

海洋核动力装备国内外发展现状与前景展望

郑洁^{1,2}, 余凡³, 朱军民⁴, 柳存根^{1,2*}, 王欣月^{1,2}, 朱英富⁵

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国海洋装备工程科技发展战略研究院, 上海 200240; 3. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200240; 4. 上海市核电办公室, 上海 200240; 5. 中国船舶集团有限公司第 701 研究所, 武汉 430000)

摘要: 海洋核动力装备是解决深远海资源开发中持久动力能源供给、海洋领域“碳减排”等问题的重要支撑。我国作为核电大国、海洋大国, 虽然在核工业和海洋装备产业领域具有较好的优势基础, 但在民用海洋核动力装备领域尚未实现“从零到一”的突破。本文基于对国内外海洋核动力装备发展实践研究, 总结了海洋核动力装备的优势特性和技术策源, 分析了未来海洋核动力装备发展的应用场景和主要趋势, 厘清了我国发展海洋核动力装备的战略需求与问题, 并提出了相关发展建议。研究认为海洋核动力装备总体呈现由军用向民用拓展、由陆地向海洋拓展的发展趋势, 技术策源以紧凑型 and 一体化压水堆为主, 装备类型近期将聚焦于海上浮动核电站和核动力破冰船。研究建议, 通过顶层规划明确我国海洋核动力装备发展的重点应用场景, 通过建立示范工程形成与发展需求相匹配的法规标准和监管制度等措施, 突破海洋堆系统建造和核动力平台总装建造等方面的关键技术, 推动海洋核动力装备高质量发展。

关键词: 海洋核动力装备; 小型模块化反应堆; 压水堆; 核动力船舶; 海上浮动核电站

中图分类号: P75; U674.921 **文献标识码:** A

Development Status and Prospect of Marine Nuclear Power Equipment in China and Abroad

Zheng Jie^{1,2}, Yu Fan³, Zhu Junmin⁴, Liu Cungen^{1,2*}, Wang Xinyue^{1,2}, Zhu Yingfu⁵

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Strategy Institute of Ocean Engineering, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Nuclear Power Office, Shanghai 200240, China; 5. No. 701 Research Institute of China State Shipbuilding Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Marine nuclear power equipment (MNPE) is crucial for the sustainable energy supply and carbon emission reduction during deep-sea resource exploitation. However, China has not achieved breakthroughs in the field of civil MNPE, although it has a good foundation in the nuclear and marine equipment industries. Based on the research of MNPE development practices in China and abroad, this study summarizes the advantages and technical sources of MNPE, analyzes future application scenarios and development trends, clarifies the strategic demand and problems of MNPE development in China, and proposes several development suggestions. Currently, MNPE is extending from military to civil use and from land to sea, and its main technical

收稿日期: 2023-03-10; **修回日期:** 2023-05-08

通讯作者: *柳存根, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授, 主要研究方向为船舶与海洋工程的设计与建造;

E-mail: cgliu@sjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国海洋装备产业链发展战略研究”(2022-XBZD-01), “海洋装备工程科技未来20年发展战略研究”(2021-XBZD-13-5)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

source is compact and integrated pressurized water reactors. In the near future, the equipment types of MNPE will focus on offshore floating nuclear power plants and nuclear-powered icebreakers. To promote the high-quality development of MNPE, it is necessary to clarify the major application scenarios of MNPE in China through top-level planning, formulate regulations, specifications, and supervisory systems through demonstration projects to match with practical development demands, and achieve breakthroughs regarding key technologies such as the construction of marine reactor systems and nuclear power platform assemblies.

Keywords: marine nuclear power equipment; small modular reactors; pressurized water reactors; nuclear power ships; offshore floating nuclear power plants

一、前言

在全球气候变化背景下,核能作为零碳清洁能源再次受到各国关注。随着技术的创新发展,核能装备的安全性得到大幅提升,其应用开始从军用向民用拓展,由陆地向海洋拓展。海洋核动力装备是船舶海洋工程与核动力技术有机融合的、极其复杂的高端海洋装备,其发展不仅符合能源转型的迫切需求,而且紧贴海洋强国、核电强国建设等国家战略需求,可以为深远海资源开发的持久动力能源供给、海洋领域的“碳减排”提供重要方案。

美国、俄罗斯等海洋强国正在积极推进核动力破冰船、海上浮动核电站等民用海洋核动力装备的发展^[1,2]。在国家相关政策的引导下,国内学者和研究院所也开始关注这一领域,认为核动力在海洋领域的应用具有广阔前景,尤其是海上浮动核电平台、核动力船舶的应用。由于我国缺乏民用海洋核动力装备发展的相关经验,因此有必要在顶层规划引导下明确应用场景,基于已有的核电和海洋装备产业基础,在开展自主研发的同时寻求一定的国际合作,重视解决反应堆系统建造、电力系统、核动力平台总装建造、反应堆燃料设计等方面的关键技术问题^[3-8];亟待制定配套法规、行业标准规范、监管模式、应急响应、安全保障等方面的制度体系^[9-16]。

我国作为海洋大国、核电大国、海洋装备制造强国具有相关优势基础和能力,理应抓住先机,抢占海洋核动力装备发展的国际市场高地。本文分析提出海洋核动力装备的应用场景、发展需求,厘清我国在该领域发展的优势基础和存在的问题,从政策规划、技术攻关等层面提出符合我国国情的民用海洋核动力装备发展建议,以期为我国海洋核动力装备发展提供借鉴。

二、海洋核动力装备的优势特性、技术策源与应用场景

海洋核动力装备具有能量密度高、清洁低碳、续航时间久、可灵活移动等优点。从技术策源来看,目前适用于海洋核动力装备的小堆技术是发展较为成熟的压水堆。铅铋液态金属堆、熔盐堆等新一代堆型受到国内外关注,可能成为海洋核动力装备的动力技术选择,但受技术成熟度、海洋环境适用性等因素影响,短期内无法应用在海洋核动力装备上。从应用场景来看,目前海洋核动力装备主要用于舰船动力推进、提供可移动的海上商业用电、提供海水淡化和工业制热所需的热能等方面。

(一) 优势特性

1. 功率密度大,运行周期长

核能最大的优势是能量密度高,核动力装置几乎可以不间断地满负荷运行,提供持续可靠的能源供应。其不需要空气助燃的技术特点特别有利于在海洋装备领域的应用,可以保证海洋开发活动所需的装备以较高的速度、长时间在水下稳定运行。常规潜艇无法在没有空气的水下使用柴油机,依靠大量蓄电池作为水下航行动力的潜艇续航时间短、需要频繁浮出水面进行充电,而以核反应堆为动力装置的水下潜艇具有良好的隐蔽性、强大的续航力^[17]。对民用船舶而言,采用核动力能够使其在大功率下以高航速连续航行,加大船舶有效载重量的同时,极大地提高运输效率。

2. 清洁低碳

为应对全球气候变化,全球能源使用向清洁低碳、安全高效转型发展。核能作为清洁低碳能源受到各国关注,发展核能被视为进行能源结构优化、减少温室气体排放,实现可持续发展的重要途径之一。目前,海运排放的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物分别约占全球排放量的2%、4%~6%、10%~

