

# 海洋核动力平台核事故应急监测策略研究综述

黄燕<sup>1,2</sup>, 邹树梁<sup>1,2\*</sup>, 张敏<sup>1</sup>

(1. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学核设施应急技术与装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**综述了国外核事故应急监测策略研究进展,以及我国在核应急监测法规标准、应急监测方法、应急辐射环境监测技术等方面的研究现状,从海洋核动力平台的法规标准、应急监测方案、应急辐射监测项目和应急监测方法4个方面进行了探讨,并提出了制定核应急监测政策及标准规范、建立应急监测预案库、加快研发应急采样与监测方法、建立海洋放射性监测体系等建议。

**关键词:**核事故;应急监测策略;海洋核动力平台;辐射环境监测

中图分类号:X837;X830.7

文献标志码:A

文章编号:1006-2009(2019)05-0006-04

## Overview of Nuclear Accident Emergency Monitoring Strategy on Offshore Nuclear Power Platform

HUANG Yan<sup>1,2</sup>, ZOU Shu-liang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Key Laboratory of Hunan Province of Nuclear Emergency of Safety Technology & Equipment, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** This article reviewed foreign research progress of nuclear accident emergency monitoring strategies and domestic research situation of nuclear emergency monitoring regulations and standards, emergency monitoring methods and technologies. Based on the discussion of offshore nuclear power platform regulations, emergency monitoring programs, emergency monitoring projects and emergency monitoring methods, suggestions were made on formulating nuclear emergency monitoring policies and standard specifications, setting up emergency monitoring plan database, accelerating the research and development of emergency sampling and monitoring methods, establishing a offshore radiation monitoring system.

**Key words:** Nuclear accident; Emergency monitoring strategy; Offshore nuclear power platform; Radiation monitoring

海洋核动力平台是海上移动式小型核电站,是小型核反应堆与船舶工程的有机结合,利用浮动平台建造的核动力装置,能够同时提供电、热、淡水和高温蒸汽等多种产品,灵活地为海上某个区域提供充足的电热能和淡水<sup>[1]</sup>。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》指出要“开展海洋核动力平台等关键核心技术”,2016年1月中船重工申报的海洋核动力平台示范项目工程获得批准。“十三五”期间,我国将建成中国特色先进核工业体系,开发和拟建造20座海上浮动核电

站<sup>[2]</sup>。目前,我国海洋核动力平台发展迅速,相应的核应急技术与能力建设也逐步受到政府部门和核电企业的重视。核应急监测作为核应急技术的重要组成部分,可以为评价事故性质和源项、

收稿日期:2018-09-12;修订日期:2019-07-12

基金项目:国防科技工业核动力技术创新中心“海上核动力平台应急策略研究”基金资助项目(HDLCXZX-2018-HD-016)

作者简介:黄燕(1984—),女,湖南湘潭人,在读博士研究生,从事核安全与核应急研究工作。

\*通信作者:邹树梁 E-mail: zousl2013@126.com

事故对环境的污染程度和范围,以及对公众造成的辐射影响提供参考依据,同时也是应急决策的重要依据<sup>[3]</sup>。因此,开展海洋核动力平台核事故应急监测策略研究很有必要。

## 1 核事故应急监测策略国内外研究进展

### 1.1 国外研究进展

国际原子能机构 (IAEA) 1999 年发布了 IAEA 1092 号报告<sup>[4]</sup>,提供了核与辐射应急监测的通用程序,对制定应急监测计划具有一定的指导意义。2005 年,IAEA 出版了《国际原子能机构安全标准丛书》,对核或放射紧急情况的应急准备与响应作了专门的规定,为核事故应急监测提供了理论基础。经济合作发展组织核能署 (OECD/NEA) 也发布了相关的专题研究报告<sup>[5]</sup>。在应急政策和标准方面,当前除了通用性的国际公约,如《不扩散核武器条约》和《联合国海洋法公约》对海上浮动核电站的建设有总体指导要求外,国际上尚未专门针对海上浮动核电站出台相关政策及标准规范<sup>[6]</sup>。

