

核动力民用船舶研究现状与展望

严新平^{1,2,3,4*}, 常兴山^{1,2,3,4}, 吴兵^{1,2,3,4}, 姚世卫⁵

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
5. 中国船舶重工集团公司第七一九研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要:本文综述了核动力民用船舶的发展历史、研究进展及面临的主要挑战,并探讨其发展趋势、应用路径。首先,回顾了核动力商船、核动力破冰船和海上浮动核电站三种典型应用的发展历程,总结了相关标准法规、监管机制现状。其次,系统梳理了当前国际在压水堆、快堆、熔盐堆、小堆、微堆等多种技术路线上的研究进展,分析其在民用船舶应用中的潜在优势,及安全性、经济性与监管方面的局限。最后,展望了小型化、模块化和固有安全方向的发展趋势,并建议通过固定航线示范运营、分段推船模式及聚焦应用场景、提升经济性、完善监管体系等措施,稳步推进核动力民船的开发与应用。

关键词:船用核动力;核动力商船;核动力破冰船;海上浮动核电站

中图分类号:U664,TL99

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.001

Current status and prospects of research on nuclear-powered civilian vessels

YAN Xinping^{1,2,3,4*}, CHANG Xingshan^{1,2,3}, WU Bing^{1,2,3,4}, YAO Shiwei⁵

- (1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. No. 719 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC), Wuhan 430064, China)

Abstract: This paper reviews the historical development, research progress, and major challenges of nuclear-powered civilian vessels, and further explores their developmental trends and potential application pathways. First, it outlines the historical evolution of three typical applications, namely nuclear-powered merchant ships, nuclear-powered icebreakers, and offshore floating nuclear power plants, and summarizes the current status of relevant standards, regulations, and regulatory frameworks. Secondly, this study systematically reviews the current international research progress on various technical routes such as pressurized water reactors, fast reactors, molten salt reactors, small modular reactors, and micro modular reactors, and analyzes their potential advantages in civilian ship applications, as well as their limitations in terms of safety, economy, and regulation. Finally, the paper forecasts trends towards miniaturization, modularization, and inherent safety, and suggests steady progress through land-based testing, demonstration operations on fixed routes,

收稿日期:2025-11-27

基金项目:中国工程院咨询项目“海洋装备产业链高质量发展战略研究”(2024-XBZD-01)资助

作者简介:严新平(1959—),男,教授,中国工程院院士,研究方向为水路交通系统的安全性、智能化和绿色技术。*通信作者:xpyan@whut.edu.cn

引用格式:严新平,常兴山,吴兵,等.核动力民用船舶研究现状与展望[J].中国航海,2026,49(1):1-17.

YAN X P, CHANG X S, WU B, et al. Current status and prospects of research on nuclear-powered civilian vessels[J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 1-17. (in Chinese)

segmented push-tug shipping modes, focused application scenarios, with the goal of improving economic efficiency and regulatory framework refinement.

Key words: nuclear marine propulsion; nuclear-powered merchant ship; nuclear-powered icebreaker; offshore floating nuclear power plant

全球航运业是现代经济的命脉,其碳排放问题日益受到关注,每年消耗约 3.5 亿 t 化石燃料,产生的二氧化碳排放量约占全球总排放的 3%^[1]。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)在 2023 年通过了新的减排战略,明确提出到 2050 年实现国际航运业温室气体净零排放的目标。在此背景下,航运业面临前所未有的绿色转型压力,迫切需要突破传统化石燃料动力的局限,寻找零碳或低碳的新型动力方案^[2-5]。

核能作为一种绿色、清洁、高能量密度的能源重新受到重视^[6]。早在 20 世纪,核动力就曾成功应用于少数民用商船;目前全球已有约 700 座核反应堆在军用舰船上安全运行^[7],积累了丰富的运行经验。核动力船舶具有零排放、续航里程长、单船功率大、无需频繁加注燃料等独特优势,根据研究可在全寿命周期内减少高达 98% 的温室气体排放,并几乎完全消除 SO_x、NO_x 等大气污染物^[8]。此外,在超大型集装箱船(不少于 15 000 TEU)以及超大型油轮(Very Large Crude oil Carrier, VLCC)等对动力需求极高的船型上,常规化石燃料推进已接近性能极限,核动力被视为突破动力瓶颈的有力方案。然而,与核动力的潜在优势形成鲜明对比的是,核动力民用船舶的发展在过去几十年中进展缓慢,经历了探索、停滞、复苏与创新四阶段,研究重点内容及代表国家见图 1。

苏联、德、日等国相继提出并建造了核动力商船,用于验证核能在航运领域的应用,如美国 NS Savannah 客货船、德国 NS Otto Hahn 矿砂船、日本 NS Mutsu 货船等^[9]。

20 世纪 80 至 90 年代进入停滞调整期,除核动力技术安全性不高、核动力民船建造运营成本高以及社会公众接受度较低等因素外^[10],1979 年三哩岛事故与 1986 年切尔诺贝利事故先后发生,对全球核能产业造成深远影响,使核动力民用船舶发展环境显著恶化。这些因素共同导致早期核动力商船大多数未能持续运行,相关船舶相继退役^[11]。

核动力民用船舶发展缓慢的原因是多方面的。首先是技术与安全方面的挑战^[12],将核反应堆置于船舶狭窄空间内长期运行,需要解决反应堆紧凑布置、余热排出、辐射屏蔽、防止事故扩散等一系列技术难题,一旦发生核事故,可能对船员造成危害并严重污染环境。其次,经济因素同样突出,核动力船舶设计建造复杂,需要专设安全设施和高水平技术人员支持,导致建造成本往往是同类型常规船舶的几倍甚至数十倍,运维过程中还需承担燃料更换、辐射防护、退役处置等额外成本^[13]。此外,在监管与公众接受层面^[14-15],始终缺乏完善的国际民用核动力船舶监管框架和港口准入规则,早期核动力民船运营期间曾被部分港口拒绝停靠;尤其在切尔诺贝利事故等事件影响下,公众对核安全的担忧显著增加,成为核动力民船商业化推广的重大障碍。

进入 21 世纪后,核动力民船的研究与应用在全球范围内呈现出阶段性波动^[16-17]。在 2000 年代初至 2010 年前后,部分国家重新开展相关技术研究,但 2011 年福岛核事故对全球核能产业造成重大冲击,核动力民船相关研究随之陷入低谷。

21 世纪 20 年代,在航运业碳中和压力的驱动下,核动力凭借其零排放、高能量密度等优势再次获得关注,全球进入创新扩展期,多国相继启动第四代堆型、小堆及微堆海上应用计划。

俄罗斯凭借特殊的北极航线需求是目前唯一一拥有民用核动力船队的国家,已建成多代核动力破冰船并运行海上浮动核电站,在船用核动力系统工程化方面积累了长期经验^[18]。我国也积极推进核动力民用船舶相关技术与储备^[19-21]。近年来,我国在小型船用反应堆、海上核动力平台以及核动力

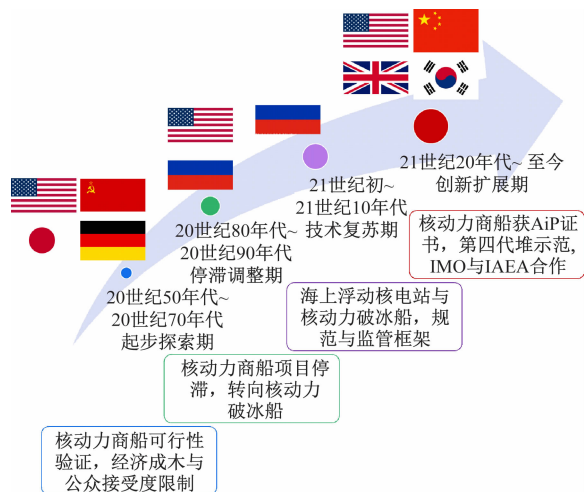


图 1 核动力民船发展历程

Fig. 1 Development history of nuclear-powered civilian ships

20 世纪 50 年代至 70 年代为起步探索期,美、

商船和破冰船概念设计方面取得了一系列阶段性成果,部分方案已获得船级社原则性认可,为后续核动力民用船舶的工程论证与应用研究奠定了重要基础。

本文结合国内外大量资料,全面回顾核动力民用船舶的发展历程、最新进展、关键技术瓶颈、梳理当前研究的发展与挑战,为后续科研攻关提供参考,为航运业低碳转型和相关政策制定提供借鉴支持。本文首先介绍了航运减排背景下发展核动力民用船舶的必要性,其次总结分析核动力民用船舶及其标

准法规与监管机制的发展现状,然后综述核动力民用船舶的反应堆技术、经济性与可行性、运营模式与全生命周期等的研究进展,最后展望核动力民用船舶的发展并提出未来研究建议。

1 发展现状

本文将核动力民用船舶划分为核动力商船、核动力破冰船和海上浮动核电站三大类,表 1 整理了自 20 世纪中叶以来该领域的代表性事件。同时讨论与之相关的标准法规与监管机制发展现状。

