

我国海上浮动核电站的核安全问题及建议

王琮^{1,2}, 于雷^{1*}, 叶水生²

1. 海军工程大学核科学技术学院, 武汉 430033

2. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064

摘要 介绍了国外民用核动力船舶的发展情况,探讨了我国发展海上浮动核电站研发过程中可能面临的法规和标准、核安全目标、核应急计划以及海洋环境条件等核安全问题,以及我国海上浮动核电站发展过程中关键技术、设备生产、总体建造等环节的攻关情况;并提出了保证和提高海上浮动核电站核安全水平的若干建议。基于军转民路线,将我国成熟的舰艇核动力技术应用到海上浮动核电站上是现实可行的方案,通过借鉴相关核动力工程经验、引进陆上核电站先进技术,可使海上浮动核电站的核安全得到有效保障和提高。

关键词 海洋资源开发;能源供给;海上浮动核电站;核安全

21世纪是海洋的世纪,向海洋要资源、要空间,已经成为世界各国的共同选择。党的十八大以来,习近平总书记高度重视我国海洋事业的发展,发表了一系列重要论述,并首次将“建设海洋强国”上升为国家战略,党的十九大报告又进一步明确了“坚持陆海统筹,加快建设海洋强国”的目标,建设海洋强国已然成为中国特色社会主义事业的重要组成部分,成为实现中华民族伟大复兴“中国梦”的必然选择。然而在建设海洋强国、发展海洋经济、维护海洋权益等过程中,均离不开能源的供给。随着海洋开发力度的加大,其所需油气的年消耗量将

超过1000万 m^3 ,油气燃烧后的污染物将会对海洋环境造成负面影响,并间接危及人们的健康。追求人类与生存环境的共同进化是中国特色社会主义生态文明观的价值取向,“绿水青山就是金山银山”。因此,我国在建设海洋强国的过程中,更应提早布局合理的能源保障形式,尽量减少建设和开发过程中可能对海洋环境造成的污染。

海上浮动核电站的特点决定了它是海上能源供应的最佳选择。首先,它一次装料能持续运行1~2 a,可降低燃料补给所产生的运输成本;其次,它功率密度大,1 kg可裂变铀完全分解所产生的能

收稿日期:2018-12-30;修回日期:2021-07-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0307800/06)

作者简介:王琮,高级工程师,研究方向为核能科学与工程,电子信箱:wangcong_484@163.com;于雷(通信作者),教授,研究方向为核能科学与工程、船舶核动力装置,电子信箱:yulei301@163.com

引用格式:王琮,于雷,叶水生.我国海上浮动核电站的核安全问题及建议[J].科技导报,2022,40(4):16-22;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.04.002

量,大约相当于2800 t优质煤,或者2100 t燃油充分燃烧后所产生的能量,是目前能替换石化发电的最佳能源;同时,它十分环保,在其正常运行期间,核裂变过程可不对外界环境排放任何有害物质。因此,海上浮动核电站被国际原子能机构列为鼓励发展的新方向,俄罗斯、法国等核电技术先进国家也均在积极开展海上浮动核电站的研制工作^[1-2]。中国的能源科技创新“十三五”规划也将中船重工集团、中核集团和中广核集团等单位申报的海上浮小堆项目纳入其中^[3]。

与传统的化石能源相比,核能具有清洁、高效、经济等诸多优点,但也存在一定概率向环境释放放射性物质。而且与成熟的陆上核电站相比,其在设计、建造、运行等方面还存在一些差异,更应重视其研制过程中所可能面临的核安全问题。介绍国外海上民用核动力船舶的发展情况,并根据其所具有的核安全特点,结合我国海上浮动核电站研制情况,探讨其核安全设计过程中可能存在的法规标准、核安全目标选取、核应急计划制定、海洋环境条件等方面所面临的问题,并提出我国海上浮动核电站的发展建议。

