

引用格式:王 珏,陈力生,蔡 琦,等.海上小型核动力厂设计中若干安全问题[J].科学技术与工程,2019,19(30):9-15
Wang Jue, Chen Lisheng, Cai Qi, et al. Important safety issues in the design of small-sized marine nuclear power plants[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 9-15

原子能技术

海上小型核动力厂设计中若干安全问题

王 珏^{1,2} 陈力生¹ 蔡 琦^{1*} 宫大鑫²

(海军工程大学核科学技术学院¹,武汉 430033;武汉第二船舶设计研究所²,武汉 430064)

摘 要 随着海洋建设的大力发展,海上核能利用逐渐成为核工程及船舶工程领域的前沿热点。作为兼有核电厂与核动力船舶特征的创新产物,海上小型核动力厂在设计中考虑的制约因素将更为复杂。为促进制定满足通用核安全要求的总体设计方案,逐步建立配套的安全设计准则,以现行核电厂设计安全规定及安全审评原则为参考,结合核动力船舶的设计规范要求,就监管部门重点关注的若干安全问题进行探讨,并提出针对性的见解。相关内容对于海上小型核动力厂的工程设计与安全评价具有一定的参考意义。

关键词 海上小型核动力厂 设计安全 海洋环境条件
中图法分类号 TL48; **文献标志码** A

建设海洋强国,是中国特色社会主义事业的重要组成部分。在建设海洋的过程中,能源供给是必须解决的问题。为维护绿色海洋,在消耗能源的同时也要尽可能减少污染物的排放。与传统化石能源相比,核能供给能力强、燃料体积小、经济成本稳定,且向外界排放的污染物有限,因而对于保障海洋建设具有重要的战略意义。

目前,具备工程应用基础的海上小型核动力厂(如无特别说明,文中的核电厂指用于发电的陆上核设施;核动力厂指用于发电或其他供热应用的陆上核设施;核动力装置指用于推进的海上核设施,讨论范围仅限于压水堆技术)主要有两大技术路线^[1-3]:一是基于成熟的陆上核电技术,将核蒸汽供应系统按比例缩小后移植于船舶或海洋工程平台^[4-6],结合船用蒸汽电力转换系统,实现海上核能发电,其特点表现为“大”变“小”、“陆”转“海”;二是基于成熟的舰船核动力装置技术,通过设计改进与优化,实现以生产电力或淡水等为主要任务的功能延伸^[10,11],其特点表现为“推进”变“生产”。

对海上小型核动力厂而言,采用上述任何一种

技术路线都将面临一些共性的安全问题。为此,吕松泽等^[12]从核安全监督的视角出发,探讨了在系泊试验、拖动和航行试验下针对海洋核动力平台的监督要求。程萍等^[13]提出了一套适用于海洋核动力平台的安全许可证申请方法。张延昌等^[14]结合海上核电的优势及技术难度,提出了载体平台的设计要求及要点。但前人对设计过程中涉及的核安全问题的研究较少且内容多局限于单个议题。鉴于此,参考核电厂(包括小型核动力厂)的成熟设计与审评体系^[15-20],结合核动力装置的安全要求^[21-23],以安全目标与安全评价、海洋环境条件的影响、设计中的标准和规范、最终安全屏障的设计,以及事故下的放射性释放等制约总体设计且受监管部门重点关注的若干议题为出发点,探讨海上小型核动力厂的设计安全。

1 安全目标与安全评价

安全是核能的立身之本。在解决安全问题之初,首先应设计一个预期的目标。我国核安全法规提出了“在核动力厂中建立并保持对放射性危害的有效防御,以保护人与环境免受放射性危害”的基本安全目标^[24],即通过控制风险来确保核动力厂的安全。对于具体指标,美国核管理委员会提出了定量的安全目标,即“两个千分之一”^[25]:①对紧邻核电厂的正常个体成员来说,由于反应堆事故所导致立即死亡的风险不应该超过美国社会成员所面对的