表 1 核动力民用船舶一览表
Tab. 1 List of nuclear-powered civilian vessels

船名	国家	年份	类型	状态	服役周期	堆型	船员数量/人
Lenin (列宁号)	苏联	1957 下水	核动力破冰船	退役	1959 ~ 1989	OK-150 型压水堆/ 270 MW	243
NS Savannah (萨瓦纳号)	美国	1959 下水	核动力商船	退役	1962 ~ 1971	压水堆 (LEU ≤ 4.6%) / 74 MW	124
NS Otto Hahn (奥托·哈恩号)	德国	1964 下水	核动力商船	退役后改为 常规动力船	1970 ~ 1979	压水堆/38 MW	63
Sturgis (斯特吉斯号)	美国	1967 下水	海上浮动核电站	退役	1968 ~ 2014	MH-1A 型压水堆/ 10 MW	—
NS Mutsu (陆奥号)	日本	1969 下水	核动力商船	退役后改为 科考船	1972 ~ 1992	压水堆 (LEU ≤ 4.44%) / 36 MW	80
NS Sevmorput (北方海路号)	苏联	1986 下水	核动力商船	在役	1988 ~ 至今	KLT-40 型压水堆/ 135 MW	—
Akademik Lomonosov (罗蒙诺索夫院士号)	俄罗斯	2010 下水	海上浮动核电站	在役	2019 ~ 至今	KLT-40S 型压水堆/ 70 MW	69
ACP100S 海上 核动力平台	中国	2010 启动	海上核动力平台	在建/示范	—	ACP100S 小型压水堆/ 385 MW	—
ACPR50S 海上 浮动核电平台	中国	2016 启动	海上浮动核电站	在研	—	ACPR50S 小型压水堆/ 200 MW	—
KUN-24AP(24 000 TEU 核动力集装箱船)	中国	2023 发布	核动力商船	DNV 颁发 AiP 证书	—	熔盐堆/100 MW	—
核动力客货破冰船	中国	2025 发布	核动力客货 破冰船	RINA 颁发 AiP 证书	—	熔盐堆/—	—
LNG 运输船	韩国	2025 发布	核动力商船	ABS 颁发 AiP 证书	—	熔盐堆/100 MW	—

1.1 核动力商船

20 世纪 50 年代中后期,美苏两国率先开展了将核能用于民用船舶的探索。美国在 1955 年启动“原子能和平利用”计划,建造了世界上第一艘核动力商船 NS Savannah,该船于 1959 年下水并在 1962 年投入运营。作为示范性客货两用船,NS Savannah

航行初期肩负核能和平利用的宣传使命,访问了数十个美国内外港口,也一度用于商业运营。然而,由于船型过小且建造运营成本高昂,NS Savannah 的经济性并无优势;再加上核安全的疑虑和公众对核武阴影的抵触,澳大利亚、新西兰、日本等国部分港口一度拒绝其停泊。最终 NS Savannah 仅运营了 9 年

(航行约 45 万 n mile) 便于 1971 年退役, 宣告了美国核动力商船首次尝试的夭折。图 2 是 20 世纪中期先后出现的四艘核动力商船。



图 2 核动力商船

Fig. 2 Nuclear-powered merchant ships

紧随其后, 其他国家也开展了核动力商船试验。德国于 1960 年开始建造 NS Otto Hahn 矿砂船, 并于 1970 年投入商用, 主要运输矿石、粮食和少量乘客。NS Otto Hahn 累计安全航行约 9 年, 但同样由于成本和安全隐患于 1979 年退出运营, 其核反应堆随后被拆除, 改装为常规动力集装箱船, 并于 2004 年彻底退役。日本于 1972 年建成了 NS Mutsu 核动力散货船。由于 NS Mutsu 在首次试航时发生了微量放射性泄漏, 引发当地民众强烈抗议, 建成后被长期封存。1991 年经过改造的 NS Mutsu 成功完成航行试验, 证明了核动力的航速与续航能力优势, 但于次年 (1992 年) 便宣布退役, 拆除了核动力系统后改作科考船沿用至今。

在上述少数试验性商船之后, 核动力在民用船舶领域沉寂了相当长时间。冷战后期仅有苏联建造了 NS Sevmorput 核动力集装箱船, 配备一座 KLT-40 型压水堆, 用于执行极地运输补给任务。NS Sevmorput 在苏联解体后停航, 21 世纪初俄罗斯对其进行了维修升级并于 2016 年重新投入运营, 用于服务北极航道沿线的物资运输。

进入 21 世纪, 在全球减碳压力和技术进步的双重驱动下, 核动力商船开始重回各国视野, 迎来新一轮研究热潮。

美国近年积极布局核动力船舶前沿技术, 2020 年, 比尔·盖茨的 TerraPower 公司与英国 Core Power、法国 Orano 以及美国南方电力公司合资开发新型熔盐反应堆, 以推动商船核动力化进程。同时, 美国能源部于 2022 年委托美国船级社 (American Bureau of Shipping, ABS) 研究商船核动力应用的可行性, ABS 据此建立 14 000 TEU 集装箱船和 15.7 万载重吨油船的核动力模型, 评估先进反应堆技术对船舶设计、运营和减排的影响。结果表明, 两座 30 MW 铅冷快堆可驱动万箱级集装箱船 25 年无需换料, 四座 5 MW 热管微堆可使苏伊士型油轮全寿命仅需一次换料, 且均实现零碳排放。ABS 主席 Wiernicki 指出这一研究凸显了核推进在减排和效

率方面的巨大潜力, 并强调小型模块堆有望克服过去核动力商船的安全、成本痼疾。

日本邮船公司 (NYK)、日本造船联合 (JMU) 和 DNV 于 2021 年发布了配备核聚变反应堆的 2 万 TEU 超大型集装箱船概念方案, 设想采用加拿大 General Fusion 公司的磁化靶聚变 (MTF) 技术, 预估其 5 年综合成本将低于传统燃料船, 并在 15 年内节省 10 亿美元运营费用。

韩国 HD 现代集团旗下的韩国造船与海洋工程公司 (KSOE) 于 2025 年 2 月在休斯敦“新核能海事峰会”上展示了基于熔盐堆的 15 000 TEU 级核动力集装箱船方案, 并于同月获得 ABS 的原则性认可 (AiP) 证书。2025 年 9 月, 在意大利米兰举办的国际天然气及能源展览会 (Gastech 2025) 上, 韩国原子能研究院与三星重工共同宣布其联合研发舱容约为 17.4 万 m^3 的大型核动力液化天然气运输船概念设计正式获得 AiP 证书, 该船搭载功率 100 MW 的小型模块化熔盐反应堆。

挪威政府资助的核动力船舶研究计划 (NuProShip) 于 2023 ~ 2024 年完成第一阶段工作, 在对近百种先进反应堆方案评估后, 选出了高温熔盐堆、高温气冷堆、铅冷快堆等三种小型堆技术进入第二阶段深入研究, 并计划在未来两年开发原型堆进行测试验证。

中国也在核动力商船领域取得进展。2023 年 12 月, 江南造船在国际海事大会上发布了全球首款 24 000 TEU 级核动力集装箱船的概念设计, 并获得挪威船级社 (Det Norske Veritas, DNV) 的 AiP 证书。该方案采用国际先进的第四代熔盐反应堆作为动力源, 采用模块化设计, 反应堆高温低压运行, 避免了堆芯熔毁事故, 具备防扩散和固有安全高等特征; 动力系统采用全电推进, 具有装机功率大、航速高且操纵性良好等优点。与传统柴油动力相比, 更加紧凑高效, 可提供更多载箱位; 反应堆 15 ~ 20 年进行一次换料。

核动力商船的发展单纯依靠技术可行性并不足以支撑商业成功, 其高度依赖经济性、公众接受度以及配套监管体系的成熟程度。进入 21 世纪后, 第四代反应堆、小型模块化堆和微堆等新技术显著改善了安全性和运维特征。然而, 从全球范围看, 核动力商船仍普遍停留在概念设计和初期验证阶段, 其真正规模化应用仍有赖于技术、制度与商业模式的协同突破。

1.2 核动力破冰船

苏联/俄罗斯在核动力破冰船领域的成就最为

瞩目。1957年,苏联建成了世界第一艘核动力水面船,“列宁”号破冰船,如图3。



图3 第一艘核动力破冰船

Fig. 3 The first nuclear-powered icebreaker

该船长134 m,宽27.6 m,满载排水量约1.9万t,初期安装了3座OK-150型压水反应堆,总热功率约270 MW,可在北冰洋执行科考、救援和商船引航等任务;且三座反应堆配置模式,实现了在设备故障时仍可持续破冰的高冗余度设计。该船服役30年间航行超过85万n mile,其中破冰里程约65万n mile,成功引导数千艘运输船安全通过极区冰海。然而,由于第一代船用堆技术尚不完善,“列宁”号在1965和1967年发生过两起堆芯事故,第二次事故造成堆芯损坏,苏联被迫于1970年为其更换了新型OK-900型压水堆(两座,单堆热功率171 MW)。尽管如此,“列宁”号安全运营至1989年才退役(部分原因是切尔诺贝利事故后出于谨慎一度停运),退役后停泊在摩尔曼斯克港作为博物馆保存。

总结“列宁”号的经验后,苏联自20世纪70年代起研制了更强大的第二代核动力破冰船,“北极”级(Arktika级)。该级破冰船船长148 m,宽约30 m,满载排水量约2.3万t,采用双层船壳和三桨推进。“北极”级装备2座OK-900A型压水堆(总热功率 2×171 MW),合计输出轴功率约54 MW,可保障船舶以18~20 kn航速持续破冰前进。1975年至2007年间,共有6艘同型船陆续建成投入使用。“北极”级的问世使苏联/俄罗斯建立起规模空前的核动力破冰船队,其强大破冰能力和续航性能令常规动力破冰船望尘莫及。此外,苏联于20世纪80年代末还建造了两艘吃水较浅的泰梅尔级核动力破冰船(“泰梅尔”号和“维亚加奇”号,吃水仅8.1 m),各装1座KLT-40M小型压水堆(热功率171 MW)用于在河口和近岸浅水区破冰作业,以配合“北极”级执行不同水深环境下的任务。

进入21世纪,随着北极航道战略地位上升和气候变暖导致冰区缩减,俄政府以核动力破冰船保障极地航运和资源开发。俄罗斯不仅拥有数量最多、吨位最大的破冰船队,也是目前世界上唯一仍在建

造新一代核动力破冰船的国家。21世纪10年代开始,俄罗斯启动第三代“通用”核动力破冰船项目,即22220型或称LK-60Ya级(也称新“北极”级)。首艘于2013年铺设龙骨,2020年投入使用。该型破冰船采用双吃水设计(吃水可在8.5 m和10.5 m之间切换以适应河口/深海),船体宽34 m,排水量约3.35万t,使用最新研制的两座一体化压水堆RITM-200,单堆热功率175 MW,配置两套36 MW汽轮发电机组。推进功率60 MW,破冰能力达3 m厚。相比前代KLT系列反应堆,RITM-200采用模块化集成布局,质量减半、体积缩小约1/3,且功率提升约25%,大幅提高了破冰船的速度和效率。更重要的是,RITM-200堆芯设计寿命长达40年,换料周期为7年。