1 国外民用核动力船舶发展情况

1954年美国核潜艇鸚鵡螺号的竣工服役,让人们看到了将核动力技术应用于船舶推进所具有的诸多优点。同年,时任美国总统艾森豪威尔发表了关于和平利用核能的构想,其中就提出了建造核动力商船的议案。1958年,美国萨瓦娜号核动力商船在纽约造船厂建造,并于1962年投入使用。在这之后,前苏联、日本、德国等国也陆续开展了民用核动力船舶的研究工作,主要包括前苏联的列宁号、日本陆奥号、德国奥托汉号等。至今,俄罗斯始终维持着一支核动力破冰船队,用于北冰洋航线。世界各国民用核动力船舶建造、运行和退役情况如图1所示。

1.1 美国萨瓦娜号(Savannah)客货船

该船的总吨位为13599 t,全长181.5 m,宽23.8 m,航速23节,反应堆功率80 MW,推进功率

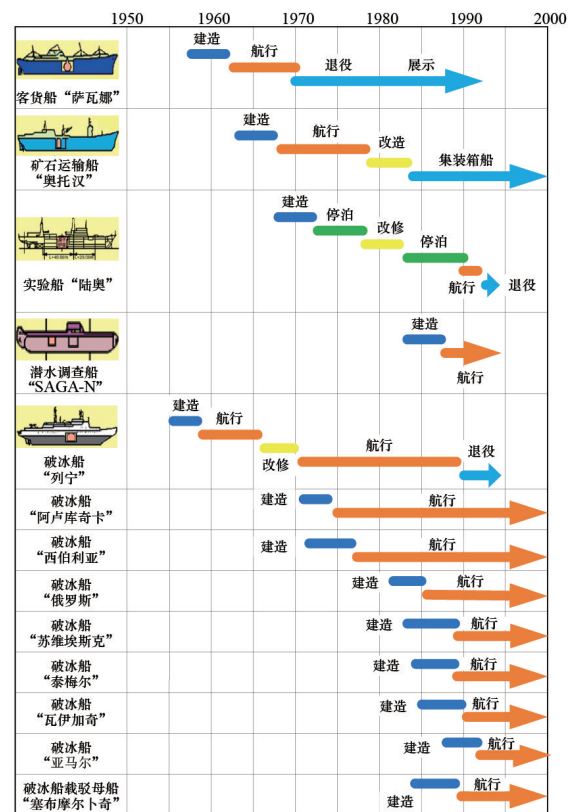


图1 世界各国民用核动力船舶概况

22000 马力,作为客货船可载60名乘客和14040 t载货重量,3年半时间里可不需要燃料补给。该船的建造费为4690万美元,其中2830万美元是核动力装置的费用。美国核动力客货船萨瓦娜号(图2),自1962年5月建成以来,共进出过12个国内港口,1964年5月进入国际航线,并曾在欧洲14个国家的16个港口停靠,到1965年8月改为货船投入航行,在政府的财政支持下,营运于欧洲航线。1976年6月,还首次到达韩国、菲律宾等地区。1968年9月换料后,继续商业运营,最终于1970年宣布退役^[4-5],8年共航行超过450000海里,未发生



图2 萨瓦娜号核动力商船

燃料失效或蒸汽发生器泄漏事故,成功向人们展示了核能作为民用船舶动力的良好前景。

1.2 德国奥托哈恩号(Otto·Hahn)矿沙船

联邦德国从1960年开始研制核动力船舶,并于1968年建成核动力矿砂运输船奥托哈恩号^[6]。该船全长172 m、宽23.4 m、排水量25790 t、总吨位为15000 t、反应堆功率38 MW、航速15.8节、船员63名,另外可搭乘35名研究人员。该船建造完成后,经过2年时间的航海试验,获得大量有关船舶核动力装置运行性能和可行性资料。1970年2月开始投入商业航运,运输包括摩洛哥的磷矿石、伊朗的铬矿石、阿根廷的谷物等货物,共停泊了22个国家的33个港口,直至1979年2月停运。在10年的世界范围航运过程中,共航行了650000多海里,使用了两炉燃料,证明该型船用核动力装置设计和运行是成功的,在航期期间未出现过事故停堆的情况,其安全性、机动性及海上运行性能均表现良好。