2019年3月17日收到 国家重点研发计划
(2017YFC0307800/06)资助
第一作者简介:王 珏(1989—),男,汉族,陕西绥德人,博士研究生。研究方向:核安全分析。E-mail:wangjuebey@sina.com。
*通信作者简介:蔡 琦(1962—),男,博士,教授。研究方向:核安全分析。E-mail:cq-hg@139.com。

其他事故所导致的立即死亡风险总和的千分之一；②对核电厂邻近区域的人口来说，由于核电厂运行所导致的癌症死亡风险不应该超过其他原因所导致癌症死亡风险总和的千分之一。在此基础上，业内针对新建核动力厂提出了更具操作性的概率安全目标^[25]，即：①每运行堆年严重堆芯损坏频率小于 10^{-5} ；②每运行堆年大规模放射性释放频率小于 10^{-6} 。该目标实则是评价核动力厂设计安全的技术指标，而非监管部门的法定要求。

对于海上小型核动力厂，远离公众、安全性高等特征使其与上述定量安全目标的分析对象并不相符。但考虑监管风险、公众接受度和首次工程应用的潜在不确定性，上述概率安全目标对于评价设计安全仍具有指导意义。在设计过程中，通过开展概率安全评价工作，一方面能够发掘薄弱环节、改进设计，从而平衡核动力厂的总体设计。另一方面，也能为针对性调整现有安全要求提供技术基础。

除概率安全评价外，整个设计过程中还应开展全面的确定论安全评价，包括对各类异常事件、假想事故（包括堆芯熔化等严重事故）开展论证分析。根据“切尔诺贝利”、“三哩岛”和“福岛”核事故的经验反馈，虽然反应堆堆芯发生解体或熔化的概率非常低，但由于后果异常严重，设计中应考虑控制其风险。在严重事故的应对策略中，维持堆芯熔融物的可冷却性成为新建核动力厂的关键设计之一。对于海上小型核动力厂，考虑反应堆外部多为钢结构，承担熔融物消融的能力较差，故维持熔融物滞留于堆内的策略总体更优。设计中，应重点关注滞留策略的可靠性，如配置不依赖供电的非能动系统，以应对全失电的事故情景。

2 海洋环境条件的影响

面临复杂多变的海洋环境，是海上小型核动力厂区别于陆上同类核设施的典型标志。对于各类核设施而言，厂址评价是建设项目可行性研究的重要工作，而厂址的可接受性又与拟建项目的设计息息相关^[26]。在海上小型动力厂的设计中，应关注作业海域或规定航线的外部事件，包括风浪流、海冰、海生物等自然事件，以及船舶碰撞、直升机坠毁等人为事件^[27,28]。综合考虑核电、船舶及海洋工程领域的分析方法^[28]，尽早确立环境要素和重现期等设计基准，以作为厂址安全评价、环境影响评价和船体结构设计等工作的基本输入。

在海洋条件的作用下，海上小型核动力厂的载体平台将呈现多自由度的运动形态，如表 1 所示。设计中，应确立不同工况下倾斜和摇摆的限定值

（包括角度、周期等），并针对不同类型的系统及设备开展适应性分析。对于与汽、液长期接触的设备，除关注盐雾、霉菌等舱室环境影响外，还要格外关注电加热元件裸露、阀门接管水淹和水位测量失真等安全问题。在正常及事故工况下，海洋条件引入的作用力会影响反应堆冷却剂的流动与换热行为，破坏基于自然循环等机理的非能动安全系统的可靠运行，进而威胁反应堆的安全策略。

表 1 船舶六自由度运动

Table 1 Six-degree-of-freedom motion of ships

方向	线性振荡（延轴移动）	摇摆（绕轴旋转）
纵向（船艏-船艉）	纵荡	纵摇
横向（左舷-右舷）	横荡	横摇
垂向（舱底-甲板）	垂荡	艏摇

根据核安全相关要求^[29]，核动力厂设计和安全评价使用的软件应通过监管部门的鉴定并得到认可。当前国内普遍使用的工程级安全评价软件主要引自国外，其程序功能设定并未考虑海洋条件的影响。而在科研领域，国内多家单位针对海洋条件下的安全评价开展了大量研究，并研发了特定的机理模型，但其普适性和保守型有待进一步论证及优化。考虑到配套软件的研发及鉴定尚不充分，对于海上小型核动力厂的设计和评价，现阶段以在常规计算结果上叠加保守度或在验收准则上叠加保守惩罚的方法来考虑海洋条件的影响，将更具工程可操作性。例如，借鉴原日本原子能研究所、原船舶技术研究等单位针对海洋条件影响的研究成果^[30-35]，并结合专家判断的方式，初步确定合理的保守裕量。与此同时，应尽早开展试验验证、不同程序对比验算等工作，为适用性程序的开发积累验证数据。