15%，航运业的“碳减排”任重道远。为兑现减少船舶温室气体排放初始战略中确定的减排目标，国际海事组织正在采取一系列的强制性措施降低船舶碳排放。研究发现，与传统燃料动力系统相比，核动力船舶可减少98%的二氧化碳排放，此外硫氧化物、氮氧化物等污染也能够完全消除^[18]。因此，发展清洁低碳的海洋核动力装备可以为海洋领域的“碳减排”提供重要方案。

3. 应用场景灵活

海洋核动力装备应用不受场地限制，不需要考虑地震、地质、居民稠密区等各种因素的影响，应用场景灵活。相比于大型核电站，小型模块化反应堆的设计可实现各部分构件在工厂的预制，运送到现场后进行模块组装，不仅可以提高施工质量和可靠性，还可带来极大的运输便利，节省施工建造时间。另外，小型模块化反应堆适应负荷变化的能力强，可根据装机容量需求进行模块化组合。根据特定应用场景将小型模块化反应堆安装在海洋浮体平台上之后，可根据用户需求迁移到需要的海域位置，实现为偏远岛礁和沿海城市供电、为海洋钻井平台和深海水下装备提供持久动力供给等应用。

（二）技术策源

小型模块化反应堆（以下简称“小堆”）通常是指电功率输出介于10~300 MW之间的核反应堆^[19]。小堆具有堆芯结构小、固有安全性高、建造标准化、应用灵活等特点，符合未来能源转型发展需求，因此也越来越受到决策者、投资者、核电和能源行业的关注。美国、英国、加拿大、芬兰等国家都在通过不同的方式支持本国小堆技术的研发^[20]。虽然小堆单堆投资规模较低，但首次部署需要具备高安全性、可靠性。由于小堆在经济性方面仍面临较大挑战，因此大批量的小堆商业化应用预计要到2030年以后实现^[21]。

根据国际原子能机构的统计，目前大约有七十余种小堆概念正在开发^[22]。根据小堆功率大小和用途的不同可分为五类：一是单机组压水堆，可用于替代小型化石燃料机组或部署为分布式发电机组；二是多机组压水堆，可用于分布式发电机组或替代中型电网负荷；三是可移动或运输的压水堆，包括浮动堆；四是电功率输出低于10 MW的微型模块化反应堆（以下简称“微堆”），主要用于偏远地区

的离网运行和深海、深空等无人探测场景；五是处于概念设计和研发阶段的第四代反应堆^[20]。

以上小堆的技术成熟度和许可成熟度存在较大差异。得益于数十年大型压水堆核电机组的运行和监管经验，目前世界范围内最成熟的小堆技术是压水堆，约占正在开发设计小堆总量的50%，如俄罗斯的KLT-40S小堆已用于海上浮动核电站的商业化运行。其他小堆设计主要集中在第四代反应堆方面，包括熔盐堆、铅冷快堆、钠冷快堆、高温气冷堆等。

海洋核动力装备可使用哪种小堆技术是关键。根据当前国际小堆建造经验和趋势来看，海洋核动力装备大多数都采用压水堆技术，从技术成熟度上看，压水堆的可靠性高、体积紧凑，经过持续的技术迭代已达到较高水平，不会在海洋环境下发生剧烈的不可控反应，特别适合海洋平台和船舶舰艇使用。第四代反应堆技术尚未成熟，近期不太可能用于海洋核动力装备。高温气冷堆的功率密度低，体积过于庞大，用在空间布局紧凑的海洋核动力装备上不合适，钠冷快堆风险较大，一旦发生钠泄漏容易导致钠火事故。

（三）应用场景

1. 舰船动力推进

舰船推进装置使用核动力的最大优点是无需大量燃料储备便可达到持久续航的目的。核动力在海洋领域的早期应用主要体现在核动力航母、核动力潜艇等军事武器装备领域，虽然早期美国、俄罗斯等国在民用核动力船舶方面有所发展，但受制于技术、成本、地域准入许可等因素影响，核动力在很长一段时间里都不被视为可行的商船动力选择。近年来，在航运脱碳趋势下，将核动力作为船用燃料的选项再次获得国际社会关注。荷兰船舶设计与工程公司C-Job Naval Architects研究认为大型远洋船舶是应用核动力推进装置的最佳选择^[18]；比如，破冰船、大吨位的矿砂船、集装箱船等对船舶动力、环保、航速、载货容积率等方面有较高需求，若采用核动力装置推进，可大大提高商船的航次收益。

2. 提供可移动的海上商业用电

随着海洋开发活动的持续推进，深远海油气钻井平台的持久电力供给、偏远岛屿的稳定用电、沿海城市和欠发展小岛国的应急用电等问题日益凸显，通过在不同海域灵活部署移动式的海上核电站

即可为以上问题的解决提供有效方案。海上浮动核电站是小型核反应堆与船舶工程的有机结合,具有灵活性强、用途广泛、持久稳定供电、绿色零碳等特征,还可根据应用场景和技术配置的不同,实现对海水淡化供热、海上电解制氢、沿海城市供热等功能。自俄罗斯首个民用浮动核电站“罗蒙诺夫号”在2020年投入商业运行后,海上浮动核电站的发展规划受到国际社会的广泛关注。

3. 提供海水淡化、工业制热等活动所需热能

20世纪90年代以来,利用核能进行海水淡化的技术就受到了国际原子能机构和许多国家的重视,认为核动力发电和海水淡化工程配套,在技术和经济效益上皆可行。核燃料具有价格相对稳定、环境影响小的优点,将核动力装置与海水淡化工艺相结合,通过低温多效蒸发技术,小型核反应堆利用自身产生的热能使海水脱盐转化为淡水,减少海水排放所产生的余热浪费和热污染问题^[23],实现水电联产效益的同时,降低海水淡化成本。为众多缺乏淡水的国家或沿海地区提供新的淡水来源。除此之外,通过海洋核动力装备运行产生的热能还能在工业制热、沿海城市供暖领域发挥重要作用。

三、国际海洋核动力装备发展实践与趋势

核能在海洋领域的应用已有近70年的历史,从美国的核动力航母、核动力潜艇,到俄罗斯的核动力破冰船、首座海上浮动核电站的实践发展,无不突显出海洋军事强国对核能利用的重视。国际海洋核动力装备由军用向民用拓展,虽然核动力商船受经济性、安全性等因素影响发展停滞,但海上浮动核电站建设取得突破并实现商业运行,核动力破冰船在俄罗斯先进技术推动下得到持续发展。

(一) 国际海洋核动力装备发展实践

1. 海洋核动力装备在军用领域的实践

目前,海洋核动力装备在国防领域的应用主要体现在核动力潜艇、核动力航母、核动力巡洋舰方面,从核动力舰船的拥有数量和发展实力来看,美国和俄罗斯国际领先。1954年美国“鸚鵡螺号”核动力潜艇服役开启了海洋核动力应用的先河。目前,全球共有300多艘核动力潜艇,在役数量有160多艘,大多采用小型压水堆技术^[17];全世界共

