

# 大型核动力船舶应急计划区分区策略研究

于红, 程诗思, 吴怡睿, 李兰

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, 四川 成都  
Email: appleinchina@163.com

收稿日期: 2021年3月14日; 录用日期: 2021年4月3日; 发布日期: 2021年4月16日

## 摘要

本文基于一个设计热功率为百兆瓦级客货两用商船的研究, 提出了通过划分恰当的应急计划区消除公众担心、推动我国大型核动力船舶建造的建议。研究重点针对因大型核动力船舶船体大、船外范围广造成的受大船核或事故威胁的人群复杂的特性, 提出了在船上划分预防行动计划区和紧急行动计划区, 在我国管辖陆域和海域划分紧急行动计划区、扩展计划距离、摄入和商品计划距离, 在公海划分应急警戒距离的建议。

## 关键词

核动力船舶, 大型船舶, 应急计划区, 船上应急计划区, 我国管辖陆域和海域应急计划区, 公海应急计划区

# Research on the Partition of Large Nuclear Power Ship Emergency Planning Zone Partition Strategy

Hong Yu, Shisi Cheng, Yirui Wu, Lan Li

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan  
Email: appleinchina@163.com

Received: Mar. 14<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2021; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on a study of a merchant ship designed for both passenger and cargo use with thermal power of one million megawatts, this paper proposes a proposal to eliminate public worries by

partitioning appropriate emergency planning zones and promote the construction of large nuclear-powered ships in China. The research focuses on the characteristic of complex crowds exposed to nuclear and radiation threat from large nuclear power ship due to its large hull and wide range out of ship, and puts forward the proposal to divide a precautionary action planning zone and an urgent action planning zone on ship, to divide an urgent action planning zone, an extended planning distance and an ingestion and commodities planning distance in China's territorial land and territorial seas, and to divide an emergency cautionary distance in high seas.

## Keywords

Nuclear Power Ship, Large Ship, Emergency Planning Zone (EPZ), EPZs on Ship, EPZs in China's Territorial Land and Territorial Seas, EPZ in High Seas

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前世界上只有美国、德国、日本和俄罗斯这 4 个国家拥有或曾经拥有过核动力商船,但美国、德国和日本这 3 个国家各自在上个世纪 70 年代建造了一艘核动力商船后都因公众的担心而没有开展后续的建造计划,因此核动力商船核事故应急相关研究也都随之处于停滞状态,包括应急计划区(EPZ) [1]。

随着技术的进步,确保核动力装置核与辐射安全的技术和管理水平都有了很大的提高,消除公众担心、建造大型核动力船舶、充分发挥其近乎无限续航能力的强大优势是目前世界各国船舶建造行业的紧迫需求[2]。另外,随着核与辐射安全宣传的普及和深入,公众逐渐认识到核动力装置与其他动力装置一样都存在着对人员安全的潜在威胁,针对其特有的核与辐射威胁建立充分而有效的应急准备能最大程度地减小甚至避免这种威胁。

在以往的公众认知中,被划入 EPZ 内的公众是受到威胁的,没被划入的是安全的,但人们逐渐认识到,无论是否被划入 EPZ,公众离核设施的距离总是一定的,从这个角度考虑,那些被划入 EPZ 的公众由于在该区域建立了充分而有效的应急准备,特别是对确保公众安全和健康的防护行动才是安全的。EPZ 是在应急准备阶段确定的、在应急响应期间对核设施场外公众采取恰当防护行动的区域。在核设施周围划分良好的 EPZ 不仅能实现避免或减小公众遭受来自核设施的核与辐射威胁的应急响应目标,还能获得良好的社会效益,因为实践表明针对群体的防护行动往往比针对个体的更容易被公众接受,在技术和管理上也更可行。另外,对于核动力船舶,只有设计热功率达到几百甚至上千兆瓦才能更好地体现其无限续航能力的强大优势。