在海洋核应急监测策略研究方面,国外海上应急监测大多采用固定点在线连续监测和实验室分析测量方法,前者要求监测仪器灵敏度高,后者方法可靠性强,检测项目更全面。上述两种方法互为补充,都能表征某一地区的放射性核素浓度水平、变化情况及与其他区域的差异,且所监测的特征核素都具有被监测区域放射性核素的代表性<sup>[7]</sup>。具体的监测手段包括海底拖曳式  $\gamma$  射线谱仪、安装在潜水艇或遥控无人潜水器 (ROV) 上的  $\gamma$  射线探测系统、海洋浮标监控系统。海底拖曳式  $\gamma$  射线谱仪具有快速、连续监测的优势,是国外海洋监测的通用方法;安装在潜水艇或遥控无人潜水器上的  $\gamma$  射线探测系统用于测量海底物体,是一种较好的海底沉积物连续监测方法,在俄罗斯、美国、日本应用较多;海洋浮标监控系统是针对海岸附近地区的监测系统,常用于沿海地区放射性监控,有助于对核废物向海洋倾倒或沿海核电站向海洋排放放射性物质的监控<sup>[8]</sup>。德国、美国、比利时、希腊、日本和韩国均建立了海洋环境实时监测网体系。德国联邦海事水文局 (BSH) 建立了应用 NaI 谱仪实时测量海水放射性活度的海洋环境监测网,用于对北海和波罗的海的常规与应急海洋放射性监测;美国开发了用于北极地区的放射性核素监测站原型系统;比利时开发了海水放射性活度连续自动监测系

统和监测网;希腊开发了无人值守自动水中放射性活度浓度连续测量的原型系统;日本和韩国在核电站附近水域均配备了水下放射性监测系统,开展常年实时连续监测<sup>[9]</sup>,同时也适用于海上核动力平台的常规与应急海洋放射性核素监测。

### 1.2 国内研究进展

我国针对海洋核动力平台核应急监测策略的研究尚处于探索阶段,今通过综述陆上核电站和海洋辐射环境监测进展,探讨海洋核动力平台的核应急监测策略。我国近海海洋放射性监测工作始于 20 世纪 60 年代,国家部署各沿海省市在渤海、黄海、东海和南海开展海水、沉积物、海洋生物放射性调查工作。目前,我国已基本建成了由国家、省级、部分地市级组成的三级辐射环境监测机构,建立了全国辐射环境监测网络,以生态环境部 (国家核安全局) 为中心,以各省辐射环境监测机构为主体,涵盖部分地市级辐射环境监测机构<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.1 核应急监测的法规标准研究

我国有关核应急监测的法规标准还不完善,至今仍没有专门针对核应急监测的指导性导则和标准。《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011) 虽然对核动力厂 3 000 MW 反应堆液态放射性流出物中<sup>14</sup>C 的年排放控制总量和轻、重水堆气载放射性流出物<sup>14</sup>C、<sup>3</sup>H 的年排放总量作了规定,但对热功率 < 3 000 MW 或 > 3 000 MW 的反应堆没有提出具体的排放控制数值,且对事故环境应急监测的描述较为笼统,主观操作性较强。《核电厂应急计划与准备准则 核电厂营运单位应急野外辐射监测、取样与分析准则》(GB/T 17680.10—2003) 虽然规定了核电厂营运单位核应急监测的一般程序和准则,但是对应急监测未提出详细规定,未对核事故发展的不同阶段所采取的应急监测方法加以区分,缺少对一些重要问题的具体要求和指导<sup>[3]</sup>。国务院新闻办公室 2016 年 1 月 27 日发表了《中国的核应急》白皮书,制定了控制、缓解、应对核事故的工作措施,包括在事故现场和受影响地区开展放射性监测及人员受照剂量监测等,实时开展气象、水文、地质、地震等观(监)测预报,开展事故工况诊断和释放源项分析,研判事故发展趋势,评价辐射后果,判定受影响区域范围<sup>[11]</sup>。

在核应急监测策略方面,黄彦君等<sup>[3]</sup>通过分析核电厂应急监测需要关注的主要问题,以此为基准提出了核电厂应急监测方案。方案要求车载监

测与取样系统应能快速响应;在应急计划中应有必要的接口,接受外单位的帮助;核事故早期以快速监测为主,暂不采样,中后期兼顾快速现场监测和取样监测。

### 1.2.2 应急监测方法研究

目前,我国近岸海域放射性监测采用实验室分析测量方法。海上应急监测采用现场采样-实验室分析方法,实施流程为采样-制样-测量-分析,虽然可以提高监测灵敏度和精确度,但从采样到实验室分析耗时很长,时效性较差。采样时要考虑频次,制样、测量需要消耗时间、人力和物力,整个监测过程对仪器设备、采样量、采样和制样方法的要求较高,某一环节出现疏漏,都会导致监测误差加大<sup>[12]</sup>。