此外，海洋环境也为核动力厂的日常运行支持和事故下应急增加了困难。缺乏外界补给的“孤岛运行”，成为设计中必须考虑的基本情景。以厂用电系统设计为例，由于无厂外电力供应（核电厂要求有两路独立的外电网供电），设计中就要通过设置综合手段（如柴油机、蓄电池和燃气轮机等）来维持供电的冗余性，提高事故下整厂的自持能力。

3 设计标准和规范

标准和规范的采用原则及具体清单是指导设计工作的顶层文件，应在前期阶段予以明确。对于新型核动力厂，通常缺乏完善且配套的标准体系，因此有必要对已有体系开展适用性分析。中国在发展核电的过程中曾引进、消化了国外的成熟技术及配套标准体系，以 M310 机型为代表的第二代核电技术以法国核电厂设计和建造规则为依据，而以 AP1000

机型为代表的第三代非能动技术,设计中则以美国机械工程师学会标准、核学会标准等为依据。在吸纳国外标准的基础上,结合国内核电项目实践,中国也逐步建立了自主化的标准体系^[36,37]。

对于海上小型核动力厂,其载体平台的安全与核蒸汽供应系统的安全互有影响、关联性强,两者共同构成总体安全,这是与核电厂的一大显著区别。因此,设计中有必要考虑船舶领域的相关要求,如国际海上人命安全公约、钢质海船及海上浮式装置的人级规范^[38-41]。伴随核商船和核动力破冰船的发展,国际海事组织、俄罗斯船级社等机构陆续发布了配套的安全规范,中国也针对核动力装置制定了成熟的舰船标准^[42],均具有重要的参考价值。

综上,对于海上小型核动力厂的设计,虽无配套的完善标准体系可供采用,但多个成熟的体系可供参考,包括中国自主化的核电标准和成熟的军用标准,国外成熟的核电标准,以及国际和国内外的船舶标准。与此同时,设计中应关注标准与法规的自洽性。

为避免出现法规与标准层次错位、不同体系混乱引用等现象,并充分借鉴参考堆型的工程实践经验,针对海上小型核动力厂设计采用标准问题提出建议如下。

(1) 梳理适用的核安全法规(包含核电、船舶领域的强制性标准),必要时针对部分专题自行编制设计总则,作为标准体系的顶层要求。此类设计要求应及时提交监管部门审查、认可。

(2) 根据参考堆型的技术路线,明确基础的标准体系。例如,第三代非能动技术以“美系”标准为主,核动力装置以舰船标准为主等。

(3) 对于革新性设计,结合具体设计编制配套的设计要求,以“设计准则”的形式与监管部门开展沟通。

(4) 设计工作开展至一定深度后,启动自主化体系建设工作,以完善国内核电和船舶的标准体系。

4 最终安全屏障的设计

为预防事故的发生和减轻事故的后果,核动力厂采用纵深防御的安全理念,在设计中通过设置多道实体屏障,实现对放射性物质的有效包容。其中,最后一道屏障——安全壳(又称反应堆厂房)用于包容反应堆及其辅助系统等重要物项,通常配备安全壳喷淋等多个辅助系统,协同实现热量导出、放射性消除和辐射源屏蔽等功能。安全壳的设计压力、自由容积及相关系统的容量等关键参数,由针对设计基准事故的确定论安全评价确定^[43-46]。此外,陆