1.3 日本陆奥号(Mutsu)货船

1963年由政府和民间共同出资成立了核动力船舶研发团队,并于1968年开始建造具备货运和试验用途的核动力船舶陆奥号。陆奥号核动力商船(图3)于1972年建成,该船全长130.5 m、宽19 m、排水量10383 t、反应堆功率36 MW、航速17节。由于屏蔽设计和检验问题,导致其在运行初期就在顶部屏蔽部位发生了放射性泄漏事件,导致后期该型反应堆从未满功率运行,只能作为海洋考察船运行^[7-8]。



图3 陆奥号核动力商船

1.4 俄罗斯罗蒙诺索夫号(Lomonosov)浮动核电站

俄罗斯由于地广人稀,非常重视可移动的小功

率核电站技术研究,并于20世纪提出了几十个小功率浮动核电站方案。例如1956年俄罗斯就开始研制的功率为1500 KW的TЭC-3型演示性小功率移动电站,到1994年设计开发了KLT-40S型反应堆浮动发电装置,并利用该装置建造了世界首座浮动核电站,命名为罗蒙诺索夫号(图4),其最大长度122.5 m、最大宽度20 m、至上甲板的舷高10 m,最大吃水4.5 m,空载排水量9250 t,满载排水量10000 t^[9-10],并于2019年交付使用。



图4 罗蒙诺索夫号浮动核电站

1.5 近期发展

除了上述已经建成运行或正在建设的民用核动力船舶,随着各国对海洋权益维护和海洋资源开发重视程度不断提高。近年来,各国也在积极的开展新型民用核动力船舶以及浮动核电站的研制工作,较为典型的包括法国Flexblue全潜水式核电站、美国的固定式海洋核电站(图5)等。俄罗斯也计划建造8座海上浮动核电站,主要用于滨海城市供电、供热和海水淡化。

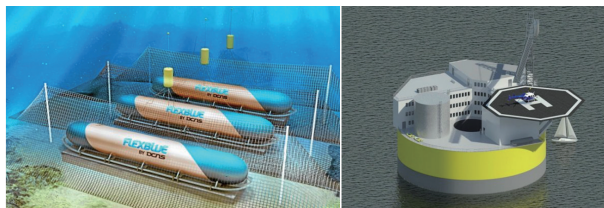


图5 新型小型核动力模块

2 海上浮动核电站的核安全特点

海上浮动核电站是利用核能进行发电的海上移动能源供给平台,是核技术与船舶工程技术的有

机结合,既可在海面固定漂浮,又可以借助拖船或自带的推进装置在海上移动,可在不同海域为用户供给电力、热能及淡水等资源,虽然国内外均有海上核设施的研发经验,但是与成熟的陆上核电站相比,海上核设施受海洋环境条件影响,又长期处于“孤岛”运行状态,其核安全呈现出一些新的特点,主要有以下4个方面。

1) 环境条件苛刻。海洋环境:包括摇摆、升沉以及海生物等;舱内环境:湿、热、霉菌、盐雾、振动以及核辐射等;外部冲击:直升机爆炸、船舶碰撞、恐怖袭击以及石油开采平台爆炸等。

2) 运行工况多变。由于海洋资源开发配套的电网容量较小,电力需求波动较大,导致海上浮动核电站运行工况变化频繁,系统参数变化幅度大、频率高。

3) 内部空间狭小。船舶平台与陆上核电站相比,对设备体积和重量均有较为严格的限制,在有限的空间内,难以同陆上核电站一样全面保障专设安全设施的多重性、多样性、独立性要求,容易产生共因故障。