为进一步提升在更厚冰区的通航保障,俄罗斯还在研制第四代核动力破冰船,10510型“领袖”级,又称LK-110级,船体长约209 m、宽47.7 m、排水量近7万t。该级首舰命名为“俄罗斯”号,设计轴功率达120 MW,最大可破除4 m厚冰层,尺寸巨大,采用两座新一代RITM-400核反应堆。单堆功率315 MW,配备4台37 MW汽轮发电机组,领袖级计划2027年前后投入使用,届时将成为全球功率最强、首次可全年无间断在东北航道通航的破冰船型。

此外,2025年中国国际海事会展期间,中国船舶集团有限公司旗下第七〇八研究所自主研发设计的核动力客货破冰船获得意大利船级社(Registro Italiano Navale,RINA)颁发的AiP证书。该船采用熔盐堆、超临界二氧化碳技术提升热电转化效率与反应堆本质安全性能,创新应用核能综合电力系统理念,能够在敞水及各类冰况下实现推进模式的智能切换与能源的安全高效利用。

核动力破冰船是目前唯一实现长期、规模化工程应用的民用核动力船舶类型,其发展高度依赖国家战略需求和集中化管理。苏联/俄罗斯之所以能够持续推进核动力破冰船技术迭代,既源于北极航道通航保障和资源开发的现实需求,也得益于其在船用核反应堆设计、辐射防护、动力系统冗余以及核安全监管等方面长期积累的工程经验。相较之下,其他国家受制于应用场景有限、经济性压力和公众接受度等因素,尚未形成实质性的核动力破冰船工程项目。破冰船具有功率需求大、航速要求相对稳定、运行航线固定且通常由国家机构或国有企业运营等特点,这在一定程度上降低了核动力系统在船舶应用中的技术和监管复杂性,使其成为核动力在

民用船舶领域持续发展的载体。

1.3 海上浮动核电站

20 世纪 60 年代,美国建成了世界第一座浮动式核电站,MH-1A“斯特吉斯”号,见图 4。该装置由二战老旧驳船改造而成,搭载一座 10 MW 级压水堆,于 1968 年至 1976 年部署在巴拿马运河区,为驻守美军和运河船闸提供电力。然而,由于冷战后期核能发展放缓以及经济性欠佳,“斯特吉斯”号退役后美国并未继续推进浮动核电站计划。20 世纪 70 年代美国曾设想建造更大型的海上核电站,但因造价不菲且公众强烈反对而搁置。直到 21 世纪,人们才在新的背景下重新审视这一概念。



斯特吉斯号(美国)

罗蒙诺索夫院士号(俄罗斯)

图 4 海上浮动核电站实体

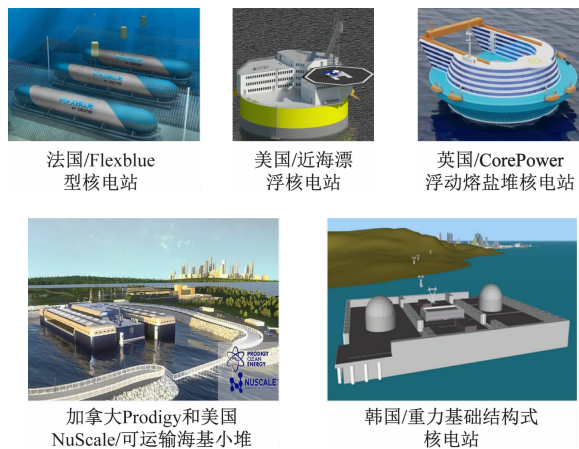
Fig. 4 Floating nuclear power plant

目前真正投入商业运行的浮动核电站仅有俄罗斯的“罗蒙诺索夫院士”号。作为全球首艘商业化运营的浮动核电站,它由俄罗斯 Rosatom 建造,是一艘自航驳船,长约 144 m、宽 30 m、满载排水量 2.1 万 t。该船装载了两座 KLT-40S 反应堆(单堆电功率 35 MW),这是一种源自俄罗斯旧式核动力破冰船的成熟反应堆类型。2019 年 9 月“罗蒙诺索夫院士”号被拖航至俄远东楚科奇自治区佩韦克港,经过调试后于 2020 年 5 月正式并网发电,成为世界上第一座投入商业运营的海上浮动核电站。截至 2025 年初,该浮动电站已安全运行接近 5 年,累计发电量超 10 亿度,占楚科奇西部电网约 60% 的供电量,并为当地城市提供生活供热。

“罗蒙诺索夫院士”号的成功催生了更多后续计划。Rosatom 当前正在建造 4 座改进型浮动核电机组,面向北极沿岸油气开采设备的电力和人员生活保障、偏远地区供电及国际出口。新一代设计将采用两座衍生自 RITM-200 的船用反应堆(RITM-200M),单机总功率提高到 100 MW 级,设计寿命长达 60 年,可在寿命期内大修换料若干次。海上浮动核电站的优势在于部署灵活,不占用陆地空间,而且建造可在船厂集中完成、质量易于管控。

除了俄罗斯之外,法国、美国、英国、加拿大和韩国等也有小型海洋堆研究。韩国的 SMART 小型压水堆最初为陆上供电设计,但同样具备模块化、易于海上部署的特点。美国 NuScale、Holtec 和 TerraPower 等公司则着眼于开发可用于海上发电或

船舶推进的微型反应堆技术。图 5 是尚处于概念设计的海上浮动核电站。



法国/Flexblue
型核电站

美国/近海漂
浮核电站

英国/CorePower
浮动熔盐堆核电站

加拿大Prodigy和美国
NuScale/可运输海基小堆

韩国/重力基础结构式
核电站

图 5 海上浮动核电站概念设计

Fig. 5 Conceptual design of a floating nuclear power plant

中国也在积极布局海上浮动核电平台的研发。中广核提出 ACPR50S 小型压水堆方案,热功率 200 MW、电功率约 60 MW,面向海上核动力平台与浮动核电站应用设计,属于我国最早海洋核动力堆型之一。中核集团推出更大功率的 ACP100S 示范工程方案,每个平台配置双堆(单堆电功率 125 MW)。该项目被形容为漂在海上的巨型充电宝,旨在服务海岛工业、海上油田和远洋航运等领域。此外,中国船舶已与中核集团、中广核集团、国家电投等核能企业合作开展海上核动力浮动电站研发^[22]。

海上浮动核电站仍属于高度依赖国家主导和特定应用场景的核能利用形式,目前仅在俄罗斯实现了长期、商业化运行。其可行性主要建立在偏远地区供电需求迫切及国家对核设施集中管理能力较强等条件之上。相比陆上核电站,浮动核电站在选址灵活性、集中建造和整体退役等方面具有一定优势,但在经济性、公众接受度、跨区域监管协调以及极端海洋环境适应性等方面仍面临显著挑战。

1.4 标准法规与监管机制

核动力船舶的标准法规与监管机制是其能否实现规模化应用的关键制约因素之一^[23-24]。IMO 早在 20 世纪 80 年代初即通过了《核动力商船安全规则》(Code of Safety for Nuclear Merchant Ships, IMO Resolution A. 491 (XII)),该规则的监管对象是装载核反应堆的船舶整体的航行安全与辐射防护体系,其关注重点包括船体结构、围护屏障、辐射防护、应急管理和船舶运行组织等方面。而反应堆本身的设计许可仍由各国核安全监管机构按照核设施标准实施,两者共同构成核动力船舶的安全治理框架。规

则提出了防止放射性物质释放的多重实体屏障,包括燃料包壳、一回路压力边界、安全壳以及安全围护,并要求船舶具备相应的辐射监测、应急响应与安全管理体系。然而,鉴于其制定时所依据的技术背景主要为直接蒸汽循环的压水堆推进装置,该规则在适用范围、技术前提和风险模型方面均已难以覆盖当代核动力民船的多样化设计。

进入 21 世纪 20 年代,随着核动力民船重新受到关注,各主要海洋国家在原有核安全与海事安全体系基础上,更新或完善相关法规,建立或强化了针对核动力船舶的监管机制^[25-26]。

英国于 2022 年 12 月率先通过《商船(核动力船)条例》(Merchant Shipping (Nuclear Ships) Regulations 2022),为悬挂英国国旗的核动力船舶在商业航运中的使用提供了法律框架支持。该法规由英国海事与海岸警卫局(MCA)主管实施,并由 Marine Guidance Note MGN 679 (M)明确技术与管理要求。英国劳氏船级社(Lloyd's Register, LR) 2023 年发布的白皮书指出,核能技术有助于实现航运业零碳排放,并凭借延长船舶寿命、降低燃料基础设施投资不确定性等优势重构行业生态;同时强调监管体系创新是核动力船规模化应用的前提。LR 在 2025 年发布了一份名为《驾驭海上核能》(Navigating Nuclear Energy in Maritime)的指导文件,旨在推动核能技术安全、负责任地融入商业航运及海上作业领域。

美国在历史上曾针对 NS Savannah 核动力商船建立由原子能委员会(AEC,后为核管会 NRC)与美国海岸警卫队(USCG)分工负责的监管机制。NRC 负责核安全与放射防护审查,USCG 负责船舶适航与海事安全,形成了核与航运安全分工监管的模式,双重监管经验被视为后续制度设计的重要参考。美国船级社(American Bureau of Shipping, ABS)与美国能源部合作研究先进核动力商船所面临的技术障碍,并于 2024 年 10 月发布了全球首个船舶与海上核动力系统的综合规范《ABS 船舶与海工应用核动力系统规范》(ABS Requirements for Nuclear Power Systems for Marine and Offshore Applications),该规范容许设计方考虑任何类型的反应堆技术,并为监管机构提出了监管框架,以便船旗管理部门与 ABS 合作进行完整的监管监督和许可。

俄罗斯在核动力船舶领域采取相对集中化的监管模式,由国家原子能集团 Rosatom 主导核设施的许可、运行监督及人员培训等工作,形成涵盖设计、建造、运行和退役全过程的核安全管理体系。其下