上核电厂还要求安全壳在结构上能应对商用飞机的恶意撞击等外部事件。

对于海上小型核动力厂,其安全壳面临新的内、外部环境条件。由于船舶的空间和载重有限,故设计中希望尽可能缩小其几何尺寸并维持方形结构,这就对壳体的压力、热载荷和机械载荷承受能力提出了更高要求。在船舶平台上,安全壳将被船体结构(如反应堆舱室)包容,不再直接暴露于大气环境中。此时,堆舱作为船体结构的组成部分,应满足船舶设计规范的安全要求,如船舶碰撞防护、水密性和稳性等。简言之,海上小型核动力厂安全壳和堆舱及其系统的安全设计极具“船”“核”结合属性。提出以下设计建议:

(1) 同时设置安全壳及堆舱。其中,安全壳及其系统承担余热导出及放射性包容的核安全功能。堆舱及其结构承担碰撞保护等船舶安全功能,并作为放射性包容的一道辅助屏障。

(2) 针对安全壳及堆舱的选材、试验和结构设计等,尽早编制配套的设计准则,包括泄漏率许可指标、飞机机型及撞击方式等内容。结合专家判断等方式,形成符合监管要求的指导性文件。

(3) 通过新型设计,如一体化布置取消主管道等方式,使设计基准事故降级或从实际上消除,从而减小安全壳的设计压力及自由容积等,增加船舶设计的灵活性。

(4) 借鉴国外核动力船舶的成熟经验^[47],设置安全壳抑压系统等缓解措施,更有效地实现安全壳的设计功能。

5 事故下的放射性释放

为实现基本安全目标,设计过程中必须对特定事故序列导致的放射性释放(即“事故源项”)开展分析论证,计算事故源项在厂址周边气象条件下造成的放射性后果,并确保边界处假想人员的吸收剂量满足法定要求。综合安全和管理考虑,中国对相关“边界”作出了规定,即核动力厂周围必须设计非居住区和规划限制区^[48-50]。另外,为便于应急准备与响应的实施,还应设置应急计划区^[51,52]。在测算以上“三区”的范围时,事故源项是关键的设计输入,因而成为监管部门的重点关注项。

对于大型商用核电厂,事故源项的分析方法和监管要求均较为成熟^[53],设计中可直接采用相应的标准和规范^[54-58]。与此不同的是,小型核动力厂的用途已由单一的电力生产扩展至了发电、供热和供汽等多任务。出于经济性等因素的考虑,缩短各类“边界”的范围、尽可能地靠近用户将成为其顶层设

计目标,包括将应急计划区限制在厂址边界^[59],实现非居住区、规划限制区和应急计划区的“三区合一”。而现有标准和规范的计算模型偏保守,难以满足监管部门“保证实际消除有大量放射性物质释放的可能性”的针对性要求。为考虑小型核动力厂的安全特征,匹配前述设计目标及安全要求,有必要针对具体设计开发专门的事故分析模型,并对概率安全评价确定的一系列事故序列开展分析,获得合适的事故源项,即“机理源项法”^[60,61]。

上述技术见解同样适用于海上小型核动力厂,值得注意的是,后者实际包含多个厂址,包括建造厂址、运行厂址和维修厂址等。由于“机理源项法”对设计深度有一定要求,故应尽早确定各厂址的设计目标,及时启动各项工作。

6 结论与建议

针对海上小型核动力厂设计中的若干安全问题进行探讨,得出以下基本见解。

(1)在着手设计之前,应先明确量化的安全目标。当前,建议采纳新建核动力厂通用的概率安全目标,借助概率安全评价来衡量设计方案。对于确定论安全评价,应考虑设置熔融物堆内滞留等策略应对严重事故。

(2)应特别关注海洋环境条件的影响,包括:①尽早确定外部事件,包括风浪流、海生物和船舶碰撞等的设计基准;②开展系统和设备在倾斜与摇摆条件下的适用性分析,海洋条件对安全评价软件的影响,建议当前以直接增加保守裕量的方式考虑;③基于“孤岛运行”的特点,设计中应完善应急动力(包括柴油机、蓄电池等)的设计,以提高事故下整厂的自持能力。

