AIP技術成戰略意義〉，新浪軍事，2014年2月18日，<https://mil.news.sina.com.cn/2014-02-18/1533764810.html?from=wap>，檢索日期：2025年9月17日。

註23：Sarah Kirchberger, China's Submarine Industrial Bases: State-Led Innovation with Chinese Characteristics, China Maritime Report No.31(Newport, RI: U.S. Naval War College China Maritime Studies Institute, September 2033), p.16。

註24：該公司前身為中國艦船研究院711研究所的特種發動機研究室，該室經重組與轉型後成為上海齊耀動力技術有限公司，目前由中船重工集團公司與711研究所共同控股，係中國唯一史特林引擎生產商。參見〈公司介紹〉，上海齊耀動力技術有限公司，<http://www.micropowers.com/m/company.aspx>；梁利兵，〈中國掌握國產AIP發動機技術 並成功用於潛艇部隊〉，鳳凰網，2008年1月31日，https://news.ifeng.com/mil/2/200801/0131_340_385166.shtml，檢索日期：2025年9月21日。

註25：同註22。

等優點，惟其輸出功率過低、充電效率過慢，²⁶加上系統壓力限制操作水深，²⁷這必須透過提升引擎功率與排氣壓力方能改善，²⁸否則將會增加潛艦的「暴露率」(in-discretion rate)，並降低其水下機動能力。²⁹2021年12月，中共《環球時報》指出，「711研究所」已成功完成全球最大功率史特林引擎運轉測試，額定功率高達320千瓦，電能轉換效率為百分之四十，³⁰這對提升中共海軍柴電潛艦水下戰力，具有相當助益。

(二) 燃料電池

1. 此類電池是將燃料和氧化劑化學能直接轉化為電能的裝置，³¹依電解質的不同，可分為五種燃料電池(包含磷酸、鹼性、固體氧化物、質子交換膜與熔融碳酸

鹽等型式)。³²其中「質子交換膜燃料電池」無腐蝕性、壽命長、工藝簡單且安全可靠，其功率密度係燃料電池中性能指標最佳者；因此，成為各國海軍發展AIP的優先選項。³³2002年3月，德國潛艦製造商「HDW公司」在建造「212A型」柴電潛艦時引進此種燃料電池系統，讓其水下續航力較傳統的「209型」潛艦提高4.4倍，³⁴暴露率亦由百分之九下降三個百分點，³⁵有效提升「212A型」潛艦的生存性與戰鬥力。

2. 1950年代，中共科研單位已開始對燃料電池技術進行探索，到了1990年代，「中國科學院」亦曾組織研究團隊對「質子交換膜燃料電池」進行研究；³⁶以此觀之，中共在燃料電池領域應已累積相關能

註26：Sarah Kirchberger, op.cit., pp.17-18。

註27：史特林引擎的工作壓力為20巴(bar)，配備此型絕氣推進系統的潛艦最大潛深被限制在水深200公尺內，欲在更深水域執行任務必須額外安裝一套排氣增壓系統(exhaust gas intensifier system)方能有以致之。Luca Peruzzi, "Developments in Lithium-ion Batteries and AIP Systems for Submarines," European Security & Defence, 1 December 2023, <https://euro-sd.com/2023/12/articles/34972/developments-in-lithium-ion-batteries-and-aip-systems-for-submarines/>, 檢索日期：2025年9月19日。

註28：鼎盛POP3，〈深度：中國潛艇AIP系統和瑞典類似，發展前途最好〉，新浪軍事，2014年2月7日，<https://mil.news.sina.com.cn/2014-02-07/1753763117.html>，檢索日期：2025年8月29日。

註29：「暴露率」指潛艦巡航期間暴露行蹤時間至占全部巡航時間的比率。Commodore Lalit Kapur, "DPG POLICY BRIEFS India's Submarine Decision," Delhi Policy Group, May 13, 2022, <https://www.delhipolicygroup.org/public/publication/detail/indias-submarine-decision-2829>，檢索日期：2025年9月22日。

註30：Liu Xuanzun, "China develops world's most powerful Stirling engine," Global Times, December 22, 2021, <https://www.globaltimes.cn/page/202112/1243157.shtml>，檢索日期：2025年8月29日。

註31：馬伯岩，〈潛艇AIP系統和燃料電池〉，《船電技術》(武漢市)，2007年第4期，頁227。

註32：彭澎，〈燃料電池技術及其在潛艇動力方面的應用前景〉，《船電技術》(武漢市)，2003年第1期，頁27。

註33：同註32，頁28~29。

註34：丁剛強、彭元亭，〈質子交換膜燃料電池在軍事上的應用〉，《船電技術》(武漢市)，2007年第3期，頁191。

註35：同註31，頁229。

註36：參與初期燃料電池研究的單位有武漢大學、天津電源研究所、長春應用化學研究所與大連化學物理研究所，這些機構進行以氫、氨氣為燃料的鹼性燃料電池研究。除車用大功率質子交換膜氫燃料電池的研發外，其他科研機構亦從事各型燃料電池的開發，如北京理工大學的磷酸型燃料電池，上海硅酸鹽研究所和上海交通大學的熔融碳酸鹽燃料電池研究，化工冶金所、吉林大學和華南理工大學的固體氧化物燃料電池研究等。龐志成、胡玉春，〈燃料電池技術原理和應用〉，《節能與環保》(北京市)，2002年12月，頁26~28。