属的 Atomflot 负责核动力破冰船等民用核动力船舶的实际运营,并与海事主管部门在航行安全等方面协同管理。

韩国原子能研究院(KAERI)在小型模块化反应堆及海上应用领域持续开展技术研发,韩国船级社(Korean Register, KR)亦参与核动力船概念验证和国际规则对接工作,但截至目前,尚未形成针对核动力民用船舶的完整、多机构协同的国家级监管体系,相关法规仍处于研究和筹备阶段。

中国目前尚无民用核动力船舶的实船工程应用,但已开始在国家层面开展相关顶层设计与标准体系研究。我国现行核安全监管体系主要分为民用核电和军用核动力两套制度,其中民用核法规与标准体系主要面向陆上固定核设施,其在海洋环境适应性、船舶运行工况以及移动式核装置监管等方面仍存在不足;虽然军用核动力体系在技术和管理方面经验丰富,但在民用船舶经济性、通用性及国际规则衔接方面具有一定局限性。^[11]在此背景下,有必要探索建立面向民用核动力船舶的专门法规与监管框架,以覆盖反应堆设计建造、船舶运行监管、船员培训与资质管理、应急响应、核安保以及退役与放射性废物管理等全生命周期环节,为未来核动力民用船舶的工程化应用提供制度基础。

随着核能在民用航运中的重新兴起,为推动现代化监管框架的构建,世界核运输研究组织(World Nuclear Transport Institute, WNTI)于 2024 年 5 月在国际海事组织第 108 届海上安全委员会(Maritime Safety Committee 108, MSC 108)会议期间,向 IMO 提交了《Gap Analysis of the Code of Safety for Nuclear Merchant Ships》报告,系统评估了 1981 年《核动力商船安全规则》与当代核技术、国际安全标准以及新型船舶设计实践之间的差距,指出规则在技术适用性、风险评估框架及监管程序等方面存在严重不足,并提出一系列更新建议。在此基础上,IMO 在第 110 届海上安全委员会会议(MSC 110)上,正式同意启动其修订工作。会议决定将修订任务交由船舶设计与建造(Ship Design and Construction, SDC)分委会负责,并要求在 2026 年 1 月召开的下一届会议上开展实质性研究。此次修订的总体目标是构建一个不再局限于压水堆设计、具有技术中立性和风险导向特征的现代核动力船舶安全框架,能够涵盖包括小型模块化反应堆(SMRs)、全电力推进船舶(All-Electric Ship)等新一代核能与电力推进技术。

需要指出的是,核动力民船监管问题之所以推进缓慢,一个重要原因在于其所具有的双重属

性^[23]:既是核设施又是船舶,因而受制于核安全和海事安全两大体系。目前,核安全领域有国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)主导的一系列公约和标准(如《核安全公约》《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》等),海事领域则有IMO主管的海上人命安全、公海航行、防污染等公约。二者在核动力船这一领域有交集,但缺乏明确分工和协作。IMO制定的核动力商船安全规则在实践中适用范围有限,而IAEA在核事故调查等方面占主导,可能导致海事部门参与不足。一旦发生核动力船事故,海事救援、核应急、事故调查以及责任认定与赔偿机制之间如何有效衔接,目前仍缺乏明确的国际制度遵循。

正是在这一背景下,有学者呼吁^[23]加强IMO与IAEA之间的协作与规则统筹,以避免核动力船舶因跨领域监管而出现制度真空。IAEA曾计划启动“海上应用原子能技术许可”(Atomic Technology Licensed for Application at Sea, ATLAS)项目,旨在协助各国建立健全民用核动力船舶和海上浮动核电站的监管框架。2025年,IAEA成立了关于小型堆安全运输监管的咨询会,重点讨论小型模块化堆及浮动核电站在跨境运输、投运许可及运行监管方面的技术与制度挑战。并在北京举办了“移动式核电厂安全考虑因素跨地区讲习班”,系统介绍移动式与海上核能系统的安全评审方法,其中包括对浮动堆运输阶段安全、应急准备、核材料管理以及运输法规的适用性分析。

上述进展表明,核动力民用船舶的标准法规与监管机制体系正从长期分散、滞后的状态,逐步迈向以风险导向和跨机构协同为特征的系统性更新阶段。

2 关键技术与工程化进展

2.1 面向核动力民船的主要堆型技术

船舶核动力装置是通过核裂变反应将巨大热能转化为机械功或电能,为船舶提供动力的成套系统^[27]。当代投入运行的核反应堆均基于裂变机理,尚无适用于船舶推进的聚变装置实现自持运行。核动力民船可依据不同的技术维度进行分类。按堆型与冷却剂特性划分的物理路线,包括压水堆、快堆及熔盐堆等,其差异主要体现在中子谱、冷却剂性质、传热方式及堆芯安全行为等方面。这些堆型构成了核动力民船的基础技术框架。表2对不同反应堆技术路线在民用船舶中应用进行系统比较。

2.1.1 压水堆

压水堆(Pressurized Water Reactor, PWR)^[28]是迄今应用最广泛的船用核反应堆类型。无论早期的核动力商船还是各国核潜艇、航空母舰、破冰船,绝大多数都采用压水堆作为动力源,其技术成熟度和安全可靠经过长期实践验证。20世纪60年代美国启动海洋反应堆计划时,就以成熟的压水堆技术为基础,于1955年成功将核动力应用于“鸚鵡螺”号核潜艇,开创了核动力舰船的先河。此后服役的“企业”号核航母(1960年)和“长滩”号巡洋舰(1961年)也均采用多座压水堆模块作为动力。在民用领域,第一批核动力商船同样选择了压水堆,如NS Savannah和NS Mutsu均安装了一座小型压水堆。压水堆之所以成为船用核动力的首选,是基于其相对成熟的技术状态和可控性^[29]。

2.1.2 钠冷快堆

钠冷快堆(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)^[30]是以液态金属钠作为冷却剂、快中子为中子的反应堆,属于第四代先进核能系统。自20世纪50年代起,钠冷快堆技术经历了半个多世纪的发展,是目前快中子增殖反应堆的主流堆型^[31]。早期的钠冷快堆在美、苏、法等国开展了一系列实验和示范,验证了核燃料增殖和闭式循环的技术可行性,并一度发展出数百兆瓦级的发电用快堆,如法国“凤凰”(Phénix)反应堆和苏联BN系列快堆。然而20世纪80年代后,受经济和政策因素影响,快堆研发一度放缓。进入21世纪,为了克服铀资源和核废料挑战,钠冷快堆作为闭式燃料循环的核心技术重新受到重视。俄罗斯先后成功运行了BN-600和BN-800商用快堆。中国已建成、并网运行了CEFR实验快堆,这是国内第一座钠冷池式快中子反应堆;2017年底中国启动了位于福建霞浦的CFR-600示范快堆工程。印度、法国、日本等国也有各自的钠冷快堆研发计划或试验堆。钠冷快堆的技术优势在于中子经济性好,可以实现燃料增殖和高燃耗,同时冷却剂钠的高沸点和高导热性使反应堆可以在接近常压、高温条件下运行,从而有望获得更高的热效率。

尽管如此,钠冷快堆用于船舶推进仍面临特殊挑战^[32-33]。首先,金属钠遇到水或潮湿空气会发生剧烈的化学反应,这对在海洋环境中航行的船舶是一个显著的安全隐患。钠冷堆一旦发生冷却剂泄漏与海水接触,可能造成严重后果,如引发燃烧爆炸^[29],因而需要非常严苛的多重屏障和惰性气体保护设计以保障安全。其次,钠冷快堆的运行需要较高的惰性和可靠的监控系统,以防止局部过热和

表 2 不同反应堆技术路线在民用船舶应用中的比较

Tab.2 Comparison of reactor technology routes for civilian ship applications

堆型技术	技术成熟度	安全等级	安全特性	功率密度	主要优势	主要局限	适用民船类型	典型应用或设计案例
压水堆	★★★★★ 成熟	高	以有动系统为主,部分带被动功能	中等	技术成熟、控制精确、运行稳定	系统压力高、体积大	核破冰船、早期核商船	RITM-200(俄罗斯破冰船)、KLT-40S(浮动核电站)、NS Savannah(美国核商船)
钠冷快堆	★★☆☆☆ 实验示范	中等	钠活性高、可闭式循环	高	功率密度高、燃料利用率高	钠易燃,与海水反应风险大	远洋高速运输船、军民两用船	概念阶段,无民用实船示范;BN-600(陆上快堆)
铅冷快堆	★★★★☆ 示范阶段	高	化学稳定、可自然循环	中高	化学稳定、辐射屏蔽好、寿命长	冷却剂黏度大、材料腐蚀	极地运输船、远洋破冰船	BREST-OD-300(陆上示范堆)、NuProShip(欧盟船用核动力概念)
熔盐堆	★★☆☆☆ 原型验证	很高	具有安全特性(低压、排盐冻结等)	高	低压高温、效率高、燃料利用率高	燃料体系复杂、材料腐蚀挑战	大型集装箱船、浮动核电站	江南造船24 000TEU核动力船、韩国核动力LNG船
小型模块化堆	★★★★☆ 示范阶段	高	模块化与被动安全设计	中等	模块化制造、运维简化、经济性较好	功率相对有限	破冰船、近海供能平台、未来大型邮轮	RITM-200(破冰船)、ACPI00S(浮动核电)、NuScale + Prodigy海上电站
微型反应堆	★★☆☆☆ 研发阶段	高	封装与被动安全设计	低中	体积小、免维护、可长期运行	功率小、缺实船验证	科考船、救援船、能源保障船	US Deployable Energy概念堆(早期研发阶段)

钠水反应,这在船舶晃动工况下增加了难度。最后,从监管角度,各国海事机构对船舶上使用大量易燃金属钠持审慎态度,相关适用标准尚不完善。历史上尚无钠冷快堆真正用于船舶动力的工程实例,目前更多地作为一种远景方案,其在船舶领域的应用还处于概念研究阶段。