因此,本文提出了适用于设计热功率为百兆瓦级客货两用商船(以下简称“大船”),具有船体大、功能分区多、舱室多且分多层布置、人员承运量大且组成复杂这些特性的大船 EPZ 的划分建议,为消除公众担心、推动我国大型核动力商船的建造提供依据。

## 2. 大船 EPZ 划分的前期准备

IAEA 于 2015 年印发的一般安全要求 No.GSR Part7 提出了 5 个应急准备类别并给出了适用核设施的示例,其中包括 EPZ 的建议[3]: ① 类别 I, 核电厂等; ② 类别 II, 研究堆、核动力推进船舶或潜艇等; ③ 类别 III, 工业辐照、医院等; ④ 类别 IV, 核或放射性材料运输、移动危险源等; ⑤ 类别 V, 受其

他辖区类型 I 或 II 污染, 因此有人据此提出了“大船是核动力推进船舶可以按照应急准备类别 II 开展应急准备, 仅需在船外划分紧急防护行动计划区(UPZ)、扩展计划距离(EPD)、摄入和商品计划距离(ICPD)这 3 个 EPZ”的观点, 但应急准备类别 II 和类别 I 通常以 100 MW 设计热功率(Pth)为界, 类别 I 又以 1000 MW Pth 为界分为  $P_{th} \geq 1000$  MW、 $100 \text{ MW} \leq P_{th} < 1000$  MW 2 种情况[4], 因此又有人据此提出了“大船的应急准备至少要达到类别 I 第 2 种情况( $100 \text{ MW} \leq P_{th} < 1000$  MW 核电站)的水平, 除了在船外划分 UPZ、EPD、ICPD 这 3 个 EPZ 以外, 还应划分预防行动区(PAZ)”的观点, 似乎这个观点看起来更加合理, 但实际上这 2 个观点都没有从大船是否具有划分 EPZ 的需求以及具有划分怎样的 EPZ 需求出发。

EPZ 的作用是为了组织那些受到类似事故、类似威胁、类似后果的人群采取类似的防护行动, 与其他所有类型的核设施都相同, 大船同样要在充分的威胁评定的基础上根据可能遭受大船事故威胁的人群以及这些人群是否具有采取防护行动的需求划分 EPZ, 国际上通用的 EPZ 划分方法同样适用于大船, 也就是说, 大船也可以通过以下 2 个步骤划分 EPZ: ① 步骤一: 选择事故, 计算事故所致裂变产物场外释放源项(以下简称“场外释放源项”); ② 步骤二: 根据场外释放源项、场外环境参数[5], 计算场外不同位置的个人预期剂量, 并将这些预期剂量与应急照射防护准则(以下简称“防护准则”)中对应的剂量限值进行比较, 预期剂量达到和超过剂量限值的位置即划为 EPZ。其中, 步骤一的作用是识别大船可能会发生的事故, 并在这些事故中筛选出会对场外人群的安全或健康造成威胁的那些事故。步骤二的作用是识别可能会遭受大船事故威胁的场外人群, 并在这些人群中筛选出具有采取防护行动需求的人群[6]。然而, 大船独有的设计特性和运行环境特性决定了它的“场区”和“场外人群”与核电站等固定式陆上核设施有显著的不同。因此, 在开展具体的场外释放源项和预期剂量计算以论证大船是否具有划分 EPZ 的需求以及具有划分怎样的 EPZ 需求之前, 先要明确大船的“场区”和“场外人群”。