圖三：日本「大鯨級」潛艦(圖左)與南韓「島山安昌浩級」潛艦(圖右)

資料來源：參考陳治程，〈南韓「島山安昌浩級」潛艦詢問度高 菲、波蘭、加拿大都有興趣〉，《自由時報》，2023年10月20日，<https://def.ltn.com.tw/article/breakingnews/4464600>，檢索日期：2025年9月22日；黎立珊、梁偉立，〈淺談潛艦「舵型」性能分析與比較〉，《海軍學術雙月刊》(臺北市)，第59卷，第4期，2025年8月1日，頁104，由作者彙整製圖。

量。由於貯氫與製氫係燃料電池研發與運用的關鍵技術，氫氣因易滲透且具高爆性，潛艦燃料電池所需的氫氣主要透過金屬製氫與燃料重組方式取得；³⁷至於氧氣可以液態方式攜行。當前中共在這兩個領域已建立完整的科研與製造能力；³⁸儘管其從事燃料電池研究已有相當時日，但未有公開資料顯示其已掌握此技術，並已運用於潛艦推進上。

(三) 鋰離子電池

1. 2022年3月，日本「大鯨級」(Taigei class)潛艦(如圖三左)首艘「大鯨號」(SS-513)成軍，該型潛艦的建成係

「海上自衛隊」水下兵力發展的一個里程碑。該潛艦絕氣推進安排的特殊處，在於未配備他國海軍採用的燃料電池或史特林引擎，其絕氣推進效應來自採用「鋰離子電池」取代傳統使用的鉛酸電池。「鋰離子電池」具有更高的電池放電率、更快的充電時間與更佳的能量密度，即使未配備AIP情況下，該款電池也能延長水下潛航時間，提升潛艦巡航速度，並讓整體作戰性能大幅提升。³⁹南韓海軍緊隨其後，新造的「島山安昌浩級」(KSS-III)第二批次潛艦中(如圖三右)，同樣導入此電池與AIP的複合動力配置技術，⁴⁰使該型潛艦的

註37：王秋虹、鄭克文編譯，〈燃料電池在船舶上的應用〉，《船電技術》(武漢市)，2001年第2期，頁59。

註38：1970年代後期，南開與浙江大學、北京有色金屬研究總院和「中國科學院」上海冶金所等機構開始儲氫材料的研究，已在化學法製備合金儲氫材料領域已取得國際領先地位；此外，「中國科學院」大連化學物理所則具備甲醇重組製氫系統的完整製造能力。平濤、陳瑾、張南林，〈艇用燃料電池AIP氫系統研究〉，《柴油機》(上海市)，2003年第2期，頁44-45。

註39：Eric Wertheim, "Japan's Advanced Lithium-Ion Submarines," U.S. Naval Institute, December 2022, <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2022/december/japans-advanced-lithium-ion-submarines>，檢索日期：2025年9月15日。

水下持續潛航時間超過20天。⁴¹

2. 此款電池雖然重量較輕且擁有較高能量密度，但存在著高度熱失控(thermal runaway)⁴²風險，嚴重時可能導致電池自燃甚至起火爆炸。⁴³雖然鋰離子電池的應用在安全上存在著隱憂，惟在能量密度等面向優勢，使其仍具備極高的戰術與戰略價值。外界普遍認為，中共海軍將此種電池運用於潛艦推進的相關研究早已行之多年，「中國艦船研究設計中心」的專家就曾公開撰文表示，新一代非核潛艦將配備「鋰離子電池」系統，⁴⁴加之「中」方在電動車領域已累積此電池設計與管理的豐沛經驗，⁴⁵未來海軍極可能在此技術基礎支援下，將鋰離子電池做為潛艦絕氣推進的優先選項。

(四) 核電池

1. 核電池是一種利用放射性同位素衰變放出載能粒子能量(如 α 及 β 粒子和 γ 射線)，或由它們引發的熱效應、光效應或電離作用等來產生電能的一種裝置。⁴⁶由於此電池是利用射線能量來產生電能，其工作原理不似核裂變或核融合會產生致命性核輻射，核洩漏的問題處理也較為容易。由於其能量密度高、可於極端環境下作業的特點，被廣泛運用於無人值守且須長期運作的裝備，例如航天器、人造衛星、水下監聽器與心臟節律器(artificial cardiac pacemaker，或稱心臟起搏器)。⁴⁷1960年代，中共即已著手進行核電池技術的研發，惟相關進展及在軍事領域的運用，甚少公開報導。

2. 中共將核同位素多用途發展視為未來能源轉型方向，⁴⁸學校、科研機構與民

註40：Daehan Lee, "South Korea's KSS-III Batch 2 Submarine to Feature Both AIP and Lilon Batteries," NAVALNEWS, 18 June 2021, <https://www.navalnews.com/event-news/madex-2021/2021/06/south-koreas-kss-iii-batch-2-submarine-to-feature-both-aip-and-li-ion-batteries/>, 檢索日期：2025年9月15日。

註41：〈韓國海軍新一艘KSS-III潛艇開工，可攜帶彈道導彈，預計2031年服役〉，搜狐，2024年11月2日，https://www.sohu.com/a/823085404_120649655，檢索日期：2025年9月30日。