有核动力航母12艘,均采用小型压水堆技术。除了核动力的潜艇和航母之外,美国、俄罗斯等国在海洋核动力领域的军事应用向鱼雷、滑翔机、海底战场等方面拓展。

俄罗斯是拥有核动力潜艇数量最多的国家,其在潜艇反应堆研发方面有压水堆和液态金属堆两个方向,采用“一型多用”的策略,在不同型号的潜艇装备上具有较高的通用性;在核动力潜艇设计建造方面注重减小体积、重量,不断提升降噪、一体化设计等能力。俄罗斯最新建造的全球最长的“别尔哥罗德号”核动力潜艇排水量近30 000 t,还搭载了6枚“波塞冬”核动力鱼雷,于2022年交付海军服役,是全球唯一可用于海底战争和间谍行动的特殊潜艇^[24]。

美国海军正在研制的“哥伦比亚级”战略核潜艇是其有史以来建造的最大型潜艇,采用新型S1B压水堆,在提升安全性和降噪性能的同时,使用高富集度燃料棒,在舰艇全生命周期服役期间无需进行反应堆换料,将大幅降低运维成本,首艇于2021年开工,预计2028年完成下水,有望成为世界上最先进的战略核潜艇^[25]。1961年,美国建造的世界第一艘核动力航空母舰“企业号”、第一艘核动力水面战舰“长滩号”巡洋舰开始服役。其后美国又建造了10艘“尼米兹级”核动力航母。截至2022年7月,美国开工建造了6艘“福特级”核动力航母,其中1艘“福特号”已建成服役,1艘已下水,4艘正在建造中^[26]。美国最新设计建造的核动力航母同样实现了反应堆设计寿命和换料周期与舰船同寿期,从该航母下水服役到退役中间无须更换核燃料。

2. 海洋核动力装备在民用领域的实践

目前来看,海洋核动力装备在民用领域的发展主要表现为核动力商船、核动力破冰船、海上浮动核电站三种应用场景。20世纪50年代,美国、苏联、日本、德国就开始研究民用核动力船舶。1957年苏联建造的世界首艘核动力破冰船“列宁号”下水,1959年美国建造的世界首艘核商船“萨瓦纳号”下水,开启了民用海洋核动力装备和平应用的序幕。由于建造和维护成本高昂、不同地域对于核动力商船准入许可的限制以及用户方对技术、运营、管理等因素可能带来的核安全隐患的担忧,海洋核动力装备在民用领域并未得到大规模发展,历史上建造的核动力商船仅有四艘(见表1)。

表1 国际核动力商船信息一览表

船名	国家	用途	服役时间/年	退役时间/年	退役原因	反应堆类型及热功率
NS Savannah	美国	客货结合	1962	1971	建造、使用成本高	压水堆, 74 MWt
NS Mutsu	日本	运输特殊货物和培训船员, 从未商业载货运行	1972	1992	发生中子泄露, 大修后完成航行目标退役	压水堆, 36 MWt
Otto Hahn	德国	矿石船	1970	1982	被私人船舶公司购买并换成柴油发动机	压水堆, 38 MWt
Sevmorput	俄罗斯	集装箱船	1988	2007	被改装为世界上第一艘核动力石油钻井船	压水堆, 135 MWt

自“列宁号”问世后,俄罗斯在核动力破冰船方面一直保持建造运行,是目前唯一拥有核动力破冰船且保持技术垄断的国家。1959—2022年,俄罗斯相继建成12艘核动力破冰船,5艘已退役,7艘在服役中,还有3艘在建造中,4艘在计划中^[27]。随着极地战略新空间开发价值的提升,各海洋强国开始重视核动力破冰船的发展,美国前总统特朗普曾呼吁海岸警卫队研究开发核动力破冰船,在维护美国在北极国家利益的白宫备忘录中也提及要建造核动力破冰船^[28]。

在海上浮动核电站方面,最早的设想源于美国,但最终建成并投入商业运行的是俄罗斯。20世纪60年代后期,美国陆军在巴拿马运河停靠“斯特吉斯号”自由舰,为军民提供电力,是世界第一座海上浮动核电站,但其反应堆的使用和维护费用高昂,经过7年的运营于1976年关闭,经过加油、净化、长期储存并密封后于2018年退役^[29]。俄罗斯为解决北极地区能源短缺问题,基于其在核动力破冰船建造方面的丰富经验,于2020年建成世界首座商业运行的海上浮动核电站“罗蒙诺索夫院士号”,已实现为偏远城市及海上生产活动供电供热。俄罗斯已开始研发下一代海上浮动核电站,电功率覆盖8~300 MW,以满足无法适用传统电站的不同场景应用,印度尼西亚、马来西亚等十余个国家都对俄罗斯的海上浮动核电站表示出订购意向^[30]。

(二) 国际海洋核动力装备发展趋势

从应用场景看,国际海洋核动力装备由军用向民用拓展。在军事应用方面,以美国、俄罗斯为首的海洋军事强国均具备强大的核动力舰船建造能力;从装备类型看,由核动力的航母、潜艇、驱逐舰向核动力的鱼雷、滑翔机、海底战场、高能武器供电等方面拓展。从美国、俄罗斯的海洋核动力装

备发展历程来看,其已完成了从军用向民用的核动力技术转化^[3],均以成熟的核动力舰船技术为基础向民用核动力商船、核动力破冰船、海上浮动核电站拓展。在民用海洋核动力装备形成建造经验时可进一步为核动力舰船技术研发提供创新支撑。俄罗斯丰富的核动力破冰船建造经验即已形成对核动力舰船发展的有利借鉴,无不体现了海洋核动力装备在军民领域的融合发展策略。

从技术策源看,各国海洋核动力装备发展经历了安全可靠性和功率由大到小、单舰艇反应堆装堆数量由多到少、反应堆自然循环能力由低到高、堆芯寿命由短到长等过程^[31]。当前海洋核动力装备以紧凑型 and 一体化压水堆为主,下一代堆具有发展潜力。美国、俄罗斯、英国、法国等国家的海洋核动力装备成熟、兼具安全性和经济性,多采用压水堆技术,重视提高反应堆寿命、运用全电力推进系统。目前,有发展需求的国家都在致力于开发体积更小、重量更轻、安全可靠性和智能化运维能力的海洋核动力装备,以满足反应堆在海洋装备上使用的一系列特殊要求。本文分析了各堆型的技术成熟度情况(见图1),从海洋核动力装备适用的堆型来看,近期还将以技术成熟的压水堆的谱系化发展为主,在一体化、全寿命周期、自然循环能力等性能方面进一步提升。液态金属冷却堆、熔盐堆等下一代堆型虽然具有战略价值但技术尚未成熟,未来可能成为选项之一。

从民用市场海洋核动力装备发展类型来看,近期聚焦海上浮动核电站、核动力破冰船的可能性比较大:一是俄罗斯已经有了成功的示范,二是相关国家对这两个领域的海洋核动力装备应用具有紧迫需求,三是受经济性、海上核安保、相关法规缺失等因素影响,核动力商船等并不适合作为近期发展的目标。未来随着相关技术的成熟、法规制度的健