根据大船船体大、功能分区多、舱室多且分多层布置的特性, 将维持大船核动力推进装置作业所必须的系统、设备、部件以及相关作业人员所处舱室的最外围实体边界以内的船上区域视为“场区”, 并定义为“涉核区”[7]。大船的涉核区与核电站的场区在功能和布置上具有非常大的相似性, 但这也直接造成了大船的“涉核区外”与核电站“场外”的不同。首先, 大船的涉核区外既包括船上也包括船外, 船外既包括陆域也包括海域, 海域既包括我国管辖海域也包括公海。其次, 大船的涉核区外是舱室, 船外才是自然环境。由此可见, 对于大船, 涉核区外船上区域、我国管辖陆域和海域、公海都可能具有划分 EPZ 的需求, 因此步骤一要给出大船的涉核区外释放源项(从大船涉核区最外围实体边界释放的 FP 源项)的计算结果[8]。但由于大船的涉核区与核电站的场区在功能和布置上具有非常大的相似性, 这就使得大船的涉核区外释放源项计算与核电站的场外释放源项计算不会有显著的差别。目前, 国际上普遍认可通过概率安全分析(PSA), 基于堆芯损伤频率(CDF)和大量释放频率(LRF)选择计算场外释放源项的事故, 研究中也使用了这样的方法, 唯一的区别是大船的 PSA 额外考虑了摇摆、碰撞、触礁等海上特有的外部始发事件[9]。因此, 研究中并没有将步骤一作为大船 EPZ 划分的研究重点。

研究中根据大船人员承运量大且组成复杂的特性, 将船上人员分为 3 类[10] [11]: ① 辐射工作人员, 即受大船营运单位雇用并从中受益(如, 薪资)的、涉核区外船上区域作业的工作人员, 如, 大船应急时正在反应堆舱、核辅舱、汽轮机舱、反应堆控制舱等舱室内作业的工作人员; ② 一般工作人员, 即受大船营运单位雇用并从中受益的、辐射工作人员以外的其他人员; ③ 船上公众, 即不受大船营运单位雇用且没有从中受益的人员。对于一般工作人员, 考虑到他们在受雇用时并没有遭受额外辐射照射的计划, 研究中假设一般工作人员使用与船上公众相同的防护准则。对于辐射工作人员, 考虑到他们在大船应急时可能仍需继续坚守岗位, 自动转为应急人员, 研究中假设转为应急人员的那部分辐射工作人员使用应急人员的防护准则, 其余的辐射工作人员也使用与船上公众相同的防护准则。另外, 研究中根据大船具有移动性的特性, 将船外公众分为 2 类: ① 大船停靠港周围我国管辖陆域和海域(以下简称“我国管辖陆

域和海域”)公众,其中,停靠港涉及建造港、试验港、母港、寄泊港、事故地就近港等,我国管辖海域指我国领海基线 200 海里以内的海域,包括内海、领海、毗邻区、专属经济区;② 公海公众,即我国领海基线 200 海里以外海域的公众。考虑到我国管辖陆域和海域与公海相比,人口数量更多且分布更密集,渔业和娱乐等资源利用更丰富,出现在大船周围的船只、海洋工程、航空器等数量更多、组成更多样且出现的随机性更小,研究中要对我国管辖陆域和海域、公海使用不同的 EPZ 划分方法。由此可见,对于大船,步骤二要分别对涉核区外船上各舱室、我国管辖陆域和海域不同位置、公海不同位置的预期剂量都进行计算才能论证哪些区域具有划分 EPZ 的需求以及具有划分怎样的 EPZ 需求。因此,研究中将步骤二作为大船 EPZ 划分的研究重点。

### 3. 用于大船 EPZ 划分的剂量准则

我国现行的用于核设施场外 EPZ 划分的剂量准则是国家标准 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本安全标准》中的“急性照射的剂量行动水平”和“应急照射情况下的通用优化干预水平和行动水平”[12],但考虑到该准则与目前国际上最先进的准则相比存在着使用可防止剂量作为测量量不利于使用、没有明确测量量计算的照射途径和照射时间、剂量限值没有充分体现事故进展与防护行动关系等问题[13],研究中确定了用于大船 EPZ 划分的剂量准则,见如表 1。

表 1 的剂量准则参照 IAEA 一般安全要求 No.GSR Part7 中的“适用于短期内所受剂量并预期在应急中任何情况下为避免或最大限度减少严重确定性效应应采取防护行动和其他响应行动的一般准则”和“在应急中为降低随机性效应风险所采取的防护行动和其他响应行动的一般准则”确定,差别是没有将 AD<sub>胎儿</sub>、AD<sub>组织</sub>、H<sub>胎儿</sub>作为测量量。

