

文章编号: 0258-0926(2015)06-0105-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.06.0105

# 核动力船舶应急准备与响应关键技术研究

于 红

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610231

**摘要:** 根据核动力船舶的设计和运行特点, 以国内外相关导则和标准为技术依据, 对核动力船舶应急准备与响应需解决的关键技术开展研究, 提出划分核动力船舶的应急状态等级、确定与各应急状态等级相匹配的应急响应区域、对各应急响应区域内的人员实施相应防护行动的思路和方法。

**关键词:** 核动力船舶; 应急状态等级; 应急响应区域; 应急计划区; 防护行动

中图分类号: TL364 文献标志码: A

## Key Technology about Emergency Preparedness and Response for Nuclear Power Ships

Yu Hong

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610231, China

**Abstract:** Based on the design and operation of nuclear power ships and the internal and international guide and criteria for the emergency preparedness and response, the methodology for the development of emergency classification, emergency response area, and protective action for nuclear power ship is established.

**Key words:** Nuclear power ship, Emergency classification, Emergency response area, Emergency planning zone, Protective action

### 0 前 言

目前, 我国核与辐射应急准备与响应的相关法规、导则和标准普遍是针对固定式陆上核设施建立的。对于可移动式的核动力船舶, 由于其所处的地域和场外环境随着其运行轨迹不断变化, 使得核动力船舶的场外应急组织、应急设施设备、应急撤离路线、应急防护措施、应急监测和后果、应急支援、应急通讯等都存在较大的不同。本文根据核动力船舶的设计和运行特点, 以国内外相关导则和标准为技术依据, 对核动力船舶应急准备与响应的关键技术进行研究。

### 1 核动力船舶应急准备与响应的要点

运行单位是核设施核与辐射应急的第一级承担单位, 一般通过编制场内应急计划来缓解放射

性释放对人体健康和环境等的影响。场内应急计划除了要对核设施场内的应急计划做出安排, 也要给出场外应急计划的建议。场内应急计划中几乎包括了应急准备与响应的所有关键技术。

目前, 我国陆上核设施主要包括核动力厂和研究堆两大类。我国核安全导则 HAD 002/01-2010<sup>[1]</sup>对核动力厂场内应急计划的内容做出了具体规定, 核安全法规技术文件 HAB·J0073-2003<sup>[2]</sup>对研究堆场内应急计划的内容做出了具体规定。而对于核动力船舶这种移动式核设施, 不但国内, 即使国际上也鲜有其专门的导则或标准, 目前普遍采取参考陆上核设施应急准备与响应的方法, 仅建立核动力船舶可能停靠的指定港和寄泊港港区的应急计划。

从核动力厂和研究堆的相关导则和标准可以

收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-10-08

作者简介: 于 红 (1979—), 女, 高级工程师, 现主要从事辐射屏蔽与环境安全分析工作

看出,核设施运行单位场内应急计划就是要预先对核设施可能发生的核事故进行评估,并根据核事故造成的辐射威胁的等级以及工作人员和公众的防护需求,对在既定范围内,由既定的人、使用的既定设施设备、采取的既定措施做出具体安排。仅从技术的角度考虑,核动力船舶运行单位的应急准备与响应至少要解决以下3个关键问题:划分核动力船舶的应急状态等级,它决定了辐射威胁的程度及影响范围;确定与各应急状态等级相匹配的应急响应区域,它决定了需采取应急准备与响应的区域及区域大小;在适当的时间对各应急响应区域内的人员实施相应的防护行动,它决定了不同响应区域内需采取的具体防护措施及防护措施的有效性。

## 2 核动力船舶应急状态等级的划分

国际上普遍将美国核能研究所的技术文件 NEI 99-01-2008 (Rev5)<sup>[3]</sup>和 NEI 99-01-2012 (Rev6)<sup>[4]</sup>作为划分核设施应急状态等级的依据。NEI 99-01 (Rev5/Rev6)在考虑了潜在的或实际的辐射影响或放射性后果以及场内和场外应急响应行动后,将应急状态等级分成应急待命(Notification of Unusual Event)、厂房应急(Alert)、场区应急(Site Area Emergency)和场外应急(General Emergency)4个等级。即,从场内的角度考虑3个层级:出现异常 场区应急进入准备状态 实施场区应急响应行动;从场外的角度也考虑3个层级:出现异常 场外应急进入准备状态 实施场外应急响应行动。对于核动力船舶,可参考 NEI 99-01 (Rev5/Rev6),并根据核动力船舶的舱室布置和功能区分特点,将应急状态划分4个等级,分别为应急待命、舱室应急、船上应急和船外应急。如果核动力船舶舱室的实体边界与船舶的实体边界距离较近,也可将舱室应急和船上应急合并成1个等级,即将应急状态