註42：熱失控是影響鋰離子電池安全的主要原因，短路、過熱、機械損壞與過度充電等因素均可能引起熱失控。參見 "What is thermal runaway in lithium-ion batteries," gasmet, <https://www.gasmet.com/blog/what-is-thermal-runaway-in-lithium-ion-batteries-risks-and-causes/>，檢索日期：2025年9月16日。

註43：Andrew S. Erickson, Jonathan Ray, and Robert T. Forte, "Underpowered: Chinese Conventional and Nuclear Power and Propulsion," quoted in Andrew S. Erickson, ed., Chinese Naval Shipbuilding: An Ambitious and Uncertain Course(Annapolis, Maryland: Naval Institute Press, 2016), p.239。

註44：崔為耀，〈鋰離子蓄電池在非核動力潛艇上的應用研究〉，《船電技術》(武漢市)，2013年5期，頁55~58。

註45：王峰、張棟、孫飛龍，〈鋰離子電池裝備於常規潛艇可行性分析〉，《船電技術》(武漢市)，第42卷，第10期，2022年10月，頁153。

註46：核電池又稱原子電池、放射性同位素電池(radioisotope battery)或放射性同位素產生器(radioisotope generator)。陳建，〈前景廣闊的核電池〉，《現代物理知識》(北京市)，第19卷，第5期，2007年10月18日，頁31；郝少昌、盧振明、符曉銘、梁彤祥，〈核電池材料及核電池的應用〉(北京市)，《原子核物理評論》，第23卷，第3期，2006年9月20日，頁353。

註47：郝少昌、盧振明、符曉銘、梁彤祥，〈核電池材料及核電池的應用〉(北京市)，《原子核物理評論》，第23卷，第3期，2006年9月20日，頁356~357。

間企業亦積極開展對核電池的研究。近期在核電池的研發上也已取得重大成就。如江蘇無錫「貝塔醫藥科技有限公司」聯合「西北師範大學」成功開發全球首款基於碳化矽半導體材料的「碳-14」核電池-「燭龍一號」，其能量轉換率突破百分之八，具50年設計壽命且性能衰減率小於百分之五。⁴⁹又如，「蘇州大學」的研究團隊，提出一種基於「銅系元素」的微型核電池結構設計架構，成功將放射性核元素「衰變能」轉換為「光能」的效率提升近8,000倍，為核電池微型化與高效化奠定技術基礎。⁵⁰未來中共若能在核電池功率、密度技術上取得突破，有望成為潛艦絕氣推進系統的一個嶄新選項，並將從根本上改變現有AIP的技術架構與系統配置。

3. 傳統柴電潛艦配備AIP後，可在毋須消耗電瓶能量情況下長期潛航（最長可達三週），降低被反潛兵力偵獲的機率，並賦予潛艦艦長巨大的戰術彈性與行動自由。⁵¹當前，中共柴電潛艦採用的AIP係瑞典「考克姆公司」轉移的史特林引擎技術

，相較燃料電池與鋰離子電池，這項技術成熟但不具戰術優勢，共軍未來可能選擇其他技術做為新一代潛艦的絕氣推進系統。再就長期運行與維護保養而言，配備核電池潛艦具有成為未來AIP選項的潛力；據傳共軍曾將核電池系統安裝於「041型」潛艦進行測試，⁵²惟其功率密度是否突破與戰術實用性等，目前並無公開資訊可以佐證。

中共柴電潛艦下一代AIP的定型，取決於各系統的技術備便與海軍的戰術考量，燃料電池、鋰離子電池甚至核電池均可能列裝，而最終結果尚待進一步的技術驗證與軍事評估。

肆、中共核動力航艦推進系統

2012年，中共首艘航艦「遼寧號」正式交付海軍，該艦以蒸汽透平機做為動力來源。2013年2月，「中船重工」官網發布消息指出，該集團在重大科研項目申報取得成果，「國家科技部」批准立項其提出的「核動力船舶關鍵技術及安全研究」

註48：〈“充電”或成歷史？產業鏈公司積極探索核電池〉，新浪財經，2024年1月11日，<https://finance.sina.cn/2024-01-11/detail-inaccytx6020090.d.html>，檢索日期：2025年9月17日。

註49：「銅系元素」是第89號元素-銅到103號元素-鏷間共15種放射性元素的統稱。〈國內首款碳-14核電池「燭龍一號」問世，理論上可持續放電上千年〉，新浪科技，2025年3月11日，<https://finance.sina.com.cn/tech/digi/2025-03-11/doc-inphsqf8578111.shtml>，檢索日期：2025年9月16日。

註50：張曄，〈可用上千年！效率最高的輻光伏核電池在我國面世〉，《科技日報》，2024年9月23日，https://www.stdaily.com/web/gdxw/2024-09/23/content_233315.html，檢索日期：2025年9月23日。

註51：同註43。

註52：David Axe, “China has built a submarine with a propulsion system nobody else has. Watch out, US Navy: Unique hybrid propulsion system offers a key advantage,” The Telegraph, 12 February, 2025, <https://www.telegraph.co.uk/news/2025/02/12/china-mystery-nuclear-battery-submarine-taiwan-war-us-navy/>，檢索日期：2025年8月28日。