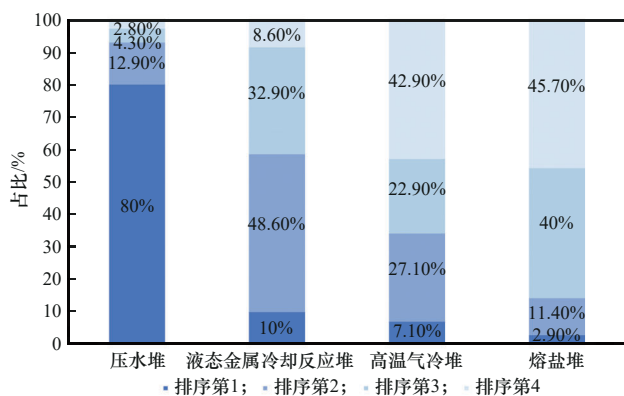


图1 各堆型在海上适用的技术成熟度排序

全，将聚焦满足深远海战略发展需求的大型远洋核动力商船，以及支撑深远海的科考、油气开发、采矿等活动的核动力装备。民用海洋核动力装备的市场开拓：一要聚焦环境恶劣但战略价值较高的领域，比如深海、极地；以及作业周期长、对功率和续航要求高、传统动力能源无法满足的领域，比如深远海资源开发和运输活动；二要兼顾适用堆型及装备平台的经济性，目前来看，无动力驳船、可潜式平台的设计和建造成本要低于有动力船舶平台。

四、我国发展海洋核动力装备的需求与基础

（一）发展海洋核动力装备的战略需求

1. 发展海洋核动力装备可满足我国向深远海开发海洋资源的战略需求

目前我国海上油气开采主要采用油田伴生气和原油发电的动力供给方式，存在海洋环境污染、资源浪费、供电成本高等问题，长远来看不可持续。渤海稠油储量虽丰富但开采效率低，规模化开发受限于蒸汽或热流体的经济性供应，若采用核能热水驱方式，可大大提高海上平台稠油热采的开发效率。中国海洋石油集团有限公司在渤海油田开发方面提出了 $6 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ kW的核电供应需求^[32]。而南海深水油气田的区域开发用电规模可达100 MW以上，若采用常规发电机组，则需布置十余台发电设备，对油气平台的空间布局、绿色减排、直升机起降作业等方面带来负面影响^[33]；若采用核能供电则可大大简化供电设备规模、实现绿色环保、降低投资成本。在深海矿产资源勘探开发方面，由于作业环境的特殊性，装备需满足全寿命期无维护、持续

稳定的动力供给等需求。目前燃料电池、电缆供电、柴油动力等常规的动力能源存在功率密度小、运行周期短等劣势，若采用核能供电，则可实现深海装备在水下“待的更久、走的更远、作业能力更强”的动力能源需求。

2. 发展海洋核动力装备可助力海洋绿色动力能源转型，提升高端装备制造水平

根据国际海事组织（IMO）发布的《第四次温室气体研究报告》显示，2018年，航运业二氧化碳的排放量占全球人为排放总量的2.89%，达到 1.056×10^9 t^[34]。2018年4月，IMO通过了减少船舶温室气体排放的初步战略，该战略从愿景目标、减排力度、指导原则、不同阶段的减排措施和影响等方面对航运业应对气候变化的行动做出总体安排^[35]。在IMQ日益严苛的船舶“碳减排”规制下，我国航运业发展面临严峻的船舶绿色动力能源转型需求。随着航运船舶向深远海、绿色化、大型化发展及核工业和小堆技术的成熟，将核能作为远洋船舶的动力推进方式受到船东关注。海洋核动力装备是核能在海洋这一特殊乃至极端环境下的应用，其对新材料、新工艺、设备小型化、高可靠性等方面提出的高要求都将引领高端装备的发展。作为各种高精尖技术和科技创新的集大成者，海洋核动力装备的高质量发展足以体现国家海洋科技创新实力，可作为高端装备技术输出，服务“一带一路”沿海国家，响应“一带一路”装备制造业“走出去”的国家战略。

3. 发展海洋核动力装备可支撑我国偏远岛礁开发和沿海城市的应急用电

我国岛屿众多，海岛经济开发一直受制于水、电资源的可持续供给。海岛周边生态环境脆弱，岛上陆地资源空间非常宝贵，这对海岛电力、热能和淡水资源的供给提出了绿色环保、节省空间使用、综合化能源供给的需求。海岛资源开发采用柴油或原油发电有很多弊端，一是需要用油轮运输补给柴油供应，一旦遭遇恶劣海洋气候环境变化将影响海上运输，可能发生燃油断供的现象；二是发电成本高且需要建造燃油储罐占用海岛陆地空间；三是燃油发电会造成海洋环境污染，不符合绿色低碳的发展理念。若通过海上浮动核电站为海岛供能，则可同时实现持久稳定供电、节省海岛空间利用、保护海洋环境、淡水和热能同步供给、为小岛屿国家及

沿海城市提供紧急用电等目的。浙江省政府曾在2011年发布《浙江省重要海岛开发利用与保护规划》，提出在确保安全的前提下，中远期计划选择大鱼山、高塘岛、南田岛、雀儿岙岛等探索建设海岛小型核电站^[36]，无不反映出海岛开发对海上浮动核电站的现实需求。

(二) 发展海洋核动力装备具备良好基础

1. 国家政策层面鼓励积极安全有序发展核电，推动核能综合利用示范

在“积极安全有序发展核电”的指导方针下，推动核能综合利用成为我国核电发展的重要战略选择。2021年政府工作报告中指出要在确保安全的前提下积极稳定地发展核电^[37]；《2030年前碳达峰行动方案》中明确要积极推动高温气冷堆、小型模块化堆、海上浮动堆等先进堆型示范工程，开展核能综合利用示范，加快关键技术装备攻关，培育高端核电装备制造产业集群^[38]。《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标》提出应适时编制小型模块化反应堆、钍基熔盐堆、浮式反应堆等新型反应堆的法规体系和安全审评原则，推动研究成果的工程化应用^[39]。规划建设海上浮动核电站是中国开发利用海洋资源的应有选项，但需要以安全为前提，经过严格的、科学的论证^[40]。为规范我国小型压水堆核动力厂安全发展，2016年，国家核安全局编制《小型压水堆核动力厂安全审评原则》（试行）^[41]，用以指导适用于海洋核动力装备的小型压水堆的安全审评工作。

2. 核电和海洋装备领域的产业优势为发展海洋核动力装备提供保障条件

虽然我国尚未建成民用海洋核动力装备，但已实现了核潜艇的自主研制，具有相对成熟的舰船建造技术，形成了完整的设计、建造、试验和运行体系，积累了丰富的工程实践和运行经验^[3]。在大型核电机组建设方面，成熟的三代堆技术“华龙一号”的批量化建设和“国和一号”的研发和示范工程建设，实现了核电自主品牌技术的历史性突破，并形成从设计研发到相关设备成套建造的完整产业链，培育了一批优质的核电装备制造供应商，核电工程建造水平与世界同步。在海洋装备建造方面，国内已形成以中国船舶集团有限公司为龙头的完整产业链，具备承担核动力船舶平台设计研发和建造

的能力。因此，国内在以上领域所具备的产业发展优势条件，可为我国自主建造海洋核动力装备示范工程提供可靠的、可供借鉴的保障条件。

我国目前在小堆技术策源方面积累的成熟经验可为海洋核动力装备所适用的小堆研发和谱系化发展提供借鉴和支撑。中国核工业集团有限公司、中国广核集团有限公司、国家电力投资集团有限公司、清华大学等单位面向不同应用领域和市场需求，积极开发各具特色的小堆技术，部分已具备开展示范工程条件，具有代表性的小堆发展实践包括：已在海南昌江开展示范建设的“玲龙一号”（ACP100）；已取得前期许可的一体化供热堆“和美一号”，计划在山东省海阳市开展示范建设；NHR200-II低温供热堆进入工程设计阶段；热功率为400 MWt的燕龙（DHR-400）泳池式低温供热堆正在推进工程示范。