分为3个等级,分别为应急待命、船上应急和船外应急。

应急状态分级的关键是明确各应急状态等级的标准,一旦超过标准核,设施应立即进入某一等级的应急状态,通常用初始条件和应急行动水平表示。目前国际上普遍采用 NEI 99-01 (Rev5/Rev6)作为核设施制定初始条件和应急行动水平的依据。对于核动力船舶,也可参考 NEI 99-01 (Rev5/Rev6),但须作适当地修正和补充。

以初始条件和应急行动水平确定应急状态等级一般通过矩阵表的形式表达,矩阵表由应急状态等级、初始条件、运行模式、应急行动水平和索引5部分组成。另外,为了表达清晰和便于使用,还根据事件或状态的特性将矩阵表划分成几类识别类。对于核动力船舶,应急状态分级矩阵表至少应包括识别类A(辐射水平/放射性流出物异常)、识别类C(冷停堆/换料系统故障)、识别类F(裂变产物屏障丧失)、识别类H(灾害等影响船舶安全的情况)和识别类S(核动力装置系统故障)这5种识别类。由于核动力船舶可能存在多种运行模式,不同运行模式下初始条件和应急行动水平的适用性可能有所区别,对于核动力船舶,为了保持内部一致性,应急状态分级矩阵表中的运行模式应与运行技术规范中的运行模式保持一致,且至少应包括功率运行、启动、热备用、热停堆、冷停堆、换料和卸料共7类运行模式。本文参考 NEI 99-01 (Rev5/Rev6),提出核动力船舶应急状态分级矩阵初始条件和应急行动水平应表征的事件或现象(表1)。表1中所列的事件或现象可作为应急状态分级矩阵表中的索引。

## 3 核动力船舶应急响应区域的确定

从应急状态分级可以看出,核动力船舶应急响应区域包括舱室、船上和船外3个区域。由于舱室和船均有实体边界,舱室和船上应急响应区

表1 核动力船舶应急状态分级初始条件和应急行动水平应表征的事件或现象

Table 1 Event and Phenomenon of Nuclear Power Ship Indicated by Initiating Condition and Emergency Action Level

识别类	识别类 A	识别类 C	识别类 F	识别类 H	识别类 S
运行模式	所有	冷停堆、换料、卸料	功率运行、启动、热备用、热停堆	所有	功率运行、启动、热备用、热停堆
事件或现象	气载/液态放射性流出物异常;辐射水平异常	反应堆冷却剂装量丧失;反应堆冷却剂系统温度上升;交流电源丧失;直流电源丧失;通讯能力丧失	燃料包壳屏障潜在丧失或丧失;反应堆冷却剂系统压力边界屏障潜在丧失或丧失;反应堆舱屏障潜在丧失或丧失	地震、风、海啸等自然灾害;火灾、爆炸、有害气体等内外部事件;敌对行为;控制室撤离	停堆失败;控制室显示丧失;反应堆冷却剂放射性活度超限;反应堆冷却剂泄漏;反应堆舱失压/隔离丧失;交流电源丧失;直流电源丧失;通讯能力丧失

域均可按实体边界来划分，即舱室应急响应区域为反应堆舱及与其相连的舱室（控制室、汽轮机舱、核辅助舱室）实体边界以内，船上应急响应区域为舱室响应区域以外、船的实体边界以内。船外应急响应区域，即应急计划区，没有实体边界，是本文研究的重点。

核动力船舶在海上航行期间的航行海域不确定，各海域的海洋环境条件各不相同，受核动力船舶核事故放射性物质释放影响的其他船只、海洋工程或航空器也可能存在较大的随机性。因此，对核动力船舶可能经过的海域都划分应急计划区是不现实的。对于核动力船舶，一旦在海上发生了核事故，且放射性物质释放的影响即将或已经蔓延至船外，只能通过尽量减少放射性物质向海洋环境释放、通过现场监测或事故放射性后果预测临时划分警戒区域、及时通报相关船只和航空器远离事故船舶、及时通报相关海洋工程做好防护措施等手段，减少对其他船只、海洋工程或航空器造成的辐射威胁，但不建议在事故前就在海上划分应急计划区。