未来若材料和安全系统有突破,钠冷快堆凭借高功率密度和闭式燃料循环的优势,或可在大型航母、远洋高速船等特定领域体现价值。目前各国对于钠冷快堆的投入主要集中于陆上发电和核废料嬗变领域,在船舶推进方向的研究相对较少。

2.1.3 铅冷快堆

铅冷快堆(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)^[34]以液态铅或铅铋合金作为冷却剂,同样属于第四代反应堆技术。相较钠,液态铅冷却剂化学性质稳定,不会与水发生剧烈反应,因而在安全性上具有一定优势。同时,铅的沸点极高(铅铋共晶沸点约1 670 ℃),反应堆可在常压下运行,系统压力较低。这些特点

使铅冷快堆在理论上很适合舰船等移动平台:常压操作降低了爆炸风险,冷却剂不易燃提高了本质安全性。然而,铅冷快堆也有自身难题,例如冷却剂黏度大、熔点高(铅铋共晶熔点约123.5 ℃,纯铅熔点高达327 ℃),需要保持冷却剂时刻处于高温液态,否则一旦停堆冷却剂凝固将导致系统无法启动。这对船舶在停堆检修或事故工况下维持冷却提出了特殊要求,需配备冗余加热系统或快速放料机制。此外,液态铅对结构材料的腐蚀和侵蚀作用强,也需通过材料创新加以解决。早在20世纪60至70年代,苏联曾在“阿尔法”级攻击型核潜艇上采用铅-铋合金冷却的快堆作为动力装置,使潜艇获得了当时领先的高速性能和小型化艇体。由于该堆型在运行维护方面的高度复杂性,尤其是冷却剂需持续加热以避免固化,该系列核潜艇反应堆在服役后期逐步被拆除或替换。

尽管存在上述挑战,铅冷快堆在船舶上的应用前景正受到重视^[35]。进入21世纪后,铅冷快堆作

为第四代反应堆技术候选再次引起关注。俄罗斯正在建设 300 MW 级的 BREST 铅冷快堆示范工程。挪威于 2025 年公布的核动力船研发第二阶段候选方案中,包含了一种瑞典 Blykalla 公司的铅冷快堆设计;该设计主要特点是安全和模块化,铅冷却剂结合快中子谱提供高功率密度,同时消除了钠冷却剂的易燃风险,因而被认为很适合为远洋船舶提供动力。此外,韩国也在研究自然循环冷却的小型铅基反应堆,希望利用其简化的冷却回路提升系统固有安全性。铅冷小堆在结构上可以实现全自然循环,无需冷却剂泵,从而减少运动部件,提升系统在船舶摇摆工况下的可靠性。

总体上,铅冷快堆因其安全特性在船舶应用上具有一定优势,目前已成为国际上小型海洋堆设计的研究热点^[36]。如果材料和热工设计的难点得到攻克,未来铅冷快堆有望成为核动力商船和特种舰船的有力选项。

2.1.4 熔盐堆

熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)^[37-38]是使用熔融盐作为冷却剂和/或燃料介质的先进反应堆,具有本质安全和高温高效的特点。典型的熔盐堆设计如日本与美国合作提出的“富士”熔盐堆,功率约 100 MW。熔盐堆最显著的特征在于其燃料可以溶解于熔融的氟化物盐中。也有设计采用固体燃料、熔盐仅作冷却剂,如 Kairos 公司的 FHR 方案。在燃料溶解型 MSR 中,堆芯由高温下处于液态的燃料盐构成,工作温度约 700 °C 但系统压力很低,产生的热量通过一次熔盐回路传递给二回路工质再驱动常规热机。由于燃料呈液态,可以通过在线化学处理持续清除或调整裂变产物,这使得熔盐堆具备在线燃料循环和兼顾增殖闭循环的潜力。熔盐堆燃料循环的突出优点包括:产生的高放射性废物几乎仅限于裂变产物且寿命相对较短,几乎不产生纯净的武器级材料(由于产生的钚中以 Pu-242 为主,不易用于核武);燃料利用率高,例如某些增殖型熔盐堆每生产 1 亿 kW·h 电能仅需约 50 kg 钍和 50 kg 贫铀^[39];此外熔盐堆采用非能动安全设计,依靠熔盐的负温度系数和“排放栓”重力排放系统,可在事故工况下自动将燃料排入中子学设计的次临界储存罐中冷却凝固,从而具备优异的固有安全性能^[40-41]。

在船舶动力领域,熔盐堆近年来被视为极具前景的选择之一^[42-43]。其高温输出可提高热机效率,低压操作减少了反应堆舱的质量和体积要求^[44],固有安全特性有望增强公众和监管部门的接受度。

英国 Core Power 公司与美国 TerraPower 合作开

发海运用熔盐反应堆,并参与了劳氏船级社牵头的核动力集装箱船安全研究。设想的新一代核动力集装箱船将搭载熔盐反应堆模块,实现零碳排放并减少燃料供应链依赖。挪威的核动力船计划将美国 Kairos Power 公司的高温熔盐冷却实验堆纳入评估,认为其创新的氟化盐冷却技术有望兼顾高功率与安全性。韩国三星重工携手韩国原子能研究院研制小型模块化熔盐反应堆驱动的商船,计划将核动力与氢燃料、氢能等技术协同开发。

中国设计的 KUN-24AP(24 000 TEU 核动力集装箱船)获得 DNV 颁发 AiP 证书、核动力客货破冰船获得 RINA 颁发 AiP 证书,都采用的是熔盐堆方案。熔盐堆路线与钍基燃料循环具有较高契合度,而我国钍资源储量丰富,为未来发展基于钍的熔盐堆提供了潜在的资源优势。这一特点使熔盐堆不仅在安全性和性能方面具备吸引力,也可能在我国的长期能源结构和海上核动力体系中具有战略意义。中国已建成 2 MW 液态燃料钍基熔盐实验堆(TMSR-LF1)并实现钍铀燃料转换,成为目前全球唯一运行并实现钍燃料入堆的熔盐堆,初步证明了熔盐堆核能系统利用钍资源的技术可行性。

熔盐堆技术目前尚无成熟的船用工程应用,仍处于示范验证阶段,需要在材料、防腐、在线处理等方面进一步攻关。但其以独特的安全和性能优势正成为核动力船舶研究的焦点之一^[37]。未来若相关技术路线获得成功,不仅可用于动力推进,还可为船载制氢、合成燃料等提供高温热源,拓展核动力船舶在零碳能源供应链中的角色。

2.2 面向核动力民船模块化反应堆技术

与基于物理特性的堆型分类不同,模块化反应堆的划分侧重于功率规模、工厂化制造程度与系统集成方式,而非冷却剂和中子谱本身。小堆和微堆可基于多种堆型实现(如 PWR、SFR、MSR 等),其核心优势在于模块化建造、增强被动安全、快速部署和简化运维,是面向海洋场景的重要工程化路径。

2.2.1 小型模块化反应堆

小型模块化反应堆(Small Modular Reactor, SMR)^[45-46]是当前国际核能领域的重要研究方向,全球已开展超过 80 种 SMR 技术的研发工作。SMR 技术路线主要分为两大类:一是以成熟的轻水堆技术为基础,涵盖单机组、多机组及可运输型轻水堆;二是基于创新的第四代反应堆技术,采用先进冷却剂和核燃料。小堆技术的进展为核动力船舶提供了新的机遇。SMR 一般指电功率 300 MW 以下的压水堆或其他类型小堆,由于体积、功率、密度较低和

系统集成度高,更适合于船舶等空间受限的平台^[47-48]。

目前多个国家正在开发各种新型小堆,其中压水堆占据主流。典型的船用小堆例子是俄罗斯的KLT-40S堆型。该堆源于破冰船用反应堆,技术成熟,在役功率约30~35 MW,电功率并具备20 MW供热能力,换料周期约3年。

除了俄罗斯,其他国家也在推动海用小型压水堆的发展。韩国开发了用于海上平台的SMART一体化压水堆(电功率约100 MW)并积极寻求出口。法国曾提出Flexblue水下小型压水堆电站概念,计划部署2座35 MW的压水堆于海床平台,通过海底电缆向岸上供电。中国也在研究海上小型堆和浮动核电站技术(ACP系列等)以服务海岛供电和海洋油气开发等领域。中核集团和中广核集团成立中核海洋核动力发展有限公司,致力于推广小型模块化反应堆与船舶工程的结合应用。

在海洋工程其他方面,小型核反应堆也呈现出良好应用前景^[49-50]。例如,在深海科研基地、海底观测网络等需要长期自主供能的场景下,核能几乎是唯一可以提供多年持续能量的方案。海上大型航行平台(浮动实验室、海洋空间站)如果搭载核动力装置,可长期运行于海洋科学和太空发射提供支持。不过这些前瞻性应用目前仍停留在概念研究阶段,具体应用尚需克服技术和成本挑战。

2.2.2 微型模块化反应堆

微型模块化反应堆(Mirco Modular Reactor, MMR;或very Small Modular Reactor, vSMR)^[51]通常指电功率从数百千瓦级到数十兆瓦级的袖珍核反应堆,特点是体积小、模块化、一体化程度高,可以工厂预先建造并封装好燃料,运抵现场后即插即用。微型堆近年在军用和民用领域皆成为热点,诸如美国Pele计划旨在研制几兆瓦级的微型堆可机动部署于野战基地供电;商用领域也出现了多款微堆设计用于偏远社区供电、海洋平台以及船舶推进等场景。

对于核动力民船,微型堆具有特殊吸引力。首先,微型堆功率有限,热余量小,反应堆安全控制相对容易,实现固有安全的可能性更高。其次,微型堆可采用长寿期燃料设计,少数设计甚至能够做到一次装料运行8~10年以上无需中途换料,非常契合远洋船舶长航时、不易补给的需求。最后,多台微堆模块可以组合使用,形成功率冗余和灵活调配。