3. 相关部门和单位已在推动海洋核动力装备的研发实践

在项目研发支持方面，为突破海上浮动核动力平台关键技术，从2011年起，国家先后发布了863项目“核动力船舶关键技术及安全性研究”、国家科技支撑计划“小型核反应堆发电技术及其示范应用”等科研任务，并在《“十三五”核工业发展规划》中纳入海洋核动力平台，要求开展相关标准规范及关键技术攻关^[42]。2014年，国家能源局发布了“海洋核动力平台总体关键技术及装备研发”项目指南，以上项目研究为发展海洋核动力装备奠定了技术研发基础^[43]。2015年国家发展和改革委员会同意将HHP25海洋核动力平台示范工程项目列为国家能源重大科技创新工程，将ACPR50S实验堆、ACP100S反应堆纳入能源科技创新“十三五”规划，以满足海洋核动力平台发展对反应堆多元化发展及开展相关海洋环境和电网适应性分析的需要^[43,44]。

在平台建设支撑方面，2014年9月，国家能源海洋核动力平台技术研发中心成立，该中心是集海洋核能开发、海洋工程装备制造、工程成套和运行为一体的首个国家级海洋核动力平台技术研发机构^[45]。2017年，中国核能电力股份有限公司、浙江浙能电力股份有限公司、上海国盛（集团）有限公司、江南造船（集团）有限责任公司、上海电气集团股份有限公司共同出资在上海成立中核海洋核动力发展有限公司，以期推动核动力装置在舰船、海

上平台等领域的应用，加快海洋核动力核心技术研发，促进国内海洋核动力装备产业化发展。

在工程示范推进方面，HHP25小堆已完成初步设计，采用双堆双机组配置、分散式成熟压水堆工程技术路线，设计的热功率为100 MWt、电功率为25 MWe。目前围绕该反应堆技术形成了适用于不同应用场景的多型号海洋核动力研发方案：可将核电站布置于浮动平台上的浮动式核电站、可在恶劣海况下下潜至水下运行的可潜式核电站^[46]。ACP25S、ACP100S两种型号的核动力装置初步设计完成，根据应用场景需求定制了单堆、双堆配置，可满足电功率范围25~250 MWe级的能源需求，拟与烟台、威海等地针对淡水、蒸汽等需求，商讨开展示范项目。ACPR50S小堆采用全非能动安全系统设计，单堆热功率为200 MWt，电功率约为60 MWe半潜式深吃水设计，利用海水作为最终热阱可有效避免因冷源损失造成类似日本福岛核事故的严重后果^[47]，在条件成熟时可启动示范项目建设，力争满足海洋核动力平台批量化发展需求^[44]。采用国际先进技术路线的单堆热功率50 MWt的一体化海洋小堆主要面向海洋核动力装备以及海岛的多用途示范，正在积极推动工程落地。总体来看，相关单位都在围绕小堆研发需求，对不同功率的小堆型号开展全面布局，促进小堆的谱系化发展及海洋堆的关键技术突破。

五、我国发展海洋核动力装备面临的挑战

近年来国家出台了一系列政策措施，在鼓励安全发展陆上核电的同时，积极探索核能的多样化应用。目前在小堆研发、海上核动力平台方面取得一些进展，但距离示范应用还有很多问题待解决。据了解，相关体制机制缺失被视为国家发展海洋核动力装备的最大阻碍因素，其次是安全保障问题备受重视，技术成熟度的阻碍性一般（见图2）。

（一）规制海洋核动力装备安全发展的配套法规和标准规范尚未形成

目前国内已形成较为完整和成熟的陆基大型核电机组及舰船的配套法规和监管体系。从用途来看，民用的海洋核动力装备应参照现行陆基核设施的设计标准并充分考虑其经济性，目前大型核电机

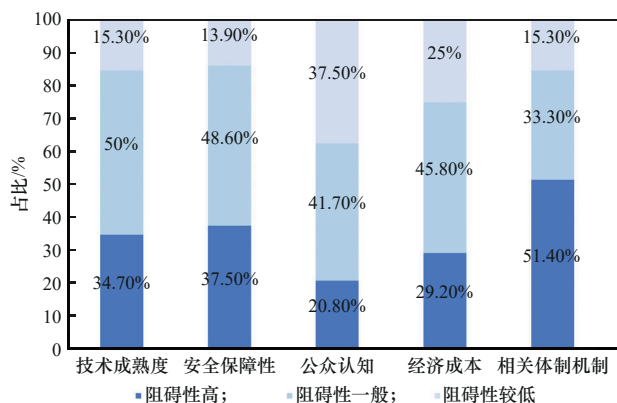


图2 阻碍海洋核动力装备发展的因素排序

组安全监管体系并未涉及海洋条件的内容；从使用环境来看，民用装备与核潜艇的作业环境更为相似，但核潜艇监管标准的安全裕度过大，经济性不高^[48]。因此，现有的两套核安全标准体系都无法直接适用于海洋核动力装备的设计、评审、选址、建造、运行、监管、应急、安保、退役等方面的工作。目前相关单位和部门开展海上小型核动力装置技术研发工作所采用的设计标准多参照陆基核设施的规范标准，不仅影响研发效率还不利于小堆的灵活设计和谱系化发展，亟待基于现有的配套法规和标准体系融合创新出一套适用于民用海洋核动力装备发展和监管的制度体系。

（二）推动海洋核动力装备示范落地的技术策源有待突破

从小堆技术和发展需求角度来看，要以充分发挥其相对大堆的差异化优势为目的，从以下方面开展创新研发：进一步提升部署灵活性以满足特殊环境部署需求；进一步提升安全性以满足完全取消场外应急的需求；进一步提升运行可靠性、经济性、环境兼容性以具备与同等清洁能源竞争的能力。针对小堆在海洋核动力装备上的适用性，亟待突破的共性技术包括：一是抗冲击和高性能燃料技术研发，解决抗冲击和高机动下的小堆芯块和包壳肿胀速率不一致等问题；二是对屏蔽材料、泵阀、电器仪控等设备和材料开展小型化、轻质化、抗腐蚀等性能研究，满足尺寸小、重量轻、耐腐蚀的总体性能需求；三是海洋堆的分析程序开发和验证，需要基于陆基一体化小堆的软件开发，利用专用分析程序对海洋条件下摇摆、倾斜和冲击对反应堆热工水

力现象带来的影响开展适应性研究和开发；四是要对不同设备、管系、材料、平台产生的振动和噪声问题开展技术研究，制定通用的减振降噪设计准则，并研制出各类有效的减振降噪措施和产品。