(3)在前期设计阶段,应明确设计采用标准和规范的原则,建议以参考堆型的技术特征为参考,成套地选择标准作为基础,并结合自身特点编制配套的设计准则。同时,关注与适用法规的一致性,以及自主化标准体系的建设。

(4)建议同时设置安全壳及堆舱作为最终安全屏障,安全壳设计应考虑船舶的选材与布置特点,堆舱设计应满足碰撞保护、水密性和稳性等船舶要求。

(5)关于事故下的放射性释放,宜基于针对性的计算模型开展机理性事故源项分析,以作为缩小“三区”范围甚至实现“三区合一”的技术支撑。

参 考 文 献

1 程 坤,谭思超. 海洋条件下反应堆堆工水力特性研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(4): 655-662

Cheng Kun, Tan Sichao. Research progress of nuclear reactor thermal-hydraulic characteristics under ocean conditions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(4): 655-662

2 李佳佳,刘 峰,赵 芳. 国外海上浮动核电站的产业发展现状[J]. 船舶工程, 2017, 39(4): 7-11

Li Jiajia, Liu Feng, Zhao Fang. Development status of overseas off-shore floating nuclear plant industry[J]. Ship Engineering, 2017, 39(4): 7-11

3 Yan B H. Review of the nuclear reactor thermal hydraulic research in ocean motions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 313: 370-385

4 Kostin V I, Panov Y K, Polunichev V I, et al. Floating power-generating unit with a KLT-40S reactor system for desalinating sea water[J]. Atomic Energy, 2007, 102(1): 31-35

5 Balunov B F, Shcheglov A A, Il'in V A, et al. An experimental substantiation of the emergency cooldown system project for the KLT40S reactor installation of a floating nuclear cogeneration station[J]. Thermal Engineering, 2011, 58(5): 418-423

6 Dmitriev S M, Varentsov A V, Dobrov A A, et al. Computational and experimental investigations of the coolant flow in the cassette fissile core of a KLT-40S reactor[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017, 90(4): 94-950

7 李华成,刘 聪,劳业程,等. ACPR50S 小型堆核电站海上平台形式论证[J]. 广东造船, 2015, 34(6): 33-35, 32

Li Huacheng, Liu Cong, Lao Yecheng, et al. Floating platform type design for ACPR50S small offshore nuclear power plant[J]. Guangdong Shipbuilding, 2015, 34(6): 33-35, 32

8 盛选禹,凌 晨. ACPR50S 小型堆直流蒸汽发生器的屏蔽计算分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(2): 66-71

Sheng Xuanyu, Ling Chen. Preliminary shielding calculation and analysis of OTSG for ACPR50S small modular reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(2): 66-71

9 陈 智,廖龙涛,张 英,等. ACPI00S 浮动核电站核蒸汽供应系统控制系统分析与仿真研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2018, 32(6): 9-14

Chen Zhi, Liao Longtao, Zhang Ying, et al. The analysis and simulation study of the nuclear steam supply system control system for the floating nuclear power plant ACPI00S[J]. Journal of University of South China (Science and Technology Edition), 2018, 32(6): 9-14

10 宋仕钊,刘兴民,郭春秋,等. 海洋核动力平台堆芯子通道分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(12): 2165-2169

Song Shizhao, Liu Xingmin, Guo Chunqiu, et al. Sub-channel analysis of reactor core for marine nuclear power platform[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(12): 2165-2169

11 宋仕钊,刘兴民,郭春秋,等. 海洋核动力平台一回路摇摆状态下自然循环能力研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 33-40

Song Shizhao, Liu Xingmin, Guo Chunqiu, et al. Natural circulation analysis of primary loop for marine nuclear power platform under swing condition[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 33-40

12 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(34): 46-48

Lyu Songze, Liu Hongjun, Cai Qi, et al. Preliminary study on nuclear safety supervision of marine nuclear power platforms[J]. Sci-