2025年4月,英国劳氏船级社联合澳大利亚Seatransport设计公司 and 美国微堆开发商 Deployable

Energy公司,设计一艘73m长的海上核动力应急救援船,搭载2~5台单堆功率1000 kW的微型反应堆,具备连续8~10年无需燃料补给的航行能力,在执行灾难救援任务时不仅满足自身动力,还能通过船载电站向受灾岸区电网输送应急电力。这一前瞻性方案体现了微型堆在特种船舶上的灵活应用潜力。

美国Deployable Energy公司还开发了1 MW级微堆可装入标准20英尺集装箱(1英尺=0.3048 m),模块化封装实现即插即用,其目标发电成本低于每度电5美分,在全寿命经济性上具有竞争力。该公司计划于2040年前在全球部署10万台微堆,虽然这一目标可能带有营销意味,但仍可见微型核能系统在未来能源市场中被寄予厚望。

加拿大Ultra Safe Nuclear公司开发的高温气冷微堆,热功率15 MW,使用固化的三重结构燃料球(TRISO)确保无熔毁风险。该设计已在美国和加拿大获得示范许可,并被挪威核动力船项目选中为候选。

综合来看,微型模块化堆为核动力船舶提供了一条全新的技术路径:通过小而美的设计,实现反应堆的工厂化制造和维护,具有更高的本质安全以及更灵活的应用模式。这对于民用核动力船舶降低初始门槛、减少规模化应用阻力是关键推动力量。不过,微堆在实际船舶上的部署仍需解决辐射防护、振动冲击、防护安全等工程问题,并接受严格的法规审查和公众认可。

2.3 经济性评估与商业化路径

经济可行性一直是核动力民用船舶发展的重要挑战^[52]。回顾历史,20世纪中期先后出现的四艘核动力商船,均未能实现持续的商业运营,其中很大原因在于全寿周期成本过高且市场缺乏竞争力。例如,世界首艘核商船美国NS Savannah虽然在技术上运行良好,但建造和运营成本昂贵,服役不到10年即因经济原因退役。又如日本NS Mutsu在试航阶段发生了中子泄漏事故,不仅带来昂贵的修复费用,更引发沿岸公众强烈反对,最终在完成基础试验目标后提前退役。这些早期实践表明,高昂的造价和运维成本加上港口准入受限、公众疑虑等因素,导致核动力商船在当时难以与传统船舶竞争。

当前的研究同样指出,经济性仍然是核动力民船能否商业化的决定性因素^[53]。虽然核动力可在理论上实现远洋船高速长航且不需频繁加燃料,从而提高运输效率和载货率(特别是超大型船舶),但要抵消反应堆及其安全系统的巨大初始投资并不容

易。经济性的难题主要体现在几个方面。

1) 建造成本高:核动力船不仅需要建造船体,还包含一个小型核电站,反应堆及其安全防护系统价格不菲。此外,建造核动力船对船厂要求高,需要专门的设施和许可,单位建造成本远超同类型常规船舶。批量化生产和标准化设计被认为是降低成本的途径,但目前全球尚无足够订单形成规模效应。

2) 运营与维护成本:核动力船需配备受过专业培训的核动力装置操作和维修人员,人员成本和培训成本较高。定期维护方面,需考虑辐照元件更换、辐射防护和废物管理等特殊支出。核动力商船通常需要较长的坞修时间以检修核反应堆,影响了营运收入。此外,核燃料成本和后端乏燃料处理费用也需计入全寿期成本。

3) 保险和责任成本:由于核事故潜在损失巨大,商业保险公司往往不愿完全承保核动力船舶的第三方责任风险。如果没有国家支持,单靠船东难以承担如此高的保险费用,从而影响核动力船的商业可行性。

4) 市场和运营限制:核动力民船目前缺乏成熟的市场定位。普通货主和航运公司让货物搭载核动力商船仍有顾虑。如果许多港口基于安全或法律原因拒绝接纳核动力民船,则其航线和业务将大受限制,盈利模式难以稳定。历史上核动力商船的货运业务因为港口限制而受到影响。这类市场不确定性会增加核动力民船的投资风险,进而要求更高的预期回报率以吸引投资。

针对以上挑战,各国和业内也在探索商业化路径和机制创新。第一,大型远洋船舶(超大型集装箱船、矿砂船)航速和续航要求高,采用核动力可在不增加载重量的情况下提高航速和航程,从而提升航次效益。荷兰 C-Job 海事设计公司研究指出,大型远洋船将是核动力推进装置的最佳应用选择之一,核动力可以显著提高此类商船的运输收益。第二,政府支持和补贴机制被视为核动力商船商业化不可或缺的助推器,可以像支持清洁能源一样,通过财政补贴、税收优惠或碳交易机制,为核动力商船提供经济补偿。例如,可设立“零碳航运奖励”,按核动力船运行里程或运量给予奖励资金,弥补其高昂的初始投资。再如,在港口费减免、优先泊位等方面给予核动力船优惠政策,以提高其运营经济性。

另一个思路是特殊用途核动力船先行商业化。当前唯一持续运营的民用核动力船是俄罗斯的 NS Sevmorput 核动力货船(在经过大规模改装后于2016年重新投入使用,主要服务于北极航线补给运

输),其运营很大程度上依赖于俄罗斯政府的战略需求支撑。对于商业回报不明显但战略意义重大的应用(如极地补给、科考支援),核动力商船可以通过政府采购或补贴形式运营,从而积累经验并带动相关产业链发展。

此外,全寿命成本优化也是研究重点。通过改进反应堆设计以实现船舶全寿命免换料、延长堆芯使用寿命,可减少中途大修次数,降低运行成本。提高核动力装置的可靠性和自动化水平,则可缩减船员编制、节约人力成本。核动力商船航行途中为沿线电网供电、海水淡化等,以增加额外收益。这些创新商业模式有望部分解决经济问题。但真正实现市场化,必须以严格的安全保障赢得公众和客户信任,并在政策上得到足够支持,才能使核动力在民用航运领域具有经济竞争力。

当前的研究致力于寻找降低成本和风险的方案,包括技术改进、市场选点和政策扶持等。一方面,随着碳中和压力增大,航运业减排为核动力商船提供了新的驱动力;但另一方面,没有成熟的商业模式和配套政策,单纯依靠市场力量,核动力船舶难以与传统方案抗衡^[53]。

2.4 运营模式与全生命周期相关问题

核动力民用船舶的发展还涉及一系列运营相关的问题,例如公众接受度、港口接纳政策、环保与退役等,需要统筹考虑并深入研究。

1) 社会公众接受度^[54]和相关利益方认知问题。核技术在公众心中往往伴随着神秘和风险,高风险低概率事件的特征使公众对核动力船舶心存疑虑^[11]。核动力海洋装备发展缓慢并不完全是技术可行性制约,更关键因素还在于社会公众和管理部门是否接受。大多数公众直观认为核动力意味着辐射风险高及潜在的不可控灾难。三哩岛、切尔诺贝利、福岛等核事故更强化了这种恐惧。即使专业评估显示核反应堆在正常和设计基准事故情况下对环境影响可控,公众的零风险诉求仍使核动力商船面临严重的社会适应性挑战。另一方面,航运业用户(船东、港口)接受度也偏低。很多船东出于核安全、法律责任的担忧,以及担心一旦发生核泄漏、辐射等问题将无法承受后果而持观望态度。日本 NS Mutsu 号因公众抗议,其母港一度拒绝靠岸,项目被迫中止。可见,没有公众和用户的接受,再先进的核动力船也很难驶出港口。为提升公众和行业对核动力船的认知接受度,国内外都在加强科普宣传和沟通机制。同时,通过公开透明的信息发布和风险沟通,让公众了解核动力船舶的安全设计特点和严格

监管措施,增强信心。在专业领域,则应开展针对船东、港航企业的宣介,说明核动力船的潜在经济和环保效益以及国际法规的进展,从而争取产业界的支持。当年美国 NS Savannah 在航行访问中开放参观,一定程度上改善了公众印象;俄罗斯破冰船和浮动核电站多年来安全无事故运行,也逐步提升了当地居民对核动力的信心。

2) 港口接纳政策与法律责任问题^[23, 53]。按照国际海洋法,沿海国家对外国核动力船舶享有特定管制权。《联合国海洋法公约》允许沿岸国对进入其领海的核动力船及载有核材料的船舶实施预防措施,包括限定航路、要求持有特别证书,以及遵守国际协定规定的特别预防措施等。许多国家为谨慎起见,可能会指定核动力船舶只能停靠特定港口或锚地,并预先报备。这使核动力商船在全球航线上难以自由航行。另一方面,事故责任和赔偿问题也需明确。国际上曾有《1971年运输核物质损害民事责任公约》和《布鲁塞尔核船公约(1962)》试图明确核船事故责任,但因签署国少而未真正生效。随着核动力船的推进,仍需要重新审视并完善该领域的法律制度,以解除沿岸国家和运营商的后顾之忧。

3) 核动力民船的环境影响问题。常规运行情况下,核动力船的环境优势是显著的,运行时基本零排放,不排放 CO₂、SO₂、NO_x 等大气污染物。这对缓解航运温室气体排放、改善港口城市空气质量具有巨大吸引力。然而,公众和环保团体更加关切的是核动力船一旦发生事故可能带来的放射性污染风险。例如,1965年苏联“列宁”号破冰船曾发生冷却失效导致堆芯部分熔毁,不得不将损坏的燃料和反应堆舱段抛弃于北冰洋海域^[53]。尽管此类事故极为罕见,但一旦发生,其对海洋生态的破坏和长期影响不可小觑。基于这一点,《国际防止海洋污染公约》等明确禁止向海洋倾倒放射性废弃物,各国对核动力舰船事故的海洋污染防治也制定了应急协议(如 OPRC-HNS 2000 议定书)。防范环境风险是核动力船发展的前提之一,现有研究包括:通过风险评估模型定量分析核动力船在不同事故场景下的放射性释放后果,以改进防范措施;开发新的耐事故燃料和反应堆固有安全技术,降低发生严重事故和放射物释放的概率;以及制定跨国协同的海上核事故应急响应机制等。

4) 退役后核废料处置问题。核动力船的退役涉及将反应堆及放射性部件安全拆解和处置的问题^[55-56],这一过程可能耗时数十年。美国斯特吉斯浮动核电站在关闭后,花了约 40 年才完成最终退