（三）保障海洋核动力装备发展的相关资源投入分散、协同性差

因国家层面的发展目标和技术路线尚未明确，造成海洋核动力装备的相关技术研发、材料研制、配套设备生产、建造设施等相关行业投入分散且时断时续，不利于形成持续性的基础研究、技术攻关及产业投入。虽然国家相关部委通过设立专项科研经费和研究平台等方式尝试推动相关行业单位开展海洋核动力装备的研发攻关，各参与单位在小堆研发、海洋核动力平台方案设计等方面有所进展，但受制于相关资源投入分散、单位之间信息资源无法共享甚至封闭竞争等因素影响，国内涉核、涉海领域的优势资源并未得到有效整合，举国体制下的协同效应并未得到有效发挥，导致核反应堆与海洋平台的适配性、小堆燃料更换等工程技术问题尚未得到有效攻关。除此之外，推动海洋核动力装备从图纸到示范落地，还面临建造船厂缺乏核设施有关设计、制造和验证条件，核设施单位缺乏船舶和水面有关设计、制造和验证条件，以及缺乏专用维修和停靠码头、发电成本高、目标用户不明确等阻力，而这一系列亟待解决的问题需要通过整合国内涉核、涉海领域的管理部门以及行业资源力量，集中投入，协同推进。

（四）社会公众对海洋核动力装备的接受度低

海洋核动力装备与其他海洋装备相比之所以发展非常缓慢，并非完全受制于技术上的可行性，其关键因素在于社会公众及国家管理部门的可接受度、商业推广的可行性。一是公众通常把潜在的、不可控制的灾难视为核能应用的直观特征，认为核辐射风险要高于其他能源行业，历史上曾发生的三哩岛核事故、切尔诺贝利核事故和福岛核事故更是引起了公众对核电应用的恐惧；二是海洋核动力装备的应用场景和用户不明确，缺乏需求拉动，船东等海洋活动主体对核能安全性始终存有疑虑，担心核辐射、核泄漏等危害的发生，缺乏应用海洋核动力装备的主动性和驱动力；三是对市场投资者而

言，目前海洋核动力装备在投资成本高、无法批量化推广的情况下投资回报难以预期，不存在商业驱动因素和投资的现实条件。

六、我国海洋核动力装备高质量发展建议

我国具有发展海洋核动力装备的现实需求，并且具备核工业和海洋装备制造领域的相关优势基础，目前与国外民用海洋核动力装备之间的发展差距虽存在，但仍有赶超和占领市场份额的机会。亟需针对阻碍海洋核动力装备高质量发展的主要因素，从政策规划、技术攻关、公众认可、行业资源协同、人才培养等层面着手，发挥举国体制优势，加快推动海洋核动力装备示范落地。

（一）明确顶层规划，加快出台与海洋核动力装备发展需求相匹配的法规标准及监管体系

推动海洋核动力装备发展的阻碍因素，相对于技术而言，国家层面的政策导向与相关体制机制问题似乎更难解决。因此，建议面向国家海洋强国战略需求，加快制定海洋核动力装备发展的中长期规划，瞄准为离岸岛礁供电、供热、制淡水，为深远海资源开发装备供能，为沿海城市供电、供热等需求体量较大的应用场景，制定发展路线并推进相关装备平台的示范落地。在技术路线方面，有必要充分吸收借鉴成熟的核动力舰船在法规标准、工程实践、运行维护等方面的发展经验以加快步伐、少走弯路。为解决相关标准规范空白造成的负面影响，应尽快制定与海洋核动力装备发展需求相匹配的安全法规、监管审查机制，以及相关设计、选址和试验、建造、运行等工作推进的管理办法和标准规范。建议国家核安全局等部门协同中国船级社参照现行的陆基核电标准和海洋装备行业规范尽快出台适用于海洋核动力装备建造的标准规范。

（二）以重大示范工程为牵引，加快攻关海洋核动力装备发展面临的安全保障等难点问题

以国家需求为导向，设立重大示范工程是强化海洋核动力装备成果转化、提升海洋核动力装备发展实力的重要举措：一是要针对我国海洋特定需求选定应用场景，设立海洋核动力装备示范工程，引导国内核动力装置设计制造和运行单位参

与建设；二是要就适用小堆的技术策源、船舶与小堆类型的适配性、海洋装备平台与核反应堆衔接的工程技术/安全技术、海洋堆燃料设计等问题做论证分析，寻求有效方案；三是要就海洋核动力装备的进出港口的安全保障、码头停靠、燃料装换、乏燃料处置、放射性污染排放等问题做好配套标准和规范的软实力支撑；四是要全面做好极端海洋环境条件、海上恐怖袭击等突发事件下海洋核动力装备的安全保障与应急救援机制^[49]，开发更高效的放射性废物处理系统。在关键技术方面，针对海洋核动力装备远离大陆且高度集成化和小型化的特点，重点关注其功率密度、安全性、极端环境适用性等问题，强化数字孪生、人工智能技术在装备运行监测、故障诊断方面的应用，如可通过开发耐辐照机器人减少和代替运行人员就地操作的负担。

（三）建立产业发展联盟，促进海洋核动力装备资源信息互通与协同推进

基于我国核工业和海洋装备领域的产业优势基础，打造海洋核动力装备创新高地和出口市场，关键在于抢占先机，及早推动海洋核动力装备工程示范落地。充分发挥举国体制优势，高效协同涉海、涉核领域的优势资源集中攻关。在市场用户尚未明确的情况下，通过政府统筹指导、行业协会和产业联盟协同推进、相关企业和科研院所各有分工的方式加快海洋核动力装备研发攻关，避免各企业院所基于自身需求与投入力度只解决局部问题，造成设备不兼容、信息交互滞后、经济成本增大等影响。除国内相关单位协同推进自主研发之外，还可通过寻求与俄罗斯等国的技术合作加速研发示范。在国家层面出台相关规划之前，地方政府可结合本地需求，从项目推进模式上进行创新和突破，联合相关企业单位自下而上先行开展海洋核动力装备发展的资本投入筹集、应用场景论证、研发设计、反应堆系统和核动力平台建造选址等工作。

（四）加强宣传教育，深化公众对海洋核动力装备应用的安全认知并做好复合型人才的培养与储备工作

为消除社会公众、潜在用户对海洋核动力装备应用的安全顾虑，涉海、涉核领域的管理机构 and 科

研院所应积极回应公众“谈核色变”的安全诉求，引导公众科学理性地看待核工业及其科技创新发展。可通过设立“国家核安全日”的形式向社会公众传达国家高度重视核安全并全力确保核安全的正面信号，逐渐提升公众核安全认知；推动核安全科普与全国科普宣传网络体系的良性对接，提高核安全网络宣传效率和影响力。人才培养与储备是保障海洋核动力装备高质量发展的重要基础。受专业学科所限，目前现状往往是懂核的人不懂船、懂船的人不懂核，无法满足海洋核动力装备发展需求，亟待建立既懂核又懂船的复合型人才培养机制。建议研究制定涉核、涉海专业的复合型创新人才培养方案，采用“政产学研”协同模式，将涉海、涉核领域的政府管理部门、企业、高校、科研院所等有生力量协同起来，共商共建人才培养模式，通过产教融合方式，培养一批既懂核技术又懂海洋装备的专业人才，填补人才需求缺口。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 10, 2023; **Revised date:** May 8, 2023

Corresponding author: Liu Cungen is a professor from Shanghai Jiao Tong University. His major research field is design and construction of ships and marine projects. E-mail: cgliu@sjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Development Strategy of China’s Marine Equipment Industry Chain” (2022-XBZD-01) and “Development Strategy of Marine Equipment Engineering Technology in the Next 20 Years” (2021-XBZD-13-5)

参考文献

- [1] 董海防. 海洋核动力平台发展研究综述 [J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 5-10.
Dong H F. A review on the development of marine nuclear power platforms [J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(11): 5-10.
- [2] 韩杰, 王伟宁, 方慧聪, 等. 海洋核动力平台专利技术发展态势分析 [J]. 科学观察, 2020, 15(4): 1-11.
Han J, Wang W N, Fang H C, et al. Analysis on the development trend of patented technology of marine nuclear power platform [J]. *Scientific Observation*, 2020, 15(4): 1-11.
- [3] 李健, 张倬, 王克成, 等. 我国海上核动力平台建造能力的发展布局探索 [J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(9): 222-223.
Li J, Zhang Z, Wang K C, et al. Exploration on the development layout of my country’s offshore nuclear power platform construction capabilities [J]. *Industry and Technology Forum*, 2018, 17(9): 222-223.
- [4] 伍赛特. 核动力装置应用于民用商船的可行性分析研究 [J]. 中国水运, 2018, 18(10): 97-98.
Wu S T. Feasibility analysis and research of nuclear power device applied to civil merchant ships [J]. *China Water Transport*, 2018, 18(10): 97-98.