圖四：中共海軍核動力航艦想像圖

資料來源：盧伯華，〈港媒傳中國開建2艘10萬噸核航艦 造艦數量將迎來新高峰〉，中時新聞網，2024年2月26日，<https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240226004577-260409?chdtv>，檢索日期：2025年9月16日。

-863項目與「小型核反應堆發電技術及其示範應用」，意味中共已著手進行核動力航艦的先期規劃工作(核動力航艦想像圖，如圖四)。⁵³2024年3月，中共「全國人大與政協會議」(一般稱兩會)期間，海軍政委袁華智將軍曾表示：「海軍建造航艦沒有技術問題，第4艘航艦是否採用核動力很快會公布。」⁵⁴戰略學者普遍認為，就軍事戰略與海軍作戰而言，共軍第4艘及後續建造的航艦，均會採核動力推進。

當前中共海軍尚未公布核動力航艦發展路線圖，顯示此計畫存在著技術問題亟

待克服，最可能應係核動力航艦推進系統的定型問題，即海軍將選用何種反應器做為未來推進系統。前中共海軍軍官姚誠指出，中共建造核動力航艦應會採用先進技術；就核反應器言，應不會用幾十年前的技術，肯定會採取最新科技。⁵⁵此一看法雖無法代表官方，惟中共當前在「第四代」反應器研發取得進展情況下，軍方採用新興科技以追求新質戰鬥力的可能性仍高，不應排除將其納入航艦推進系統的列選清單。以下將針對「壓水式」與「第四代」反應器相關性能，及運用於航艦推進的可行性進行分析。

一、核反應器性能概況

當前全球僅美、法兩國擁有核動力航艦，且均採「壓水式」反應器提供動力。有關「壓水式」與中共發展成熟的「第四代」反應器技術概況，分析如后：

(一) 壓水式反應器

1. 1954年9月，美軍核潛艦「鸚鵡螺號」(USS Nautilus SSN-571)成軍服役，成為人類歷史上首艘以核反應器提供動力的軍艦。⁵⁶此後70餘年，不同艦型的核動

註53：「兩會」指全國人民代表大會與中國人民政治協商會議的統稱。〈中共研製核動力航艦〉，《星島日報》，2013年2月23日，<https://hk.news.yahoo.com/%E4%B8%AD%E5%9C%8B%E7%A0%94%E8%A3%BD%E6%A0%B8%E5%8B%95%E5%8A%9B%E8%88%AA%E6%AF%8D-220622574.html>，檢索日期：2025年9月11日。

註54：林宸誼，〈大陸第四艘航艦採核動力？海軍政委袁華智：很快會公布〉，聯合新聞網，2024年3月6日，<https://udn.com/news/story/7331/7812247#>，檢索日期：2025年8月23日。

註55：陳筠，〈中國核動力航艦有譜？四川核反應器原型曝光〉，yahoo新聞，2024年11月16日，<https://tw.news.yahoo.com/%E4%B8%AD%E5%9C%8B%E6%A0%B8%E5%8B%95%E5%8A%9B%E8%88%AA%E6%AF%8D%E6%9C%89%E8%AD%9C-%E5%9B%9B%E5%B7%9D%E6%A0%B8%E5%8F%8D%E6%87%89%E5%99%A8%E5%8E%9F%E5%9E%8B%E6%9B%9D%E5%85%89-200821944.html>，檢索日期：2025年9月12日。

力軍艦陸續問世，包括潛艦、巡洋艦與航空母艦，無一例外地均採用「壓水式」反應器。此型反應器不僅是核動力艦船推進的主流選項，在民用核電領域亦被廣泛地採用。由於發展歷史久遠，在材料製造、設計規範、人員訓練與安全標準，均已建立完整體系，技術成熟度高且驗證安全。再者，反應器使用不同濃度鈾-235做燃料，⁵⁷其燃料利用率低，必須定期進行燃料補充，此過程動輒耗時2-3年，對海軍的整體戰備與作戰部署構成不利影響。

2. 反應器採用輕水做為冷卻劑，其運作效率受限於水的熱力性質，致使整體熱效率偏低。同時，此型反應器對冷卻系統功能的完整要求極高，當冷卻系統嚴重失能時可能導致堆芯熔毀；即令如此，「壓水式」反應器長期運作累積的操作經驗與高可靠度，仍然成為各國海軍發展核動力推進系統的首選。美軍「福特級」(Gerald Ford class)航艦搭載的「A1B壓水式」反應器，輸出功率700百萬瓦，設計使

用年限達90年，係當前全球最先進的艦用核反應器。⁵⁸

(二) 第四代反應器

發展中的「第四代」反應器技術計有氣冷、超臨界水冷、鉛冷、熔鹽、鈉冷與超高溫氣冷式等六種，除氣冷與超臨界水冷式兩種技術外，「中」方在其他四個領域均已建造試驗型或示範型核反應器進行運轉測試。這四型核反應器運用於海軍船艦推進的可能性，分析如后：

1. 鉛冷式反應器

(1) 此型係以鉛或鉛鉍合金做冷卻劑，具優異熱導性，能有效將堆芯熱能帶出，並擁有化學穩定性與良好的 γ 射線屏蔽功能；⁵⁹由於反應器體積小具較高安全性，適合做為核潛艦推進之用。⁶⁰1950年代，前蘇聯即已展開此類反應器的應用研究，並成功建造7艘「阿爾法級」(Alfa class)核攻擊潛艦，還曾創下潛航航速42節的世界紀錄(如圖五)。⁶¹