对于核动力船舶，除非有足够的论证表明设计基准事故和严重事故均不会造成船外应急，否则就应在核动力船舶可能的停靠港区（指定港、寄泊港）划分应急计划区，并给出各应急计划区的范围；划分时应考虑核动力船舶停靠在港区可能的工况，还应考虑同一港口停靠多只船舶的情况。对于核动力船舶，可参考国际原子能机构技术文件 EPR-NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS<sup>[5]</sup>，将核动力船舶停靠港区的应急计划区划分为 4 个区域，即预防行动区（PAZ）、紧急防护行动区（UPZ）、计划延展距离（EPD）和计划消费品限制距离（ICPD）。

从国际上应急计划区划分的发展来看，ICPD 最具争议且修改较大。这主要是因为：环境条件的改变影响放射性物质的沉积模式；从作物/产品被污染到被食入需经历较复杂和较长的生产

消费链；存在被污染作物/产品被分配至其他非污染区域的可能。根据食入途径划分的应急计划区，经历了“食入应急计划区—较长期防护行动计划区—计划消费品限制距离”3 个主要演变过程。对于核动力船舶，由于很难准确地给出 ICPD 的距离，不建议划分 ICPD。可以在核事故发生后，通过对污染的消费品，特别是海洋生物及海洋生物产品消费进行监测后，再确定是否采取消费品限制等防护行动。

确定应急计划区范围或距离时，一般考虑对放射性物质的释放谱、放射性物质在环境中的行为和各应急响应行动的效力 3 个主要因素，并通过以下过程估算应急计划区范围或距离：选取事故（设计基准事故和严重事故）根据事故序列估算释放至环境的放射性源项（放射性物质组成、释放量/率、释放高度、持续释放时间等）根据环境参数估算反应堆周围不同方位的预期剂量估算不同应急响应行动的可防止剂量将预期剂量/可防止剂量与相关标准比较确定应急计划区的范围或距离。对于核动力船舶，可参考国际原子能机构一般安全导则 General Safety Guide No.GSG-2<sup>[6]</sup>，先确定核动力船舶应急计划区的范围或距离的准则（表 2），再根据事故源项、环境参数等估算的剂量确定应急计划区的范围或距离。另外，一般情况下核动力船舶的停靠港区也会有一个明确的边界，在确定各应急计划区范围或距离时，应适当考虑港区边界与 PAZ、UPZ 和 EPD 的关系，当 PAZ、UPZ 和 EPD 的某一范围或距离小于且接近港区边界时，可将该应急计划区的范围或距离扩大至港区边界，以便于管理。

#### 4 核动力船舶防护行动的执行

防护行动是为了避免或减轻人员应急照射情况下的受照剂量而采取的一种干预行动。EPR-Npp Public Protective Actions 根据应急响应时间将防护行动划分为紧急防护行动、早期防护

表 2 核动力船舶应急计划区范围或距离的确定准则

Table 2 Criteria for Developing Emergency Planning Zone of Nuclear Power Ships

应急计划区	测定量	剂量标准	照射途径
PAZ	加权平均吸收剂量/Gy	1（事故前后 10 h）	烟云外照射；地面沉积外照射
	甲状腺加权平均吸收剂量/Gy	2（事故后 30 d）	吸入甲状腺内照射
UPZ	有效剂量/mSv	100（事故前后 7 d）	烟云外照射；地面沉积外照射；吸入内照射
	甲状腺当量剂量/mSv	50（事故前后 7 d）	吸入甲状腺内照射
EPD	有效剂量/mSv	100（事故后 1 a）	烟云外照射；地面沉积外照射；吸入内照射

行动和长期防护行动。紧急防护行动和早期防护行动是为了防止严重的确定效应和降低随机性效应的风险,而长期防护行动是为了发现和治疗辐射诱发的健康影响。一般情况下,在场内和场外 PAZ、UPZ 应急响应区域内采取紧急防护行动,在场外 EPD 应急响应区域采取早期防护行动,在场外 ICPD 应急响应区域内采取长期防护行动。