- [5] 胡可一. 开展民用核动力船舶前瞻性研究 [J]. 中国水运, 2011 (3): 10.
Hu K Y. Carrying out forward-looking research on civil nuclear-powered ships [J]. China Water Transport, 2011(3): 10.
- [6] 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. Development status of nuclear powered ships and floating reactors [J]. Ship Engineering, 2019, 41(11): 11–21.
- [7] 赵洪冉, 赵智萍. 核动力在民用船舶上的应用 [J]. 中国水运, 2014, 14(9): 8–10.
Zhao H R, Zhao Z P. Application of nuclear power on civil ships [J]. China Water Transport, 2014, 14(9): 8–10.
- [8] 张力, 刘宙锋, 丁伯才, 等. 海洋核动力平台电力系统设计概要 [J]. 船电技术, 2017, 37(11): 36–37.
Zhang L, Liu Z F, Ding B C, et al. Outline of power system design for offshore nuclear power platform [J]. Ship Power Technology, 2017, 37(11): 36–37.
- [9] 万蕾, 李桂勇, 芮旻, 等. 海上小型堆浮动核电站监管模式探究 [C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷). 北京: 中国原子能出版社, 2017: 234–240.
Wan L, Li G Y, Rui M, et al. Research on the supervision mode of offshore small reactor floating nuclear power plant [C]//Chinese Nuclear Society. China Nuclear Science and Technology Progress Report (volume V). Beijing: China Atomic Energy Press, 2017: 234–240.
- [10] 李海, 袁安民, 廖毅, 等. 海洋小型核电站安全标准体系建设初步研究 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(20): 67–70.
Li H, Yuan A M, Liao Y, et al. Preliminary research on the construction of safety standard system for marine small nuclear power plants [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(20): 67–70.
- [11] 马强, 石磊, 陈慧玲, 等. 涉核建造安全保障标准规范在船舶行业的应用浅析 [J]. 船舶标准化与质量, 2018 (3): 2–9.
Ma Q, Shi L, Chen H L, et al. Analysis on the application of nuclear-related construction safety assurance standards and regulations in the shipbuilding industry [J]. Ship Standardization and Quality, 2018 (3): 2–9.
- [12] 于红. 核动力船舶应急准备与响应关键技术研究 [J]. 核动力工程, 2015, 36(6): 105–108.
Yu H. Research on key technologies of nuclear power ship emergency preparedness and response [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(6): 105–108.
- [13] 邹树梁, 葛馨, 黄燕. 海上浮动核电站发展现状及政策标准 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(19): 80–83, 93.
Zou S L, Ge X, Huang Y. Development status and policy standards of offshore floating nuclear power plants [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(19): 80–83, 93.
- [14] 邹树梁, 姜艳, 黄燕. 基于灰色网络分析法的海上浮核电站项目风险评价研究 [J]. 南华大学学报, 2020, 21(5): 1–9.
Zou S L, Jiang Y, Huang Y. Research on risk assessment of offshore floating nuclear power plant project based on gray network analysis [J]. Journal of Nanhua University, 2020, 21(5): 1–9.
- [15] 郭翔, 孔凡富, 朱成华, 等. 浮动核电站设计中的安全准则研究 [J]. 核动力工程, 2021, 42(4): 244–249.
Guo X, Kong F F, Zhu C H, et al. Research on safety criteria in design of floating nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(4): 244–249.
- [16] 张文杰, 王艳婷, 娄亚娟. 海洋核动力平台设计采用标准初探 [J]. 核标准计量与质量, 2018 (3): 11–15.
Zhang W J, Wang Y T, Lou Y J. Preliminary study on standards adopted in the design of marine nuclear power platforms [J]. Nuclear Standard Metrology and Quality, 2018 (3): 11–15.
- [17] 程琳. 小型核反应堆供电在海洋工程领域的应用前景 [J]. 中国海洋平台, 2018, 33(6): 1–5.
Cheng L. The application prospect of small nuclear reactor power supply in the field of ocean engineering [J]. China Offshore Platform, 2018, 33(6): 1–5.
- [18] Koen H. Nuclear reactors for marine propulsion and power generation systems [EB/OL] (2022-07-06)[2023-03-14]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:fb44c464-6936-4ec6-96b1-52333ff799e3>.
- [19] Small Modular Reactors Ad-hoc Group, Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group, World Nuclear Association. Facilitating international licensing of small modular reactors [R]. London: Nuclear Associations, 2015.
- [20] Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Co-operation and Development. Small modular reactors: Challenges and opportunities [R]. Paris: Nuclear Energy Agency, 2021.
- [21] 董海防. 海洋核动力平台——核动力系统与核安全文化 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018.
Dong H F. Marine nuclear power platform—Nuclear power system and nuclear safety culture [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018.
- [22] International Atomic Energy Agency. Advances in small modular reactor technology developments [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020.
- [23] 张亚军, 贾海军. 核能海水淡化及山东核能海水淡化厂研究进展 [R]. 杭州: 中国海水淡化与水再利用学会, 2006.
Zhang Y J, Jia H J. Research progress of nuclear energy desalination and Shandong nuclear energy desalination plant [R]. Hangzhou: Chinese Society of Seawater Desalination and Water Reuse, 2006.
- [24] Russian navy receives 1st submarine carrying nuclear-powered drones [EB/OL]. (2022-07-09)[2023-04-18]. <http://en.people.cn/n3/2022/0709/c90000-10121039.html>.
- [25] Fleet Ballistic Missile Submarines - SSBN [EB/OL]. (2021-05-25)[2023-05-21]. <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2169580/fleet-ballistic-missile-submarines-ssbn/>.
- [26] Aircraft Carriers-CVN [EB/OL]. (2021-11-12)[2023-03-28]. <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2169795/aircraft-carriers-cvn/>.
- [27] Nuclear-powered icebreaker [EB/OL]. (2023-03-13)[2023-04-18]. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear-powered_icebreaker.
- [28] Tyler Olson. Break the ice: Trump ramping up US presence in the Arctic as Russia, China threats loom [EB/OL]. (2020-08-03)[2023-04-11]. <https://www.foxnews.com/politics/trump-us-arctic-russia-china>.
- [29] 浮动核电站: 是未来还是“梦魇” [EB/OL]. (2019-07-22)[2023-04-18]. <https://www.cnnpn.cn/article/16700.html>.
Floating nuclear power plants: the future or a “nightmare” [EB/OL]. (2019-07-22)[2023-04-18]. <https://www.cnnpn.cn/article/16700.html>.
- [30] Nuclear Power in Russia [EB/OL]. (2021-12)[2023-05-19]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>.
- [31] 于俊崇. 船用核动力 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
Yu J C. Marine nuclear power [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020.
- [32] 孙雷, 罗贤成, 姜胜超, 等. 适用于渤海海域浮式核电平台水动力特性研究基础与展望 [J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 19–27.