役,正是因为其中的放射性设施需要长时间的安全存放和分步骤拆卸。当前研究主张在核动力船的设计阶段就考虑易退役性^[57-58]。例如采用模块化反应堆舱,退役时可整体更换或封存;选用寿命期满后低放射性残留的结构材料,减少废物级别。关于乏燃料和放射性废物,宜参照核潜艇退役实践,由国家统一接管处理,避免运营公司自行处理带来的不规范风险。

核动力民用船舶所涉及的公众接受、港口政策、环保和退役等交叉议题正在得到越来越多的关注。这些软性因素往往对项目成败起决定性作用,甚至比纯技术问题更为敏感。当前的趋势是通过加强科普和透明度提升公众与业界信任,通过国际合作完善法律责任和应急机制,以及更高的安全标准和工程创新将环境风险降至最低,并预先规划好退役处置方案,形成完整的闭环。

3 发展思考

面向核动力民用船舶这一复杂系统工程,需要制定稳妥的技术路线,尤其聚焦中国实际情况进行分步实施。

1) 堆型选择。核动力民船需优先选择技术成熟度高、可通过核安全审评的反应堆类型。目前海军舰艇与破冰船普遍采用的压水堆体系已经形成较为完备的工程经验,是当前条件下可行的方案之一。与此同时,我国正在布局第四代先进反应堆技术,包括熔盐堆等具有固有安全与高效率潜力的堆型,可保持对先进堆型在民船应用的持续研究与前瞻布局;但先进熔盐堆仍处于示范与验证阶段,材料、在线处理等工程化挑战尚需突破。

2) 基于数字反应堆技术的试验验证体系。参研核动力舰船研制实践,在民用船应用前建立地面验证体系仍是必要环节。然而,国内外先进经验显示,未来反应堆设计的验证手段正从传统的全尺寸陆上模式堆逐步转向以数字孪生、高保真物理模拟、软件在环/硬件在环(SIL/HIL)为核心的数字综合验证平台,以提高效率、降低成本。因此,我国在推进核动力民船工程时,可采用数字化验证为主、必要的关键试验设施为辅方式构建试验体系,实现工程可验证性与经济性之间的平衡。

3) 固定航线示范运营。核动力民船初期应用宜选择固定航线进行示范。固定的点对点航线便于统一管理和风险控制。例如,可考虑在国内航线上运营核动力运输船(如超大型集装箱船或远程矿砂船)以建设示范项目。在该模式下,航线两端港口

均由同一组织或国内机构管理,避免跨国监管障碍和法律冲突。这种同一体系内的封闭航线试点,有助于在相对可控的范围内累计运行经验。一旦示范航线运营证明安全可靠,将为后续更大范围的核动力民船应用树立标杆。

4) 分段推船模式。针对核动力船舶进出港受限的问题,可以采用“核动力推轮+常规船舶”相结合的工程方案。具体而言,由搭载核反应堆的核动力推船在远洋提供主动力牵引,而在接近沿岸和港口时则由常规动力(如LNG)拖船接替,引导无核的驳船或无动力船体进港。通过更换动力单元,核反应堆始终留在公海或指定区域,不直接进入商业港口,这将规避港口对核动力商船靠泊的顾虑。同时,核动力推船可在一条航线上服务多艘运载船舶,提高昂贵核动力装置的利用效率。这种模块化推进模式有望缓解核动力商船无法获保险及港口拒绝靠泊的难题,为核动力在航运业的应用探索出折中路径。

5) 应用场景聚焦与经济性提升。短期内,核动力民船最可能的突破口是在某些常规手段难以替代的领域,例如极地航道和科考、超大型高速运输和海上浮动设施等。核动力民船可率先在上述利基市场站稳脚跟,取得示范效益后再向更广泛的商用航运渗透。此外,核动力民船能否实现商业化推广,经济性是决定性约束因素。为降低建造、运营与全生命周期成本,需要围绕关键技术路线实现系统性突破。第一,在满足固有安全与被动安全要求的前提下,通过安全等级优化减少对高冗余度工程安全系统的依赖,有望降低系统复杂度并显著减少建造与运维投入。第二,高丰度低浓铀(HALEU)燃料在先进小堆与微堆中的应用,可延长燃料周期、减少补给频次,从而降低燃料供应链成本并提升运行的连续性与经济性。第三,依托小堆/微堆的模块化与工厂化制造体系,可实现批量化生产和标准化组装,有助于缩短建造周期、减少现场施工工作量,并提升质量可控性。此外,利用核动力系统高温热源开展多用途耦合利用,如制氢或港岸供能,可提高系统的综合能源效率,进而改善投资回报率。

6) 配套设施与安全保障。推进核动力民船工程还需同步建设完善的配套体系。一方面,应建立专门的母港基地,配备核燃料更换和废料处理设施以及检修维护能力,确保核动力装置全生命周期的妥善管理。另一方面,必须严格遵守和制定核动力船舶的安全规范,落实辐射屏蔽、防碰撞设计和应急预案等措施。船员需经过特殊培训,具备核反应堆操作和应急处理技能。

7) 监管协同与公众认知。核动力民船的推广不仅依赖公众接受度,更取决于科学、透明、可验证的安全监管体系。因此,在推进示范工程前,应将安全监管研究置于优先位置,围绕核动力船舶的全生命周期风险特征,系统开展法规标准对接、风险评估方法、事故管理机制以及跨部门协同流程等方面的研究。一方面,应结合我国监管体系特点,完善针对船载核装置的许可机制、运行监察、退役与废物管理要求,并探索与IMO、IAEA规则框架的衔接路径,构建与国际一致的监管体系。另一方面,在安全监管体系逐步成熟的基础上,通过公开透明的信息发布、监管结果披露以及示范工程的安全绩效展示,可逐步提升社会公众及利益相关方对核动力民船的信任度。此外,由于核动力商船跨国航行需获得相关沿岸国批准,建立稳定、可信的监管体系也是获得国际认可的前提。因此,我国在推进核动力民船发展时,应同步深化海事监管部门与核安全监管部门的协作机制,并积极参与IMO相关规则修订,推动构建统一、科学的国际监管环境。

中国发展核动力民用船舶应采取稳步试验、循序渐进的工程路径:以成熟堆型为基础,结合数字化试验平台和必要的关键试验装置开展验证;通过固定航线示范工程积累运行经验;探索分段推船等可工程化的应用方式;聚焦应用场景与提升经济性;同时完善配套设施与监管体系,强化安全措施和科普沟通。在确保安全可控的前提下逐步推进,为我国核动力民用船舶从试验走向实用奠定基础。

4 结束语

核动力民用船舶作为先进核能技术与现代航运业相结合的产物,曾几度在历史舞台上闪耀,又因种种原因沉寂。通过对发展历程和现状的综述可以发现:核动力船舶具有常规船无法比拟的技术优势,零排放、高功率、长续航等,这使其在极地破冰、大型运输等领域展现出巨大潜力;但同时它也面临着安全监管、经济可行性和公众认同等多重挑战,导致过去的大部分示范项目未能延续。

进入21世纪,随着小型模块化反应堆等新技术的成熟以及全球减碳压力,核动力民船正迎来新的发展契机。英国、挪威等国已经在法规和研发层面迈出试探性步伐,我国和其他国家的相关研究也在积极开展。长远看,核动力民船有望在特定高端领域率先实现突破,并凭借示范效应逐步获得更广泛的应用。

核动力民用船舶承载着引领航运业绿色转型的

希望。在科学安全的前提下稳步推进技术创新和制度完善,充分汲取前人的经验教训,有望在 21 世纪中叶从概念验证走向商业常态,为人类开辟清洁高效的航运新时代。在碳中和的宏伟愿景下,核动力民船的发展值得我们投入持续的关注和努力。

参 考 文 献

- [1] BHATTACHARYYA R, EL-EMAM R S, KHALID F. Climate action for the shipping industry: some perspectives on the role of nuclear power in maritime decarbonization [J]. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2023, 4: 100132.
- [2] 严新平, 韩亚, 吴兵, 等. 水路交通系统的发展现状与未来展望[J]. *中国航海*, 2024, 47(2): 145-152.
YAN X P, HAN Y, WU B, et al. Current development and future prospects of waterborne transportation systems [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(2): 145-152. (in Chinese)
- [3] 伍婧, 涂敏, 严新平, 等. 我国海洋港口新能源技术应用发展探析[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(4): 234-244.
WU J, TU M, YAN X P, et al. Application of new energy technologies in marine ports of China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(4): 234-244. (in Chinese)
- [4] 陈显硕, 张明宇, 侯俊如, 等. 船舶节能减排领域热点变化与碳减排技术趋势[J]. *中国航海*, 2025, 48(增刊1): 1-7.
CHEN X S, ZHANG M Y, HOU J R, et al. Hotspot evolution in ship energy conservation-emission reduction and technology trends in ship de-carbonization [J]. *Navigation of China*, 2025, 48(Suppl. 1): 1-7. (in Chinese)
- [5] 陈弓, 朱宇, 韩冰. 绿色航运能源技术现状及发展趋势分析[J]. *交通信息与安全*, 2023, 41(2): 168-178.
CHEN G, ZHU Y, HAN B. A study on the status quo and trend of green energy technology for shipping industry [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2023, 41(2): 168-178. (in Chinese)
- [6] SARDAR A, ISLAM R, ANANTHARAMAN M, et al. Advancements and obstacles in improving the energy efficiency of maritime vessels: a systematic review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 214: 117688.
- [7] 程相茹. 民用核动力船舶安全及概念设计研究[J]. *机械工程师*, 2025, (1): 82-87.
CHENG X R. Research on safety and conceptual design of civil nuclear ship [J]. *Mechanical Engineer*, 2025, (1): 82-87. (in Chinese)
- [8] HOANG A T, FOLEY A M, NIŽETIĆ S, et al. Energy-related approach for reduction of CO₂ emissions: a critical strategy on the port-to-ship pathway[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355: 131772.
- [9] KHLOPKIN N S, ZOTOV A P. Merchant marine nuclear-powered vessels [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1997, 173(1): 201-205.
- [10] SCHOYEN H, STEGER-JENSEN K. Nuclear propulsion in ocean merchant shipping: the role of historical experiments to gain insight into possible future applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 169: 152-160.
- [11] 郑洁, 余凡, 朱军民, 等. 海洋核动力装备国内外发展现状与前景展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 62-73.
ZHENG J, YU F, ZHU J M, et al. Development status and prospect of marine nuclear power equipment in China and abroad [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 62-73. (in Chinese)
- [12] KONTOVAS C A. The Green Ship Routing and Scheduling Problem (GSRSP): a conceptual approach [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31: 61-69.
- [13] WANG S, MENG Q, SUN Z. Container routing in liner shipping [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2013, 49(1): 1-7.
- [14] DEDES K J, WETTERSKOG D, ASHWORTH A, et al. Emerging therapeutic targets in endometrial cancer [J]. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2011, 8(5): 261-271.
- [15] NAMIKAWA S, MÆRLI M, HOFFMANN P, et al. Nuclear powered ships-findings from a feasibility study [C]// *Proceedings of the 19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19)*, Osaka, Japan, 24-25 Oct 2011.
- [16] AL-ENAZI A, OKONKWO E C, BICER Y, et al. A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1962-1985.
- [17] CHEN J, ZHENG T, GARG A, et al. Alternative maritime power application as a green port strategy: barriers in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 825-837.
- [18] 刘宇. 俄罗斯民用船舶核动力装置发展现状与前景研究[J]. *全球科技经济瞭望*, 2017, 32(7): 70-76.
LIU Y. Development status and prospects of civilian nuclear power plants in Russia [J]. *Global Science, Technology and Economy*, 2017, 32(7): 70-76. (in Chinese)