4) 远离大陆运行。长期处于远海“孤岛”运行状态,外部支援和人员疏散困难;受到舱室内空间和重量的限制,可携带的保障和应急资源有限。

通过对国内外浮动核电站的核安全设计情况的初步调研,为了应对海洋条件下应用所面临的核安全问题,在核安全设计上可以归纳得到以下特点:在堆芯设计上,一般采用低浓铀棒形元件,采用十字形控制棒,堆芯体积尽量小;在系统设计上,系统尽量简化,布置简单,共用系统;在专设安全设施方面,充分利用海水,尽量考虑非能动安全技术;在设计基准方面,不仅考虑设计基准事故,也须兼顾严重事故的影响。

3 中国发展海上浮动核电站的核安全问题探讨

由于上述种种限制,使得海上浮动核电站的核安全设计无法完全“照搬”陆上核电站的设计要求和科研成果,特别是在法规标准、核安全目标选取

以及应急计划的制定等方面,均需要重新探讨,甚至有所突破。

3.1 法规和标准问题

海上浮动核电站的安全问题,不仅涉及到反应堆的安全,也涉及到船舶的安全,两者相互耦合,密不可分。因此,国外相关的法规标准不仅包含原子能机构的要求,也包括海事组织的规定^[11]。1960年6月,国际海上人命安全条约(SOLAS)中增加了有关核动力船舶的相关条款,并在其2009年最新版的条约中进一步明确了对核动力船舶的辐射安全、设备鉴定、运行和事故规程等做了原则性要求^[12];1961年,日本运输省也开展了核动力船安全标准的建立工作^[13]。1968年,IAEA发布了安全系列第27号报告《核商船在停泊和航行过程中的安全考虑》^[14]。1979年,政府间海事协商组织船舶设计和装备分会第20次会议将核商船安全规范作为专项议题进行讨论,最终形成具有指导意义的《核商船安全规范》^[15]等。以上法规和标准对于我国海上浮动核电站的核安全设计工作具有很好的借鉴意义,但是这些法规和标准出自不同的国家、不同的组织,就需要我国海上浮动核电站的研发团队进行“量体裁衣”的选用标准。由于目前仅有美国和俄罗斯成功的运行过海上浮动核电站,本文对其核安全设计的法规和标准应用情况进行初步的调研。

美国在其陆军核动力计划ANPP(Army Nuclear Power Program)中开发了多个小型反应堆^[16],其中MH-1A型反应堆被装备在一艘改造的驳船上,命名为“STURGIS”,是世界首座浮动式核电站。美国在设计海上浮动核电站时遵循国际公约、国际组织标准、美国船级社标准和美国核管会的标准,并没有编制独立的标准^[17]。

俄罗斯在建的海上浮动核电站是以核动力破冰船成熟的核动力装置为基础,其设计除了遵循国际相关公约^[12],还专门制定了设计标准,其中包括俄罗斯船级社于2012年发布的《核动力船舶和浮动设施的分级和建造规范》^[18],以及俄罗斯核安全监管局颁布的相关法规8项^[19],导则7项^[20]。

中国海上浮动核电站,从其用途来看属于民用核设施,应该参照现行民用核设施的设计标准;从

其使用环境上来看,与目前军用核动力装置的情况更为相似。但是中国现有的民用和军用两套标准体系都无法完全适用于海上浮动核电站核安全的设计与评审工作,民用核安全标准体系没有考虑海洋环境条件的内容,军用核安全标准的安全裕量过大,经济性不高。因此,有必要组织有经验的相关设计单位综合现有的2套核安全标准系统,梳理、整合并建立适用于中国海上浮动核电站的核安全标准体系。

3.2 核安全目标的选取

与传统能源相比,核能具有清洁、经济等诸多优点,但也存在一定概率向环境释放放射性物质。与很多工程一样,人们需要在收益与风险的矛盾之间选择一个平衡点,如果这个平衡点存在,则该项目可行。对于核能来说,协调矛盾的过程就是解答“多安全算是安全”的过程,而这个平衡点就是所谓的核电安全目标。