(2) 鉛冷式反應器存在的技術挑戰包

註56：“USS Nautilus(SSN-571),” Naval History and Heritage Command, <https://www.history.navy.mil/browse-by-topic/ships/submarines/uss-nautilus.html>, 檢索日期：2025年9月14日。

註57：各國海軍核反應器使用的「鈾235」濃度存有相當大的差異，美、英海軍使用的係武器級高濃縮鈾(U235濃度93.5%)，俄、印度使用高濃縮鈾(U235濃度 $\geq 20\%$)，中共與法國則使用低濃縮鈾。Alan Kuperman, and Frank von Hippel, “US study of reactor and fuel types to enable naval reactors to shift from HEU fuel,” International Panel on Fissile Materials, April 10, 2020, https://fissilematerials.org/blog/2020/04/us_study_of_reactor_and_f.html, 檢索日期：2025年8月12日。

註58：熱效率通常以百分比的形式表示，熱效率越高表示能源轉換或利用過程中能有效利用較多的熱能，能效越好。“Nuclear-Power Ships,” World Nuclear Association, 4 February 2025, <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships>, 檢索日期：2025年8月14日。

註59：Magdi Ragheb, “Nuclear Naval Propulsion,” IntechOpen, 31 October 2010, <https://www.intechopen.com/chapters/19667#>, 檢索日期：2025年9月27日。

註60：〈可用於核潛艇，大陸鉛基核反應爐技術取得突破〉，ETtoday軍武新聞，2016年9月20日，<https://www.ettoday.net/news/20160920/778673.htm>, 檢索日期：2025年9月14日。



圖五：前蘇聯海軍「Alfa級」核潛艦

資料來源：〈705型核潛艇〉，維基百科，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/705%E5%9E%8B%E6%A0%B8%E6%BD%9C%E8%89%87>，檢索日期：2025年9月16日。

括液態鉛對合金鋼中的鎳與鉻元素具強烈腐蝕性，這会造成管路劣化甚至嚴重損傷；其次，鉛鈹合金密度大、流動性弱，必須維持高溫運作以防止冷卻劑凝固造成管路堵塞。另外，鉛鈹合金(主要是鈹)在中子輻照下會生成具高度放射毒性的鈾210，此同位素會沉積於管路、泵體與熱交換器表面，維修或拆解裝備時，防護不當將危及人員安全。⁶²故各國海軍對核反應器的操作訂有嚴格的安全要求，⁶³此類反應

器缺點也限制其在艦船推進的運用，未來發展端視能否克服這些技術瓶頸。

2. 熔鹽反應器

(1) 此型反應器是將裂變燃料溶解於高溫熔融的氟化鹽中，並以熔鹽本身兼做冷卻劑與工作流體，再透過熱交換產能動能與電能。中共目前發展的此類反應器係以非裂變元素鈾為燃料，較傳統「壓水式」，在燃料效率與運作安全上具優勢。鈾-232不具裂變能力，吸收一個中子後即變成鈾-233，再經 β 衰變後成為具裂變性的鈾-233，即可進行可控的核連鎖反應，1噸的鈾可產生相當200噸鈾的能量，⁶⁴更具備「高能量密度」與「資源取得性高」兩項特性。熔鹽的高溫穩定性和化學惰性，可在低壓環境下穩定運作，⁶⁵當燃料發生洩露時，熔鹽會迅速冷卻凝固。

(2) 熔鹽反應堆設有「冷凍塞」機構，堆芯溫度超過額定值時，底部冷凍塞將熔化開啟，核燃料流入應急儲存罐防止堆芯熔毀。⁶⁶傳統設計係以熔鹽將水加熱產生蒸汽來驅動透平機，新近發展則引進超

註61：〈中國鉛基堆「麒麟一號」具備工程實施能力〉，壹讀，2016年9月26日，<https://read01.com/zh-tw/EkN86R.html>，檢索日期：2025年9月11日。

註62：〈大國碳中和之四代核電：解決核能利用痛點，向「終極能源」過渡〉，上海東方財富證券投資諮詢有限公司，2025年1月9日，頁30，https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202501091641868160_1.pdf?1736434849000.pdf，檢索日期：2025年9月19日。

註63：Neil Henry, "Rickover's Nuclear Navy: Making Men Into Machines," The Washington Post, June 16, 1981, <https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1981/06/16/rickovers-nuclear-navy-making-men-into-machines/1c9bb80b-126c-4109-a256-3459f53a0a79/>，檢索日期：2025年9月13日。

註64：〈第四代鈾基熔鹽核反應堆能上艦，說明中國核動力航艦已萬事俱備〉，騰訊網，2023年12月13日，https://news.qq.com/rain/a/20231213A04G0B00?suid=&media_id=，檢索日期：2025年9月23日。

註65：〈全面商用！中國啟用鈾核反應堆，是否要應用到核動力航艦上〉，網易，2023年6月16日，<https://www.163.com/dy/article/I7CDQ0CV0511DIJU.html>，檢索日期：2025年8月24日。