- Chinese)
- [19] BHAUDDIN ALAM S, KUMAR D, ALMUTAIRI B, et al. Small Modular Reactor core design for civil marine propulsion using micro-heterogeneous duplex fuel. Part I: Assembly-level analysis[J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 346: 157-175.
- [20] ALAM S B, RIDWAN T, KUMAR D, et al. Small Modular Reactor core design for civil marine propulsion using micro-heterogeneous duplex fuel. Part II: Whole-core analysis [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 346: 176-191.
- [21] EL K O, KABACH O, CHETAINE A. Neutronic investigation of prospective dual-cooled micro-heterogeneous duplex fuel for small modular long-life reactors: assembly level design and analysis [J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 160: 104680.
- [22] 张陈, 刘聪, 王国浩. 船用核动力应用进展及前景[J]. 珠江水运, 2025(1): 132-134.
ZHANG C, LIU C, WANG G H. Advances and prospects of marine nuclear power applications [J]. Pearl River Water Transport, 2025(1): 132-134. (in Chinese)
- [23] WANG Q, ZHANG H, ZHU P. Using nuclear energy for maritime decarbonization and related environmental challenges: existing regulatory shortcomings and improvements [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(4): 2993.
- [24] WANG Q. China's law and policy initiatives for integrating nuclear energy in maritime applications: a critical review[J]. Progress in Nuclear Energy, 2025, 179: 105538.
- [25] CARLTON J, SMART R, JENKINS V. The nuclear propulsion of merchant ships: aspects of risk and regulation [J]. Lloyd's Register Technology Days, 2010.
- [26] MCREYNOLDS R. Nuclear powered international commercial shipping: a note on the greenest solution and the challenges of international regulations[J]. Barry L Env't & Earth LJ, 2023, 13: 32.
- [27] EMBLEMSVAG J, ORDONEZ C H, TAMM C G, et al. Criteria for selecting nuclear reactors for merchant shipping [C] // Proceedings of the 2024 31st International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 31), Prague, Czech Republic, Aug. 4-8, 2024. New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2024: V004T04A043.
- [28] ZVIRIN Y. A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 1982, 67(2): 203-225.
- [29] 袁和平. 愿将此身长报国——记中国工程院院士、著名核动力专家彭士禄[J]. 中国军转民, 2024, (10): 9-11.
YUAN H P. "Devoting one's life to serve the nation"—in memory of Peng Shilu, academician of the Chinese Academy of Engineering and Renowned Nuclear Power expert [J]. Defence Industry Conversion in China, 2024, (10): 9-11. (in Chinese)
- [30] AOTO K, DUFOUR P, HONGYI Y, et al. A summary of sodium-cooled fast reactor development[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 247-265.
- [31] RAJAN K K. A study on sodium—the fast breeder reactor coolant [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1045, 1st International Conference on Materials Science and Engineering, 2021. Bristol: IOP Publishing, 2021: 012013.
- [32] SONG P, ZHANG D, FENG T, et al. Numerical approach to study the thermal-hydraulic characteristics of Reactor Vessel Cooling system in sodium-cooled fast reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, 110: 213-223.
- [33] ZHAO J, ZHANG J, WU Y, et al. Analysis of three-dimensional flow field and reactor vessel impact failure in sodium-cooled fast reactor core disruptive accident [J]. Applied Thermal Engineering, 2025: 127218.
- [34] ALEMBERTI A, SMIRNOV V, SMITH C F, et al. Overview of lead-cooled fast reactor activities [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 300-307.
- [35] BARONE G, BUONOMANO A, DEL PAPA G, et al. Advanced nuclear Lead-cooled Fast Reactor (LFR) for naval propulsion and shore connection: an energy, economic and environmental analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2025: 127354.
- [36] 吴宜灿, 柏云清, 李春京, 等. 铅基反应堆海洋核动力发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 63-73.
WU Y C, BAI Y Q, LI C J, et al. Development of lead-based reactor marine nuclear power[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(2): 63-73. (in Chinese)
- [37] SERP J, ALLIBERT M, BENES O, et al. The Molten Salt Reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014(77): 308-319.
- [38] ROSENTHAL M, KASTEN P, BRIGGS R. Molten Salt Reactors—history, status, and potential [J]. Nuclear Applications and Technology, 1970, 8(2): 107-117.
- [39] 谭美, 郭健, 陈刚. 核动力船舶与浮动堆发展现状

- [J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 11-21.
- TAN M, GUO J, CHEN G. Current development status of nuclear-powered ships and floating reactors[J]. Ship Engineering, 2019, 41(11): 11-21. (in Chinese)
- [40] HO A, MEMMOTT M, HEDENGREN J, et al. Exploring the benefits of Molten Salt Reactors: an analysis of flexibility and safety features using dynamic simulation[J]. Digital Chemical Engineering, 2023, 7: 100091.
- [41] ZHANG D, LIU L, LIU M, et al. Review of conceptual design and fundamental research of Molten Salt Reactors in China[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(5): 1834-1848.
- [42] DE FREITAS NETO L G, FREIRE L O, DOS SANTOS A, et al. Potential advantages of Molten Salt Reactor for merchant ship propulsion [J]. Brazilian Journal of Radiation Sciences, 2021, 9(2B (Suppl.)).
- [43] SCOTT B, BEARD T. An investigation into the potential of the Molten Salt Reactor for the propulsion of surface ships[J]. Scaling Decarbonization Solutions-Reducing Emissions by, 2022, 2030.
- [44] LEBLANC D, RODENBURG C. Integral Molten Salt Reactor [M]. Molten Salt Reactors and Thorium Energy. Elsevier. 2017: 815-833.
- [45] LOCATELLI G, BINGHAM C, MANCINI M. Small Modular Reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 73: 75-85.
- [46] MIGNACCA B, LOCATELLI G. Economics and finance of Small Modular Reactors: a systematic review and research agenda[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 118: 109519.
- [47] WANG Y, CHEN W, ZHANG L, et al. Small Modular Reactors: an overview of modeling, control, simulation, and applications[J]. IEEE Access, 2024, 12: 39628-39650.
- [48] SCHLEGEL J P, BHOWMIK P. Small Modular Reactors [M]. Nuclear Power Reactor Designs. Elsevier. 2024: 283-308.
- [49] INGERSOLL D, HOUGHTON Z, BROMM R, et al. NuScale Small Modular Reactor for co-generation of electricity and water[J]. Desalination, 2014, 340: 84-93.
- [50] MICHAELSON D, JIANG J. Review of integration of Small Modular Reactors in renewable energy microgrids [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111638.
- [51] 陈荣江. 微型模块化反应堆陆战场能源保障应用历程及启示 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(1): 146-152.
- CHEN R J. Application history and enlightenment of very Small Modular Reactor for land battlefield energy supply[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(1): 146-152. (in Chinese)
- [52] ONDIR FREIRE L, DE ANDRADE D A. Economically feasible mobile nuclear power plant for merchant ships and remote clients[J]. Nuclear Technology, 2019, 205(6): 766-780.
- [53] HOLBERT K E. A review of maritime nuclear reactor systems[J]. Journal of Nuclear Engineering, 2025, 6(1): 5.
- [54] JOHANSEN C H. Public opinion on nuclear power in commercial shipping, perception, concerns and knowledge[D]. Porsgrunn: University of South-Eastern Norway, 2025.
- [55] KULIKOV K N, NIZAMUTDINOV R A, ABRAMOV A N. The conceptual solutions concerning decommissioning and dismantling of Russian civil nuclear powered ships [C]//Proceedings of the ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2013), Brussels, Belgium, Sept. 8-12, 2013. New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014: V002T03A024.
- [56] BOGATOV S, VYSOTSKII V, SARKISOV A, et al. Analysis of the radioactive contamination of the environment due to decommissioned objects of the nuclear-powered fleet in northwestern Russia [J]. Atomic Energy, 2006, 101(1): 485-493.
- [57] ADUMENE S, ISLAM R, AMIN M T, et al. Advances in nuclear power system design and fault-based condition monitoring towards safety of nuclear-powered ships[J]. Ocean Engineering, 2022(251): 111156.
- [58] BÄRENHOLD R, BAH M M, LORDAN-PERRET R, et al. Decommissioning of commercial nuclear power plants: insights from a multiple-case study [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024(201): 114621.