Table 1. Dose criterion used in the partition of large ship EPZ  
表 1. 用于大船 EPZ 划分的剂量准则

防护目标	剂量准则			防护行动 <sup>②</sup>	EPZ	
	测量量 <sup>①</sup>	剂量限值	照射途径			
避免或减小严重确定性健康效应	AD <sub>红骨髓</sub>	1/Gy (<10 h)	外照射	预防性紧急防护行动	撤离(掩蔽/控制误摄入) 去污(控制误摄入)	PAZ
	AD <sub>皮肤</sub>	10/Gy (<10 h)				
避免或减小随机性健康效应风险	H <sub>甲状腺</sub>	50/mSv (前 7 d)	内照射	紧急防护行动	服碘(控制误摄入)	UPZ
	E <sub>紧急</sub>	100/mSv (前 7 d)	外照射/内照射			
	E <sub>早期</sub>	100/mSv (前 1 a)	外照射/内照射	早期防护行动	临时避迁(控制误摄入)	EPD
	E <sub>食物链</sub>	10/mSv (前 1 a)	内照射	/	防止食品/水/商品被污染/摄入/使用	ICPD

注: ① 测量量中, AD 为平均相对生物效应(RBE)加权吸收剂量, H 为甲状腺当量剂量, E<sub>紧急</sub>、E<sub>早期</sub>、E<sub>食物链</sub>为有效剂量; ② 防护行动中, 括号外的行动是测量量达到相应剂量限值时要立即采取的防护行动, 括号内的行动是在采取括号外的行动时还要同时采取的行动。

### 4. 用于大船 EPZ 划分的假想事故序列

研究中选择了一个以大破口失水事故(LOCA)为始发事件、造成 CDF  $\geq 10^{-5}$ /(堆·年)但“涉核区外” LRF  $\leq 10^{-6}$ /(堆·年) [14]的假想事故序列, 参照美国先进轻水反应堆(ALWR)用户要求文件(URD)中用于美国 ALWR 应急计划的补充概率安全分析方法, 计算了大船的涉核区外释放源项, 并依此源项分别计算了涉核区外船上各舱室、某一假想停靠港周围我国管辖陆域和海域不同位置表 1 中的 6 个测量量, 确定了大船的涉核区外船上 EPZ、我国管辖陆域和海域 EPZ。但是, 研究中并没有对公海 EPZ 进行计算。

用于划分大船 EPZ 的假想事故序列基于唯一获得美国核管理委员会(NRC)设计认证证书的 Gen III+ 型核电机组 AP1000 的以下概率安全分析结果[15]:



1) AP1000 三级 PSA 显示: 剂量风险的主导裂变产物释放组是安全壳旁通(BP)和安全壳早期失效(CFE), 分别占总剂量风险的 78.6%和 17.3%。

2) AP1000 二级 PSA 显示: LRF 的主导裂变产物释放组是 BP 和 CFE, 分别占总 LRF 的 54%和 38%, 其中, BP 的主导堆芯损伤事故序列是“反应堆冷却剂系统高压(未能紧急停堆的预期瞬态或安全壳内的主蒸汽管道破裂)”和“蒸汽发生器传热管破裂或界面 LOCA 造成的安全壳旁通”, 分别占总 LRF 的 20.9%和 19.4%; CFE 的主导堆芯损伤事故序列是“反应堆冷却剂系统完全降压”和“反应堆冷却剂系统部分降压(不包括大破口 LOCA 的 LOCA)”, 分别占总 LRF 的 13.7%和 10.5%。

3) AP1000 一级 PSA 显示: CDF 的主导堆芯损伤事故序列是“反应堆冷却剂系统完全降压”和“反应堆冷却剂系统部分降压(不包括大破口 LOCA 的 LOCA)”, 分别占总 CDF 的 33.4%和 24.8%; CDF 的主导始发事件是安注管破裂和大破口 LOCA, 分别占 CDF 的 39.43%和 18.66%。