臨界二氧化碳汽輪機取代蒸汽透平機。此嶄新組合熱電效率接近百分之五十，體積卻祇有傳統構型的三十分之一，大幅降低系統的尺寸與重量；再者，更換燃料時毋須停機，這項特性使其在艦用推進領域的運用上具備巨大潛力。⁶⁷由於熔鹽具腐蝕性，目前此型反應器多在低溫下運作，自然對其熱效率與功率輸出形成相當制約，有待新技術進一步地完善與突破。⁶⁸

3. 鈉冷式反應器

(1)係以液態金屬鈉為冷卻劑，金屬鈉的熔點為98℃，易於熔解與啟動；沸點883℃不易沸騰產生氣泡；此外，鈉的熱導率高於水，一旦堆芯出現異常時可快速帶出熱量，降低堆芯熔毀風險。⁶⁹由於此類反應器具功率密度高、小型化潛力、固有安全性好與全壽期毋須更換燃料等優點，⁷⁰1950年代，美軍建造第二艘「海狼號」(USS Seawolf, SSN-575)時，即曾實驗性地採用鈉冷式反應器做為潛艦推進系統



圖六：美國海軍「海狼號」核潛艦

資料來源：〈USS Seawolf(SSN-575)〉，Wikipedia，[https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Seawolf_\(SSN-575\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Seawolf_(SSN-575))，檢索日期：2025年9月13日。

(如圖六)。

(2)鈉冷式反應器存在的問題，包含冷卻劑洩漏時會形成劇烈的「鈉水反應」(sodium-water reactions)⁷¹引發爆炸，產生的高劑量輻射則會對官兵健康造成傷害；⁷²加上，建造成本高且操作複雜，即便輕微故障都可能要長期停機維修。⁷³基於這些原因，美國海軍核動力推進計畫主持

註66：同註64。

註67：〈江南造船廠鈉基熔鹽堆集裝箱船開建，航艦動力新選擇。甘肅武威鈉基熔鹽堆試運行，商業落地加速。白雲鄂博鈉資源豐富，能源安全有保障！〉，東方財富網，2024年3月6日，<https://caifuhao.eastmoney.com/news/1405104924>，檢索日期：2025年9月11日。

註68：臺灣電力企業聯合會與廖識鴻，〈全球核能發電現況與發展趨勢〉(臺北市：財團法人中技社，2024年2月)，頁41。

註69：熱導率(Thermal conductivity或稱導熱係數)是衡量物質傳導熱能能力的一項物理量，其單位為瓦特/公尺克耳文(W/mK)，鈉的熱導率為71.2，高於水的0.5777。徐銖、楊紅義，〈鈉冷快堆及其安全特性〉，《物理》(北京市)，第45卷，第9期，2016年9月，頁565~566。

註70：戴晶晶，〈全球首次，中國小型鈉冷快堆獲得重要突破〉，界面新聞，2022年12月18日，<https://www.jiemian.com/article/8590693.html>，檢索日期：2025年9月24日。

註71：Office of Nuclear Energy, "Sodium-cooled Fast Reactor(SFR)Technology and Safety Overview," U.S. Department of Energy, February 18, 2015, <https://www.nrc.gov/docs/ML1504/ML15043A307.pdf>，檢索日期：2025年9月14日。

註72："Seawolf Tries Sodium," NuclearNewswire, Nov 15, 2017, <https://www.ans.org/news/article-1999/seawolf-tries-sodium/>; Edward H. Lundquist, "Liquid Sodium Reactor Powered USS Seawolf Was Part of First Nuclear Task Force," DefenseMediaNetwork, March 30, 2014, <https://www.defensemianetwork.com/stories/liquid-sodium-reactor-powered-uss-seawolf-was-part-of-first-nuclear-task-force/>，檢索日期：2025年9月24日。

人李高佛(Hyman G. Rickover)將軍最終決定捨棄此設計；而「壓水式」反應器遂成為美軍核動力推進的唯一選項。由於鈉冷式反應器是在常壓條件運行，這給反應器與迴路設計帶來顯著優勢，若能在材料防護與冷卻管路密封取得突破，其在海軍推進運用上仍具高度發展空間。

4. 超高溫氣冷式反應器

(1)反應器以氦氣做冷卻劑，並採用直徑小於1毫米的顆粒型燃料元件，其內核由碳氧化鈾或二氧化鈾構成，並被碳和碳化矽包圍，並為裂變產物牢牢封住。燃料顆粒被封裝於撞球大小的石墨球或棱柱形石墨塊中堆置構成反應器的堆芯。⁷⁴超高溫氣冷式反應器可採三迴路設計，一迴路為氦氣間接循環，負責將堆芯熱能帶出，二迴路為氦-氮循環用來驅動燃氣渦輪機做功，三迴路則利用燃氣渦輪機的排熱將水加熱產生蒸汽驅動透平機發電。若將燃氣循環與蒸汽循環兩者聯合，可進一步將系統熱效率提高到百分之四十五。

(2)此反應器亦可採用超臨界二氧化碳做冷卻劑，可提高能量轉換效率並大幅地降低系統機組體積。反應器的燃料口位

於頂部，底部有卸料口，可在毋須停機情況下進行燃料補充；此外，燃料元件在使用週期可多次循環直到無法使用為止。⁷⁵前述特性對軍事部門極具吸引力，不僅可減少燃料更換時間、降低後勤負荷，也大幅增加海軍兵力調度與部署的靈活性。超高溫氣冷式反應器的安全性高，在遭遇冷卻失效或重大戰損時，堆芯都不會熔化，同時造成放射性元素大量外洩。