中国核安全局发布的《核动力厂设计安全规定》^[21]以及《核动力厂安全评价与验证》^[22]对陆上核电站总的核安全目标和定量核安全目标有明确规定。其中定量安全目标对于运行核电站堆芯损坏频率的目标是:对于已有的核动力厂为 10^{-4} /(堆·年),对于新建的核动力厂为 10^{-5} /(堆·年)。但是由于海上浮动核电站远离大陆,厂址环境条件、辐射对环境和公众的影响等与陆上核电站区别较大,其周围并没有居民,其放射性物质释放对公众的影响十分有限。因此,海上浮动核电站的定量核安全目标如何确定有待进一步研究,相关事故验收准则也有待进一步探讨。

3.3 核应急计划的制定

海上浮动核电站运行区域远离大陆,且长期处于漂浮可移动的状态,运行时远离人口聚居区,但是可能会临近海上工业、渔业以及航线,与陆上核电站相比,其核应急方面需关注以下差异^[23]:浮动核电站所处位置可能邻近多个省份海岸线,现行地方政府主管的情况不适用;陆上核电站要求应急控制中心、运行支持中心等设施应与主控室分离,且保证应急人员顺利抵达,浮动核电站远离大陆,对于人员撤离、补给物资输送、应急人员抵达等均较

为困难;通讯和监测困难,作为移动核设施,难以在周围海域布置辐射监测设备;海上核设施还需考虑蛙人、船舶碰撞等海上特有的安保风险。

3.4 海洋环境条件的影响

核动力装置在海洋环境条件中,会受到海洋条件以及自身动作等因素的影响,并产生一系列运动,这些运动对核动力装置主要产生两方面的影响。一方面导致系统空间位置的周期性改变,并引入周期性变化的附加惯性力场^[11]。这些因素直接影响介质的水力和传热特性,进而影响反应堆物理特性,最终对系统运行造成影响;另一方面,海洋环境盐雾、霉菌以及海生物等对系统管路和设备造成腐蚀、海生物附着等现象,导致管道损坏以及换热性能下降等不利影响,而且海洋环境条件的影响具有强烈的多因素耦合以及非线性特征^[24]。因此,陆上核电站所确定的设计基准事故,其事故进程在耦合了海洋环境条件后,会发生不同程度的改变。有必要针对海上浮动核电站的设计基准事故进行研究,在充分考虑海洋环境条件的影响下,评价并改进有关关键安全措施的设计。

4 中国海上浮动核电站的发展思路

4.1 中国海上浮动核电站发展情况

1) 关键技术攻关。为了突破海上浮动核电站关键技术,从2011年起,国家先后发布了863计划“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”、国家重点研发计划“海洋核动力平台技术、装备研制及示范应用”等科研任务,并成立了“国家能源海洋核动力平台研发(实验)中心”开展海上浮动核电站关键技术的研究和攻关工作,为海上浮动核电站研制工作奠定了技术基础。

2) 关键装备制造。从1974年8月中国第一艘核潜艇入列^[25],到1991年中国首台商业核电站投运^[26],经过不断的探索、发展和创新,中国已经全面掌握了核能利用技术,并具备自主研发能力。相关装备的制造也基本实现国产化,并逐步形成设计服务、设备成套、总装建造的完整产业链,可为海上浮

动核电站项目的装备制造提供可靠的设备保障条件。

3) 平台总装建造。中国已有如渤海船舶重工、大连船舶重工、江南造船厂等一批具备 30 万 t 以上造船能力的国有大型船厂。海上浮动核电站排水量仅约 1 万~3 万 t, 国内各大型船厂的船舶建造设施可满足海上浮动核电站的建造要求。

4.2 中国海上浮动核电站发展思路

核安全是全面推广浮动核电站工程应用的基础, 只有在核安全得到有效保障的前提下, 才能消除公众对浮动核电站辐射安全的顾虑, 示范工程才能被人们接受。为提高海上浮动核电站核安全水平, 确保示范工程顺利实施, 提出如下发展思路。