- ence and Technology Innovation Herald, 2016(34): 46-48
- 13 程 萍, 李天鹏, 尤小健, 等. 海洋核动力平台前期执照申请的探究[J]. 核安全, 2018, 17(5): 26-31
Cheng Ping, Li Tianyao, You Xiaojian, et al. Preliminary exploring of license application of offshore nuclear power platform[J]. Nuclear Safety, 2018, 17(5): 26-31
- 14 张延昌, 景宝金, 童 波, 等. 浮动核电站载体平台安全性设计初探[J]. 船舶, 2017, 28(3): 1-9
Zhang Yanchang, Jing Baojin, Tong Bo, et al. Safety design of carrier platform for floating nuclear power plant[J]. Ship & Boat, 2017, 28(3): 1-9
- 15 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定: HAF102—2016[S]. 北京: 国家核安全局, 2016
National Nuclear Safety Administration. Code on the safety of nuclear power plant design: HAF102—2016[S]. Beijing: NNSA, 2016
- 16 国家核安全局. 第二代改进型核电项目核安全审评原则[M]. 北京: 国家核安全局, 2007
National Nuclear Safety Administration. Safety review principles of evolutionary second generation nuclear power plant[M]. Beijing: NNSA, 2007
- 17 国家核安全局. 小型压水堆核动力厂安全审评原则[M]. 北京: 国家核安全局, 2016
National Nuclear Safety Administration. Safety review principles of small PWR nuclear power plant[M]. Beijing: NNSA, 2016
- 18 林诚格. 我国今后新建核电站若干安全问题的考虑[J]. 核科学与工程, 2000, 20(3): 255-259
Lin Chengge. Considerations on some safety issues for the future Chinese nuclear power plants[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000, 20(3): 255-259
- 19 严天文, 李吉根, 张 琳, 等. 新建核电厂几个重要安全要求的探讨[J]. 核安全, 2013, 12(增刊1): 72-77
Yan Tianwen, Li Jigen, Zhang Lin, et al. Discussion on several important safety requirements for the new nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2013, 12(S1): 72-77
- 20 依 岩, 程毅敏. 高温气冷堆概率安全分析(PSA)报告审评的思考[J]. 核安全, 2011(1): 31-35
Yi Yan, Chong Yimin. Consideration about the review of the HTR-PM PSA report[J]. Nuclear Safety, 2011(1): 31-35
- 21 Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of nuclear ships and floating facilities: ND No. 2-020101-112-E[S]. Saint Petersburg: RMRS, 2018
- 22 Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of nuclear support vessels: ND No. 2-020101-101-E[S]. Saint Petersburg: RMRS, 2017
- 23 International Maritime Organization. Code of safety for nuclear merchant ships: Res. A.491(XII)[S]. London: IMO, 1981
- 24 汤 搏. 关于核电厂安全目标的确定问题[J]. 核安全, 2007(2): 8-11
Tang Bo. Determination of safety objectives for nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2007(2): 8-11
- 25 王梦溪, 周 迪, 刘新建. 核电厂概率安全目标发展概述[J]. 核安全, 2016, 15(3): 8-13, 20
Wang Mengxi, Zhou Di, Liu Jianxin. Development of probabilistic safety goals for nuclear power plants (NPPs)[J]. Nuclear Safety, 2016, 15(3): 8-13, 20