二、中共核航艦推進系統的發展分析

就艦用核反應器而言，設計必須能滿足的要件包括具備高功率密度，以實現優異的「功率對體積比」(power-to-volume ratio)，並滿足艦船空間有限條件下的推進與供電需求；第二、擁有長期堆芯壽命(long core life)，減少頻繁進廠抽換燃料時間，降低對艦船運用與部署的不利影響，⁷⁶滿足前揭功能的核動力推進系統，方能在作戰效能與後勤保障方面獲得支撐。比較各國海軍使用的「壓水式」與「第四代」核反應器原理及技術概況，並對其應用於艦船推進的優點與限制，逐項說明如下：

(一)優點

註73：Thomas B. Cochran, Harold A. Feiveson, Walt Patterson, Gennadi Pshakin, M.V. Ramana, Mycle Schneider, Tatsujiro Suzuki, and Frank von Hippel, Fast Breeder Reactor Programs: History and Status, Research Report 8 International Panel on Fissile Materials(Princeton, NJ: Princeton University Program on Science and Global Security, February 2010), pp.90-91。

註74：“Generation IV Nuclear Reactors,” World Nuclear Association, 30 April 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors>，檢索日期：2025年9月12日。

註75：同註62，頁32~34。

註76：「功率對體積比」，又稱為「體積功率密度」，指的是設備在單位體積內所能輸出的功率，單位為瓦特/升(W/L)或瓦特/立方公尺(W/m³)。同註43，頁240~241。

1. 熱效率高。各型「第四代」反應器的熱效率普遍優於「壓水式」反應器，意味著燃料轉換效率更高，可降低燃料耗損與反應器尺寸，代表反應器小型化將具備更大的可能性。

2. 燃料多元。「第四代」反應器可使用鈾-232或鈾-238等低濃縮或未濃縮燃料，大幅簡化燃料精煉製程，裂變後的放射性產物輻射劑量亦較低，核廢料處理容易且安全性也較高。

3. 低燃料消耗率。鈉冷式與鉛冷式反應器因採用快中子裂變，燃料消耗率低，可提高燃料整體利用效率；另熔鹽與超高溫氣冷式反應器補充燃料時可不用停機，而「壓水式」反應器則須定期進行長達兩至三年的燃料更換工程。

4. 固有安全性高。「第四代」反應器在設計時導入多重被動安全機制，即使冷卻系統故障或發生外部事件時，亦不致出現堆芯熔毀的重大事故，也有效提升反應器的事故耐受性與戰損生存能力。

(二) 限制

1. 功率密度普遍過低。「第四代」反應器具有高熱效率，惟其功率密度遠不及「壓水式」反應器，這意味輸出相同功率必須加大堆芯與輔助系統的體積，對原本空間有限的海軍艦船形成巨大挑戰。

2. 工程成熟度待驗證。中共投入建設的「第四代」反應器多屬實驗型或示範型

，尚未通過裝艦前的設計指標與操作流程認證，畢竟這些反應器必須經過長期運轉監控，證明其安全性後方能進行部署。

3. 材料問題亟待克服。鉛冷式需解決鉛鉍合金對管路造成的高腐蝕；熔鹽反應器則需克服高溫與高腐蝕對管材與泵體造成的損害；鈉冷式亦存在著材料防護與冷卻管路密封等挑戰，這些瓶頸猶待材料科學取得突破性進展方能克服。

4. 安全防護機制待建。「第四代」反應器相較壓水式所涉及的安全標準、人員防護、操作規範與應變機制並不完善，這些細節與程度仍需進一步確認與論證，畢竟這些技術議題必須審慎處理，否則將會造成嚴重核安隱患。

(三) 綜合分析

1. 「第四代」反應器擁有高安全性、熱效率高與燃料多元等多項優點，惟在材料製造、標準制定與技術成熟度等面向仍存在許多挑戰，且問題短期內似乎甚難獲得徹底解決；而「壓水式」反應器技術成熟具長期安全運轉經驗，咸信中共海軍甚難捨棄此一選項而改採技術尚在驗證中的「第四代」反應器。

2. 證諸海軍艦船推進發展歷史，倘共軍將「第四代」反應器引進做為核航艦推進之用(性能指標，如表二)，首選應是鉛冷式反應器，其曾於多艘前蘇聯海軍「阿爾法級」潛艦服役；其次才是鈉冷式反應

表二：中共發展中的「第四代」核反應器應用軍事推進性能指標比較表

評估指標	鈉冷式	鉛冷式	熔鹽	超高溫氣冷式
工業基礎	高	高	高	高
後勤支援	高	高	高	高
技術備便	示範堆	實驗堆	實驗堆	示範堆
功率密度	高	高	中	中
熱效率	高	高	高	高
燃料取得	中	中	高	中
燃料添加	需停機	需停機	不需停機	不需停機
堆芯熔毀	中	低	低	低
技術挑戰	特殊冷卻系統	鉛腐蝕問題	抗腐蝕材料	耐高溫材料
軍用潛力	高	高	低	中