1) 应用成熟舰船核动力技术。美国、俄罗斯等国家民用核动力船舶的发展, 主要采用“军转民”路线, 依托成熟的军用舰船核动力技术, 此举能有效缩短研制周期, 减少技术风险。中国军用舰艇核动力技术经过 40 多年的发展, 经历了陆上模式堆、航海试验、运行、维修、退役等全过程验证, 形成了成熟的设计服务、生产配套、总装建造等产业链, 培养了一支雄厚的核动力舰船研发和运行维护专业团队, 积累了丰富的工程实践经验。因此, 将中国成熟的核动力舰艇技术应用到海上浮动核电站是最为现实和可行的方案。采用“军转民”的技术路线, 是确保海上浮动核电站示范工程快速和顺利实施的保障。

2) 借鉴相关核动力工程经验。从 20 世纪 50 年代起, 美国、前苏联、德国、日本等国家, 针对民用核动力船舶开展了大量研究工作, 建造了多艘核动力船舶, 并积累了丰富的运行经验。俄罗斯至今还维持着一支核动力破冰船船队用于北冰洋航线。近年来, 小型反应堆因其安全性高, 适应性强, 布局灵活等特点而广受关注, 各国也提出了一系列先进型小堆设计方案, 比较有代表性的有 mPower、NuScale、Westinghouse-SMR、IRIS、SMART 等, 其在继承了早期反应堆的设计经验基础上, 应用了许多新技术和新理念, 提高了固有安全性^[27]。充分调研和掌握国外相关核动力工程经验, 可为浮动核电站核安全水平的提高提供有力支撑。

3) 引进陆上核电站先进技术。中国商用核电站经过 20 多年的发展, 历经“引进、消化、吸收和再创新”等过程, 形成了以“华龙一号”、CAP1400 等具有自主知识产权的三代核电技术, 以及高温气冷堆、钠冷快堆等四代核电技术, 并提出了能动与非能动安全相结合等先进理念。通过参考和引入陆上先进核电站的工程经验, 是使浮动核电站核安全水平得到进一步提高的有效途径。

5 结论

海上浮动核电站工程的研制在我国尚属首次, 采用“军转民”路线, 应用成熟的核动力舰船技术, 开展海上浮动核电站研究工作, 形成具有自主知识产权的核心技术, 实现海上核电零的突破, 对我国海洋权益维护、海洋资源开发、节能减排、核能应用领域开拓等均具有巨大的意义。虽然海上浮动核电站在核安全法规标准、核安全目标、核应急计划、海洋环境条件影响等方面依然存在部分值得研究和探讨的问题, 但是总的来说, 基于军转民路线的我国海上浮动核电站的核安全是有保障的。通过借鉴相关核动力工程经验、引进陆上核电站先进技术, 可使海上浮动核电站的核安全得到进一步的提高。

参考文献 (References)

- [1] International Atomic Energy Agency. Status of small and medium sized reactor designs: A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information Systems (ARIS)[R]. Vienna: IAEA, 2012.
- [2] Subki M H. IAEA programmes on small and medium-sized reactors[C]//The 16th INPRO Steering Committee Meeting. Vienna: IAEA, 2010: 17-19.
- [3] 谭思超. 关于海上浮动堆安审关键问题的若干思考[C]//第一届全国小型堆安全监管研讨会会议论文集. 武汉: 环境保护部核与辐射安全中心, 2016: 5-9.
- [4] U S. Atomic Energy Commission. Nuclear power and merchant shipping[R]. Washington DC: AEC, 1964.
- [5] 张丹, 邱志方. 海洋民用核动力安全设计综述[C]//第一届全国小型堆安全监管研讨会会议论文集. 武汉: 环境