- 26 国家环境保护总局核安全中心. 核设施厂址评价安全规定[M]. 北京: 国家环境保护总局, 2006
Nuclear and Radiation Safety Center. Safety regulations for site evaluation of nuclear facilities[M]. Beijing: NRS, 2006
- 27 方学智. 船舶与海洋工程概述[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 173-191
Fang Xuezh. Overview of ships and marine engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 173-191
- 28 郭 健, 尤小健, 张乃樑, 等. 海洋核动力平台海洋环境设计基准概率论法[J]. 船舶工程, 2017, 39(11): 75-79
Guo Jian, You Xiaojian, Zhang Nailiang, et al. Probability theory method applied in ocean environment design basis of MNNP[J]. Ship Engineering, 2017, 39(11): 75-79
- 29 国家核安全局. 核动力厂安全评价与验证: HAD102/17—2006[S]. 北京: 国家核安全局, 2006
National Nuclear Safety Administration. Safety assessment and verification of nuclear power plant: HAD102/17—2006[S]. Beijing: NNSA, 2006
- 30 Okumura K. Transient thermal-hydraulic subchannel analysis of the fuel rod bundle of a marine nuclear reactor[J]. National Maritime Research Institute, 1974, 11: 181-206
- 31 Ishida I, Kusunoki T, Murata H, et al. Thermal-hydraulic behavior of a marine reactor during oscillations[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 120: 213-225
- 32 Murata H, Iyori I, Kobayashi M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 118: 141-154
- 33 Kim J, Park G. Development of RETRAN-03/MOV code for thermal-hydraulic analysis of nuclear reactor under moving conditions[J]. Journal of the Korean Nuclear Society, 1996, 28(6): 542-550
- 34 Kusunoki T, Odano N, Yoritsune T, et al. Design of advanced integral-type marine reactor MRX[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 201: 155-175
- 35 Murata H, Sawada K, Kobayashi M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 69-85
- 36 龚 俊. 压水堆核电厂标准体系项目表(2011)修订情况介绍[J]. 核标准计量与质量, 2012, 2: 2-5
Gong Jun. Update status (2011) of project list of PWR NPP standard system[J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2012, 2: 2-5
- 37 董瑞林. 压水堆核电厂标准体系项目表第二次修订情况报告[J]. 核标准计量与质量, 2013(4): 11-14
Dong Ruilin. Second update status report of project list of PWR NPP standard system[J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2013(4): 11-14
- 38 International Maritime Organization. International convention for safety of life at sea: SOLAS[S]. London: IMO, 2016
- 39 Russian Maritime Register of Shipping. Register of ships: ND No. 2-050101-004-E[S]. Saint Petersburg: RMRS, 2017
- 40 中国船级社. 钢质海船入级规范[M]. 北京: 中国船级社, 2018
China Classification Society. Classification rules of steel sea-going vessel[M]. Beijing: CCS, 2018
- 41 中国船级社. 海上浮式装置入级规范[M]. 北京: 中国船级