可见, 以大破口 LOCA 为始发事件、造成堆芯损伤和安全壳早期失效的事故序列同时是 CDF、LRF、剂量风险的主导贡献。实际上, 将以大破口 LOCA 为始发事件的堆芯损伤事故系列用于划分 EPZ 也是我国核电厂普遍使用的方法。

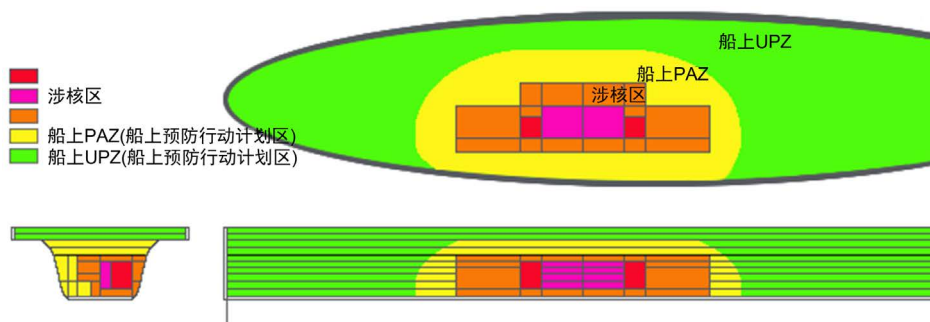
用于大船 EPZ 划分的假想事故序列与 AP1000 基本相同, 计算时使用了大船的参数。另外, 研究中还计算了这个假想事故序列的 CDF 和“涉核区外”LRF, 以验证是否满足  $CDF \geq 10^{-5}/(\text{堆} \cdot \text{年})$  但“涉核区外” $LRF \leq 10^{-6}/(\text{堆} \cdot \text{年})$  的要求。

## 5. 大船 EPZ 的划分结果

研究中对大船的各 EPZ 重新进行了定义, 以说明各 EPZ 的防护目标、防护行动的启动条件、与事故进展的关系等。因此, 大船的各 EPZ 定义与 IAEA 一般安全要求 No.GSR Part7 中的对应定义有所不同, 但这样更符合大船的工程实际。

### 5.1. 涉核区外船上 EPZ

涉核区外船上 EPZ, 见图 1。



注: 图中的红色、粉色、橘色都是涉核区, 表示从大到小的辐射强度。

Figure 1. EPZ out of Nuclear-Involved area on ship diagrammatic chart

图 1. 涉核区外船上 EPZ 示意图

从图 1 可以看出, 要在大船的涉核区外船上区域划分船上 PAZ、船上 UPZ 这 2 个 EPZ, 这由以下的计算结果确定:

1) 大船涉核区外的一部分舱室(图 1 中黄色区域)或  $AD_{\text{红骨髓}} \geq 1 \text{ Gy}$  或  $AD_{\text{皮肤}} \geq 10 \text{ Gy}$ , 也就是说, 这些舱室内的人员可能受到来自大船事故所致的死亡或功能丧失这样的确定性健康效应的威胁, 这一群人具有采取预防性的撤离或去污这样的紧急防护行动的需求, 因此要将这些舱室确定为 PAZ。

2) 大船 PAZ 外的所有舱室(图 1 中绿色区域)或  $H_{\text{甲状腺}} \geq 50 \text{ mSv}$  或  $E_{\text{紧急}} \geq 100 \text{ mSv}$ , 也就是说, 这些舱室内的人员可能受到来自大船事故所致的癌症或遗传疾病这样的随机性健康效应的威胁, 这一群人具有采取服碘或撤离这样的紧急防护行动的需求, 因此要将这些舱室确定为 UPZ。

研究中将船上 PAZ、船上 UPZ 分别定义为:

1) 船上 PAZ, 即船上预防行动计划区, 是为避免或减小涉核区外船上人员遭受严重确定性健康效应, 基于核动力推进装置及其相关设施状态, 在放射性物质向船上涉核区外区域释放前或释放后的短期内, 采取紧急防护行动的预防性计划区。这里的“预防性”是指对船上 PAZ 内的人员采取防护行动的决策是基于大船的应急状态分级, 而不是实际的预期或已经发生的剂量达到或超过了防护准则中的剂量限值。