- 保护部核与辐射安全中心, 2016: 231-240.
- [6] 汪胜国. 世界核动力船研究开发的现状[J]. 国外核动力, 2008(5): 1-10.
- [7] 刘建阁, 陈雄盛, 龚自力, 等. 核商船的工程发展历史和经验综述[C]//第十五届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室学术年会论文集. 荣成: 中国核学会, 2016: 18-24.
- [8] 刘征宇. 核动力商船的发展前景[J]. 海运情报, 2008(10): 26-27.
- [9] 张炎, 伍浩松. 俄罗斯KLT-40型浮动式核电厂[J]. 国外核新闻, 2004(5): 14-16.
- [10] 刘宗辉, 陈世君. 俄罗斯核动力破冰船发展动态[J]. 国外核新闻, 1993(2): 55-58, 61.
- [11] 陶书生, 陈睿, 车树伟. 浮动式核动力堆关键技术及其思考[C]//第一届全国小型堆安全监管研讨会会议论文集. 武汉: 环境保护部核与辐射安全中心, 2016: 18-24.
- [12] International Maritime Organization. International convention for safety of life at sea[S]. London: IMO, 2009.
- [13] 李骅, 刘军韬. 日本原子能发展历程[J]. 原子能视野, 2000(4): 20-23.
- [14] International Atomic Energy Agency. Safety considerations in the use of ports and approaches by nuclear merchant ships[S]. Vienna: IAEA, 1968.
- [15] International Maritime Organization. Res. A. 491(XII) Code of safety for nuclear merchant ships[S]. London: IMO, 1981.
- [16] Honerlah H B, Hearty B P. Characterization of the nuclear barge STURGIS[C]//WM'02 Conference. Tucson: U. S. Army Corps of Engineers, 2002: 1-12.
- [17] 刘峰, 李佳佳, 刘丽红, 等. 国外海上浮动核电站政策和标准规范[J]. 船舶工程, 2017, 39(4): 12-15.
- [18] Russian Maritime Register of Shipping. ND No.2-020101-112-E rules for the classification and construction of nuclear ships and floating facilities[S]. Saint Petersburg: RMRS, 2018.
- [19] Federal standards and rules in the field of atomic energy use[EB/OL]. [2019-02-28]. <https://www.secnrs.ru/en/science/development/fnp>.
- [20] List of safety guidelines effective in the field of atomic energy use[EB/OL]. [2019-02-28]. <https://www.secnrs.ru/en/science/development/rd>.
- [21] 国家核安全局. HAF102 核动力厂设计安全规定[S]. 北京: 国家核安全局, 2016.
- [22] 国家核安全局. HAD102/17 核动力厂安全评价与验证[S]. 北京: 国家核安全局, 2006.
- [23] 吕焕文, 刘嘉嘉, 刘聪, 等. 浮动式核电站在核应急方面的特点与相关建议[C]//第一届全国小型堆安全监管研讨会会议论文集. 武汉: 环境保护部核与辐射安全中心, 2016: 312-317.
- [24] 张连胜, 谭思超, 付学宽. 晃荡对气泡上升运动影响的数值研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(S1): 71-74.
- [25] 杨连新. 中国核潜艇创业发展的“四个阶段”[J]. 中国核工业, 2013(11): 57-60.
- [26] 林宗虎. 核电站的发展历程及应用前景[J]. 自然杂志, 2012, 34(2): 63-68.
- [27] International Atomic Energy Agency. Advances in small modular reactor technology developments[R]. Vienna: IAEA, 2014.

Nuclear safety issues and development proposals of floating nuclear power plant in China

WANG Cong^{1,2}, YU Lei^{1*}, YE Shuisheng²

1. School of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China

Abstract This paper reviews the applications of foreign nuclear ships, discusses the nuclear safety challenges of developing the floating nuclear power plants, as well as the development situation of the key technologies of the equipment production and the shipbuilding, along with some possible solutions.

Keywords ocean resource exploitation; energy supply; floating nuclear power plant; nuclear safety ●



(责任编辑 祝叶华)