資料來源：擷取網路資料後，由作者綜整製表。

器，美軍在1960年代曾將此型反應器做為潛艦推進之用。至於其餘兩型反應器由於技術尚未完全成熟，應用於海軍艦船推進的機率相對較低。

3. 中共未來採用「壓水式」反應器做為核航艦動力系統的可能性仍高，尤其出現特殊徵候，如新建一個用於核動力航艦的「壓水式」反應器原型，並進行長時間運轉以驗證各項性能指標；或強化與俄國的核工業交流合作，並引進大型「壓水式」反應器相關技術，都可支持此一推論。畢竟俄羅斯海軍曾建造全球排水量最大的「颱風級」(Typhoon class)戰略導彈潛艦⁷⁷與「烏里揚諾夫斯克號」(Ulyanovsk)

核動力航艦，其在艦用大型反應器領域，確實擁有先進技術。

為化解更換燃料對作戰部署形成的不利影響，中共核航艦可能也仿效美軍採用高濃縮鈾，其可讓「福特號」航艦至少50年不用添加燃料；⁷⁸而「中」方為滿足此需求，必須重啟軍用濃縮鈾提煉基地，或由國營核工業公司進行鈾元素的精煉製造，才能達成此一目標。

伍、結語

中共海軍深知推進系統對戰術機動與遠洋部署的重要性，故在軍事現代化進程中，除提升戰鬥系統與武器裝備性能外，

註77：“SSBN Typhoon Class(Type 941),” Naval Technology, July 17 2020, <https://www.naval-technology.com/projects/ssbn-typhoon-class/?cf-view>, 檢索日期：2025年9月15日。

註78：李忠謙，〈中國下一艘航艦會是核動力嗎？專家直言「核反應爐技術不到位」，硬上恐成「全球最慢航艦」〉，yahoo新聞，2022年6月29日，<https://tw.news.yahoo.com/%E4%B8%AD%E5%9C%8B%E4%B8%8B-%E8%89%98%E8%88%AA%E6%AF%8D%E6%9C%83%E6%98%AF%E6%A0%B8%E5%8B%95%E5%8A%9B%E5%97%8E-%E5%B0%88%E5%AE%B6%E7%9B%B4%E8%A8%80-%E6%A0%B8%E5%8F%8D%E6%87%89%E7%88%90%E6%8A%80%E8%A1%93%E4%B8%8D%E5%88%B0%E4%BD%8D-%E7%A1%AC%E4%B8%8A%E6%81%90%E6%88%90-120001127.html>, 檢索日期：2025年8月24日。

其對推進系統的更新亦投入高度關注與相當資源。當前，共軍水面艦使用的推進系統已完全國產化，系統的性能亦不遜於西方國家產品，部分裝備在熱效率與功率輸出上甚至具有優勢。目前新造驅逐艦均以燃氣渦輪機做為動力來源，新一代護衛艦則仍採「雙柴油機聯合推進」模式，此種動力構型短期內應不會出現重大變化；而較可能改變的係大型兩棲船舶與綜合補給艦，隨著船艦對電力需求日增與遠海部署需求，預期這些艦艇將會逐步捨棄柴油機改成燃氣渦輪機，俾能更快速地抵達任務海域執行作戰。

中共核潛艦推進系統與動力構型發展已相當成熟，然仍須處理的係如何降低航行噪音以強化匿踪性。目前中共新一代核潛艦已引進多項先進技術，以改善噪音過大問題，「無軸泵推」技術的論證與研發亦已獲得實質性突破；但這些新興技術工程化並非「一蹴可及」，短期內列裝服役的機率不高。不同於一般核潛艦，中共在柴電潛艦推進系統目前處於轉型階段，為提升潛艦絕氣推進系統的性能，燃料電池、鋰離子電池與核電池均可能用來替代先前使用的「史特林引擎」。中共也早在這些領域展開廣泛的研究，並累積紮實的技術基礎與工程經驗；故新一代AIP的最終型式，主要仍取決於海軍戰術考量與技術備便等因素。

當前，核動力航艦係中共海軍尚待解決的最後一塊拼圖，此計畫雖尚未列入時程，但啟動只是時間問題，迄今懸而未決的最可能原因，應是反應器的定型問題。雖然其在「第四代」反應器研發已取得重大進展，且無論是具高熱效率與安全性、毋須停機即可更換燃料，這為海軍作戰與後勤補給提供更大彈性；然而這些反應器現多為實驗型與示範型，離實際做為航艦推進構型恐仍遙遙無期。再就裝備可靠度而言，「壓水式」反應器由於擁有長時間的運轉紀錄，也是軍用核動力推進的最佳選項，以美軍為例，過去70餘年間，此種反應器安全運行時間超過7,500個反應器年(reactor-year，指一座核反應器運行一年時間稱為1反應器年)，故共軍未來核動力航艦採用「壓水式」反應器的機率仍高。儘管中共當前雖擁有完善的民用核工業基礎，但核航艦從反應器設計、實驗運行到最終定型仍須相當時日；如一旦獲得俄國技術支援，將有助縮短其核動力航艦的研製與部署，並順利開展。



作者簡介：

翟文中先生，海軍軍官學校74年班，淡江大學國際事務與戰略研究所碩士。曾任職國防部參謀本部情報參謀次長室、國防部戰略規劃司、國防部整合評估司與國家安全會議，並擔任美國能源部Sandia國家實驗室訪問學者，現服務於國防安全研究院國防戰略與資源研究所。