2) 船上 UPZ, 即船上紧急行动计划区, 是为避免或减小涉核区外船上人员遭受随机性健康效应风险, 基于船上涉核区外区域环境监测或酌情考虑核动力推进装置及其相关设施状态, 在放射性物质向船上涉核区外区域释放期间, 采取紧急防护行动的条件性实际计划区。这里的“条件性实际”是指对船上 UPZ 内的人员采取防护行动的决策是基于实际的预期或已经发生的剂量达到或超过了防护准则中的剂量限值。

## 5.2. 我国管辖陆域和海域 EPZ

在大船的停靠港周围划分船外 UPZ、船外 EPD、船外 ICPD 这 3 个 EPZ, 这由以下的计算结果确定:

1) 停靠港周围一定范围内或  $H_{\text{甲状腺}} \geq 50 \text{ mSv}$  或  $E_{\text{紧急}} \geq 100 \text{ mSv}$ , 也就是说, 这一范围内的公众可能受到来自大船事故所致的癌症或遗传疾病这样的随机性健康效应的威胁, 这一群公众具有采取服碘或撤离这样的紧急防护行动的需求, 因此要将这一范围确定为 UPZ。

2) 停靠港周围一定范围内  $E_{\text{早期}} \geq 100 \text{ mSv}$ , 也就是说, 这一范围内的公众可能受到来自大船事故所致的癌症或遗传疾病这样的随机性健康效应的威胁, 这一群公众具有采取临时避迁这样的早期防护行动的需求, 因此要将这一范围确定为 EPD。

3) 停靠港周围一定范围内  $E_{\text{食物链}} \geq 10 \text{ mSv}$ , 也就是说, 这一范围内的公众可能受到来自大船事故的癌症或遗传疾病这样的随机性健康效应的威胁, 具有对这一范围内的农业、渔业、食品、商品生产和消费等进行限制的需求, 因此要将这一范围确定为 ICPD。

另外, 需要说明的是, 在确定我国管辖海域 EPZ 时将步骤一得到的涉核区外释放源沿着假想的大船航行轨迹视作了“线源”, 这是由大船的流动性决定的, 且整个轨迹覆盖了具有不同海洋气象条件的内海、领海、毗邻区、专属经济区 4 个海域, 但由于没有获取到全面的海洋气象数据, 因此在步骤二的计算中每个海域都只使用了一套海洋气象数据。

研究中将船外 UPZ、船外 EPD、船外 ICPD 分别定义为:

1) 船外 UPZ, 即我国管辖陆域和海域紧急行动计划区, 是为避免或减小停靠港周围我国管辖陆域和海域公众遭受随机性健康效应风险, 基于船外陆域或海域环境监测, 在放射性物质向船外释放期间, 采取紧急防护行动的条件性实际计划区。

2) 船外 EPD, 即我国管辖陆域和海域扩展计划距离, 是为避免或减小停靠港周围我国管辖陆域和海域公众遭受随机性健康效应风险, 在应急准备阶段仅对陆域或海域环境监测做出有限安排, 在放射性物质向船外释放期间才被识别, 并采取早期防护行动的条件性实际计划区。

3) 船外 ICPD, 即我国管辖陆域和海域摄入和商品计划距离, 是为避免或减小停靠港周围我国管辖陆域和海域公众遭受随机性健康效应风险并减轻因分发、销售、消费被污染食品和其他商品引起的非放射性后果, 基于陆域或海域环境监测, 在放射性物质向船外释放期间或释放结束后的一段时间内才被识别, 并采取防护行动的条件性实际计划区。

### 5.3. 公海 EPZ

大船在公海航行时海域不确定、海洋气象条件不同,受来自大船的放射性物质释放直接影响的船只、海洋工程、航空器等又存在较大随机性,预先确定像我国管辖海域那样的 EPZ 显然不现实,因此研究中同时借鉴了环境影响评价中使用的“大气环境防护距离”、海上交通安全中使用的“船舶最近会遇距离”的概念,提出了在公海仅设置一个应急警戒距离(ECD)的建议,并将其定义为“公海 ECD”。