- 社, 2014
- China Classification Society. Classification rule of floating installations at sea[M]. Beijing: CCS, 2014
- 42 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 Qiang, Shi Lei, Chen Huiling, et al. Brief analysis on the application of nuclear construction safety assurance standards and codes in the shipping industry[J]. Ship Standardization and Quality, 2018(3): 2-9
 - 43 国家能源局. 压水堆核电站安全壳压力和温度瞬态分析: NB/T 20404—2017[S]. 北京: 原子能出版社, 2017
National Energy Administration. Pressure and temperature transient analysis for pressurized water reactor containments: NB/T 20404—2017[S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2017
 - 44 国家能源局. 压水堆核电站隔间压力与温度瞬态分析: NB/T 20403—2017[S]. 北京: 原子能出版社, 2017
National Energy Administration. Subcompartment pressure and temperature transient analysis in pressurized water reactors: NB/T 20403—2017[S]. Beijing: Atomic Energy Press, 2017
 - 45 International Atomic Energy Agency. Design of reactor containment systems for nuclear power plants: No. NS-G-1.10 [S]. Vienna: IAEA, 2004
 - 46 陈召林, 肖 钧, 郑继业, 等. 关于压水堆安全壳功能设计审评的相关问题的探讨[J]. 核安全, 2013, 12(4): 15-19
Chen Zhaolin, Xiao Jun, Zheng Jiye, et al. Discussion on relevant problems of PWR containment function design in safety review[J]. Nuclear Safety, 2013, 12(4): 15-19
 - 47 张臣刚. KLT-40S 小型堆鼓泡抑压技术特点[J]. 科技风, 2018(1): 102-103
Zhang Chengang. Technical characteristic of sparging pressure suppression of KLT40S small reactor[J]. Technology Wind, 2018(1): 102-103
 - 48 环境保护部. 核动力厂环境辐射防护规定: GB 6249—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011
Ministry of Environmental Protection. Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant: GB 6249—2011[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011
 - 49 殷德健, 芮晓明, 王昆鹏. 关于重要核设施规划限制区的几点思考[J]. 核安全, 2018, 17(5): 65-70
Yin Dejian, Rui Xiaoming, Wang Kunpeng. Comments and suggestions on the application of planning restricted zone for important nuclear facilities[J]. Nuclear Safety, 2018, 17(5): 65-70
 - 50 陈政文. 浅析核电厂规划限制区的设置和监管[J]. 核安全, 2008(3): 33-37
Chen Zhengwen. Research on establishment and management of nuclear power plant around planning restricted zone [J]. Nuclear Safety, 2008(3): 33-37
 - 51 国家质量监督检验检疫总局. 核电厂应急计划与准备准则 第1部分: 应急计划区的划分: GB/T 17680.1—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Criteria for emergency planning and preparedness for nuclear power plants-Part 1: The dividing of emergency planning zone: GB/T 17680.1—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008
 - 52 王军龙, 刘嘉嘉, 刘 聪, 等. 浮动式核电厂烟羽应急计划区划分[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(4): 671-675
Wang Junlong, Liu Jiajia, Liu Cong, et al. Definition of plume emergency planning zone for floating nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(4): 671-675
 - 53 张 琳, 陈晓秋, 李 冰. 核动力厂选址假想事故源项的探讨[J]. 辐射防护, 2015, 35(4): 193-198
Zhang Lin, Chen Xiaoqiu, Li Bing. Investigation of nuclear power plant postulated siting accident [J]. Radiation Protection, 2015, 35(4): 193-198
 - 54 Atomic Energy Commission. Calculation of distance factors for power and test reactors sites: TID 14844—1962[S]. USA: AEC, 1962
 - 55 Nuclear Regulatory Commission. Alternative radiological source terms for evaluating design basis accidents at nuclear power reactors: RG 1.183—2000[S]. USA: NRC, 2000
 - 56 Nuclear Regulatory Commission. Methods and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors: RG 1.195—2003 [S]. USA: NRC, 2003
 - 57 Nuclear Regulatory Commission. Accident source terms for light-water nuclear power plants: NUREG 1465—1995 [S]. USA: NRC, 1995
 - 58 Idaho National Laboratory. Mechanistic source terms white paper: INL/EXT-10-17997[R]. Idaho: INL, 2010
 - 59 曲静原, 张 琳, 黄 挺. 小型堆研发及核应急准备进展[J]. 科技导报, 2013, 31(35): 71-75
Qu Jingyuan, Zhang Lin, Huang Ting. Emergency preparedness for small modular reactors[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(35): 71-75
 - 60 国家核安全局. 小型核动力厂非居住区和规划限制区划分原则与要求[M]. 北京: 国家核安全局, 2018
National Nuclear Safety Administration. Principles and requirements for the dividing of EA and PRA of small nuclear power plant [M]. Beijing: NNSA, 2018
 - 61 罗 峰, 李国青. ACP100 事故源项与应急计划区划分方法探讨[J]. 辐射防护, 2017, 37(4): 322-326
Luo Feng, Li Guoqing. Discussion on accident source term and emergency planning zone of ACP100 [J]. Radiation Protection, 2017, 37(4): 322-326

Important Safety Issues in the Design of Small-sized Marine Nuclear Power Plants

WANG Jue^{1,2}, CHEN Li-sheng¹, CAI Qi^{1*}, GONG Da-xin²

(School of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering¹, Wuhan 430033, China;
Wuhan Second Ship Design and Research Institute², Wuhan 430064, China)

[**Abstract**] To explore the ocean deeper, the utilization of nuclear energy at sea has become a frontier hot spot in the field of both nuclear engineering and ship engineering. As an innovative production of nuclear power plants (NPPs) and nuclear-powered ships (NSs), constraints to be considered in the design of small-sized marine NPPs will be more complex. In order to develop an overall design that meets the general nuclear safety requirements and establish a set of supporting design criteria, some safety issues which are concerned by the safety regulation body are discussed here. Based on present safety regulations and guides in the field of safety analysis & safety review of NPPs, and considering the design specification of NSs, relevant suggestions are put forward consequently, which can be referenced to develop a small-sized marine NPPs as engineering project.

[**Key words**] small-sized marine nuclear power plants design safety marine conditions