对于核动力船舶,应急响应区域应分成船上舱室、船上舱室外和船外应急计划区。船外应急计划区还应分成 PAZ、UPZ 和 EPD;且在船上和船外 PAZ、UPZ 采取紧急防护行动,在船外 EPD 采取早期防护行动。参考 Epr-Npp Public Protective Actions,核动力船舶各应急响应区域对应的防护行动如表 3 所示。

表 3 核动力船舶各应急响应区域对应的防护行动

Table 3 Protective Action in Each Emergency Response Area of Nuclear Power Ships

应急响应区域	防护行动	
船上舱室内	在船上掩蔽至撤离;从舱室撤离至船外;碘防护;人员去污/预防误摄入	
船上舱室外	在船上掩蔽至撤离;从船上撤离至船外;碘防护;人员去污/预防误摄入	
船外应急计划区	PAZ	在房间内掩蔽至撤离,撤离至 UPZ 外;碘防护;人员去污/预防误摄入
	UPZ	在房间内掩蔽至撤离,撤离至 UPZ 外;碘防护;人员去污/预防误摄入
	EPD	临时避迁至 EPD 外;食品/牛奶/水/海产品限制

只有当防护行动可防止的剂量达到某一干预水平时,才应该采取相应的防护行动。干预水平通常用剂量表示,但由于剂量不是一个可监测的量,在应急中不能直接使用,又引入了操作干预水平(OIL)的概念。即在核事故应急时,只有达到操作干预水平,才应采取相应的防护行动。对于核动力船舶,可参考国际原子能机构技术导则 IAEA-TECDOC-955<sup>[7]</sup>和 Epr-Npp Public Protective Actions,并根据核动力船舶的设计、运行及港区环境的特点,确定操作干预水平(表 4)。

## 5 结束语

应急状态等级的划分、与各应急状态等级相匹配的应急响应区域的确定、各应急响应区域内防护行动的执行是核动力船舶应急准备与响应最主要的技术内容,其中,用于确定应急状态等级

表 4 核动力船舶操作干预水平缺省值及相应的防护行动

Table 4 Operational Intervention Level Default and Protective Action of Nuclear Power Ships

防护行动	操作干预水平	参数	缺省值
撤离	OIL1	地面沉积剂量率/ $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
	OIL2	烟羽剂量率/ $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
掩蔽	OIL3	烟羽剂量率/ $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$	0.1
碘防护	OIL1	地面沉积剂量率/ $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
	OIL3	烟羽剂量率/ $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$	0.1
	OIL4	皮肤剂量率/ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
	OIL5	皮肤相关的甲状腺剂量率/ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	0.5(年龄 < 7 岁); 2(年龄 > 7 岁)
人员去污/预防误摄入	OIL4	皮肤剂量率/ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
临时避迁	OIL6	地面沉积剂量率/ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	100(反应堆停堆后 10 d); 25(反应堆停堆后 > 10 d)
食品/牛奶/水/海产品限制	OIL7	地面沉积剂量率/ $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$	1
	OIL8	食品/牛奶/水/海产品中放射性核素浓度/ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	1000( $^{131}\text{I}$ ) 200( $^{137}\text{Cs}$ )

的应急行动水平和用于确定防护行动的操作干预水平更是关键。

目前我国还没有专门针对核动力船舶这种设计、运行和管理特点的核设施的应急准备与响应导则或标准。对于核动力船舶,首要的任务是在核动力船舶研发建造的过程中,同步建立核动力船舶应急准备与响应体系的准则,并使其相互促进发展,才能满足核动力船舶研发建造的需求。

参考文献:

- [1] HAD 002/01-2010. 核动力营运单位的应急准备和应急响应[S]. 2010.
- [2] HAB · J0073-2003. 研究堆应急计划标准审查大纲[S]. 2003.
- [3] NEI 99-01 Rev.5. Methodology for development of emergency action levels[S]. 2008.
- [4] NEI 99-01 Rev.6. Development of emergency action levels for non-passive reactors[S]. 2012.
- [5] EPR-NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor[S]. 2013.
- [6] No.GSG-2. Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency[S]. 2011.
- [7] IAEA-TECDOC-955. Generic assessment procedures for determining protective actions during a reactor accident[S]. 1997.

(责任编辑:刘胜吾)