- Sun L, Luo X C, Jiang S C, et al. Research basis and prospect of hydrodynamic characteristics of floating nuclear power platform in Bohai Sea [J]. *Equipment Environment Engineering*, 2018, 15 (4): 19–27.
- [33] 肖钢, 马强. 海上核能利用与展望 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
- Xiao G, Ma Q. Utilization and prospect of offshore nuclear energy [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.
- [34] International Maritime Organization. Fourth IMO GHG study 2020 [R]. London: International Maritime Organization, 2021.
- [35] International Maritime Organization. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [R]. London: International Maritime Organization, 2018.
- [36] 浙江省人民政府. 浙江省人民政府关于印发浙江省重要海岛开发利用与保护规划的通知 [EB/OL]. (2012-07-14)[2023-04-18]. https://www.zj.gov.cn/art/2012/7/14/art_1229019364_63357.html.
- People's Government of Zhejiang Province. Notice of the People's Government of Zhejiang Province on printing and distributing planning for the development, utilization and protection of important sea islands in Zhejiang Province [EB/OL]. (2012-07-14)[2023-04-18]. https://www.zj.gov.cn/art/2012/7/14/art_1229019364_63357.html.
- [37] 中华人民共和国中央人民政府. 政府工作报告——2021年3月5日在第十三届全国人民代表大会第四次会议上 [EB/OL]. (2021-03-12)[2023-04-18]. http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content_5592671.htm.
- Central People's Government of the People's Republic of China. Government Work Report—At the Fourth Session of the Thirteenth National People's Congress on March 5, 2021 [EB/OL]. (2021-03-12)[2023-04-18]. http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content_5592671.htm.
- [38] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26)[2023-04-18]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- The State Council of the People's Republic of China. Central People's Government. Notice of the State Council on printing and distributing the action plan for carbon peaking by 2030 [EB/OL]. (2021-10-26)[2023-04-18]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [39] 中华人民共和国生态环境部. 国务院批准实施《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标》 [EB/OL]. (2017-03-23)[2023-04-18]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201703/t20170323_408677.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The State Council approved the implementation of the 13th Five-Year Plan for Nuclear Safety and Radioactive Pollution Prevention and Control and 2025 Long-term Goals [EB/OL]. (2017-03-23) [2023-04-18]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201703/t20170323_408677.htm.
- [40] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 国新办解读《中国的核应急》白皮书发布会内容要点 [EB/OL]. (2016-01-27)[2023-04-18]. <http://www.scio.gov.cn/wz/Document/1466590/1466590.htm>.
- The State Council Information Office of the People's Republic of China. The Information Office of the State Council interpret the key points of the white paper conference on *China's nuclear emergency response* [EB/OL]. (2016-01-27)[2023-04-18]. <http://www.scio.gov.cn/wz/Document/1466590/1466590.htm>.
- [41] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《小型压水堆核动力厂安全审评原则(试行)》的通知 [EB/OL]. (2016-01-05)[2023-04-18]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201601/t20160111_324674.htm.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on printing and distributing the *Principles for safety review of small pressurized water reactor nuclear power plants (trial)* [EB/OL]. (2016-01-05) [2023-04-18]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201601/t20160111_324674.htm.
- [42] 国家国防科技工业局. 国防科工局副局长王毅韧谈“十三五”核工业新亮点 [EB/OL]. (2017-02-15)[2023-04-18]. <http://www.sastind.gov.cn/n112/n117/c6778658/content.html>.
- National Defense Science, Technology and Industry Bureau. Wang Yiren, deputy director of the National Defense Science and Technology Bureau, talks about the new highlights of the “3th Five-Year” nuclear industry [EB/OL]. (2017-02-15)[2023-04-18]. <http://www.sastind.gov.cn/n112/n117/c6778658/content.html>.
- [43] 林一平, 陈玲玲. 建造浮动式核电站势在必行 [J]. *交通与运输*, 2017, 33(1): 53–55.
- Lin Y P, Chen L L. It is imperative to build a floating nuclear power plant group [J]. *Traffic and Transportation*, 2017, 33(1): 53–55.
- [44] 中国广核集团. 中广核海上小型堆ACPR50S正式立项, 预计2017年启动示范项目 [EB/OL]. (2016-01-12)[2023-04-18]. http://www.cgnpc.com.cn/cgn/c101535/2017-10/24/content_3a7556f60e394a9d8a0fae107b5580c3.shtml.
- China General Nuclear Power Corporation. CGN nuclear power offshore small reactor ACPR50S has officially approved the project, and it is expected to start demonstration project construction in 2017 [EB/OL]. (2016-01-12)[2023-04-18]. https://www.cgnpc.com.cn/cgn/c101535/2017-10/24/content_3a7556f60e394a9d8a0fae107b5580c3.shtml.
- [45] 国家发展和改革委员会. 全国首个国家海洋核动力研发中心落户湖北 [EB/OL]. (2014-10-14)[2023-04-18]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201410/t20141014_1054678.html.
- National Development and Reform Commission. The Country's first national marine nuclear power research and development center settled in Hubei [EB/OL]. (2014-10-14)[2023-04-18]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dqs/sjdt/201410/t20141014_1054678.html.
- [46] 黄聪, 陈妮希. 中国首个海洋核动力平台“湖北造” [EB/OL]. (2016-03-04)[2023-02-22]. <https://power.in-en.com/html/power-2254010.shtml>.
- Huang C, Chen N X. China's first offshore nuclear power platform “Made in Hubei” [EB/OL]. (2016-03-04)[2023-02-22]. <https://power.in-en.com/html/power-2254010.shtml>.
- [47] 中国广核集团. 中广核在运核电机组完成47项安全改进 [EB/OL]. (2016-03-11)[2023-05-13]. http://www.cgnpc.com.cn/cgn/c101044/2016-03/11/content_f0ab08c47924468483ab4c84ce4396f7.shtml.
- China General Nuclear Power Corporation. China General Nuclear power corporation has completed 47 safety improvements at its nuclear power units [EB/OL]. (2016-03-11)[2023-05-13]. http://www.cgnpc.com.cn/cgn/c101044/2016-03/11/content_f0ab08c47924468483ab4c84ce4396f7.shtml.
- [48] 中国科学院核能安全技术研究所. 中国核能安全技术发展蓝皮书 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences. Blue book on China's nuclear energy safety technology development [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [49] 吕松泽, 刘洪君, 蔡琦, 等. 海洋核动力平台核安全监督初探 [J]. *科技创新导报*, 2016, 13(34): 46–48.
- Lyu S Z, Liu H J, Cai Q, et al. Preliminary study on nuclear safety supervision of marine nuclear power platform [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(34): 46–48.