公海 ECD,即公海应急警戒距离,是为避免或减小公海公众健康威胁,即严重确定性健康效应和随机性健康效应风险,基于核动力推进装置及其相关设施状态、船上舱室辐射监测,特别是放射性流出物监测,或酌情考虑海洋气象环境,在放射性物质向船外释放前或释放后的短期内,采取紧急防护行动的预防性计划区。

另外,需要说明的是,公海 ECD 虽是船外 EPZ,但考虑到大船在我国管辖海域和公海放射性物质向船外的释放方式不同,仍将其定义为预防性计划区。在我国管辖海域,救援难度小、船上人员可随时弃船撤离,为了尽可能保护船外公众,一般不会主动向船外排放放射性物质,放射性物质向船外的释放主要是密封性失效的泄漏释放。在公海,救援难度大、大船附近船只等可随时撤离、大船也可避让,为了尽可能减小船上污染范围、尽可能保护船上人员,一般会主动、可控地向船外排放放射性物质,大船附近船只的防护行动最好在放射性物质向船外释放前或释放后的短期内实施,因此将公海 ECD 定义为预防性计划区,且可直接将我国管辖海域 UPZ 的最大范围作为公海 ECD 的范围。

## 6. 结论

大型核动力船舶是一种集百兆瓦级反应堆、移动式辐射源、海上交通工具于一体的核设施,但无论是那一类只具上述单一特性的核设施,目前的 EPZ 划分都没有达成普遍的一致,这使得大船的 EPZ 划分更加困难。本文参照目前被国际上普遍认可的、较为先进和成熟的 EPZ 划分方法,重点针对因大船船体大、船外范围广造成的受大船事故威胁的人群复杂的特性,分别提出了船上、我国管辖陆域和海域、公海 EPZ 的划分建议,为后续的工程实践奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 伍赛特.核动力舰船发展前景展望[J].节能,2019,38(3):117-120.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA) (2015) Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency: No. GSR Part 7. IAEA, Vienna.
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA) (2013) Actions to Protect the Public in an Emergency Due to Severe Conditions at a Light Water Reactor: EPR-NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS 2013. IAEA, Vienna.
- [5] 徐立,徐楚,方军庭,等.大型民用核动力船舶外部环境参数设计标准研究[J].船舶标准化工程师,2014,47(3):12-17.
- [6] 王光源,刘建东,张尧卿,等.海上遇险目标漂移与搜寻区域优化确定分析[J].舰船电子工程,2017,37(12):21-24.
- [7] 鲁永杰.核舰船核事故应急体系中的海上应急状态[J].海军医学杂志,2000,21(4):291-293.
- [8] 马晓林,寿宇强,魏余东,等.核动力潜艇核应急救援中的若干问题研究[J].辐射防护通讯,2003,23(3):10-13.
- [9] 张永发,丁浩,赵新文,等.舰船核动力安全目标及其量化技术研究[J].核科学与工程,2019,39(2):253-259.
- [10] 于红,李兰,程诗思,杨舒琦.大型核动力船舶船员剂量评价体系研究[J].核动力工程,2018,39(6):126-131.
- [11] 潘自强,周永增,周平坤,等.国际放射性委员会第103号出版物 国际放射防护委员会2007年建议书[M].北京:原子能出版社,2018.
- [12] 许明剑,余刃,寿宇强,等.核舰船核事故应急救援行动要点研究[J].科技视野,2015(22):138-140.

- [13] 于红, 刘咏梅. 国内外核电厂应急照射情况下干预准则与 IAEA 相关导则的比较[J]. 核动力工程, 2015, 36(3): 50-53.
- [14] International Atomic Energy Agency (IAEA) (1999) Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: INSAG-12. IAEA, Vienna.
- [15] 孙汉虹, 等, 编著. 第三代核电技术 AP1000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.