陈晓秋等<sup>[13]</sup>提出,强化应急准备必须贯穿于核动力厂的选址、设计和建造、首次装料、运行和退役的所有活动,关注核事故应急响应的能力建设,如放射性废水向地表水、地下水和海域泄漏的景象及其放射性后果评价,针对核设施厂外环境监测布点的合理性、环境实验室选址在事故条件下的可用性进行再评估。谢骏箭等<sup>[14]</sup>通过在海上放置的固定浮标、在岛屿上布设的陆基监测系统及在巡查船上放置的仪器等采集的数据,使用无线电、卫星与互联网数据交换,组成一个实时在线连续监测系统,对海洋放射性进行连续在线测量。方南娟等<sup>[15]</sup>提出在核事故初始阶段,首选监测介质为海洋上空大气和表层海水,在核事故发展阶段,根据污染源释放和环境受到污染的方向、范围和剂量,监测对象一般以半衰期较长、生物蓄积系数较高的项目为主,监测介质主要为沉积物和生物,建议建设应急移动实验室(车载/船载)配合陆地监测。李志强等<sup>[16]</sup>将无人机大气监测与数值模拟相结合,可以实现垂直方向污染源监测,对应对环境突发事件有一定效果,将其材质和技术加以改良,应用于海洋核动力平台核事故气溶胶监测,可以提高监测和采样的时效性。

### 1.2.3 应急辐射环境监测技术研究

在应急辐射环境监测技术方面,开发了移动式核辐射监测器、水声监测系统、船载海洋放射性实时监测系统、超低空辐射测量探测器等,增强了核辐射预警和监测能力。王燕等<sup>[17]</sup>利用信号检测、信号识别等技术,建立了一套利用国际监测系统水声数据对水下核爆炸定性、定位和当量估算技术,

可应用于舰艇爆炸事故监测。近年来,我国自主研发了船载海洋放射性实时监测系统,能快速有效地对监测船行驶海域的海水放射性超标事件进行监测并发出报警信号,且在核素浓度较高时能很好地分辨出海水中的放射性核素<sup>[9]</sup>。罗中兴等<sup>[18]</sup>利用旋翼式无人机平台挂载机载式 $\gamma$ 谱仪、气溶胶采样器及相关监控设备,对特征金属颗粒物随炸药爆炸后形成的气溶胶进行空中烟云跟踪取样及巡测,测量环境核辐射水平,最大承受风力为6级,通过对爆炸物气溶胶跟踪采样,以及放射性点源探测试验,证明了旋翼式无人机空中气溶胶取样及辐射测量的可行性。然而,将该技术应用于海洋核动力平台核事故放射性核素监测,其可承受的6级风力还过低,且无人机和探测器应为耐辐射材质。

## 2 海洋核动力平台核事故应急监测策略探讨

海洋核动力平台核事故应急监测策略指能够满足海洋核动力平台核事故情况下应急监测需要的方案、方法和程序。海洋核动力平台相较于陆上核电站,环境更复杂,应急资源受限,应急处置更加艰难。当核事故发生时,放射性物质释放并进入大气和海洋环境,因海洋气候等原因快速扩散,对海洋生物和环境迅速造成危害,并且有多种照射来源和途径。今从法规标准、应急监测方案、应急辐射监测项目和应急监测方法4个方面,探讨海洋核动力平台核事故应急监测策略。

海洋核动力平台法规标准的构建应在现有法规文件基础上进行转化,将核应急与常规海洋和海洋船舶应急相结合,比对其与陆上核电站的异同之处,综合考虑建造、调试、运行、停泊、运输和退役等时期核事故的应急辐射监测。

在海洋核动力平台应急监测方案方面,发生核事故后,由于时间紧迫和危险的不确定性,在应急监测的不同阶段应有不同的目的和任务。在事故初始阶段,应根据当时的事故工况(可能的释放源项)和气象(风向、风速、降水)等条件,确定监测重点方位与序列,选择有代表性且能快速监测的项目,首选监测介质为海洋上空大气和表层海水。在事故发展阶段,根据污染源释放和环境受到污染的方向、范围和剂量,监测对象一般以半衰期较长、生物蓄积系数较高的项目为主,以全面掌握事故对整个生态系统的影响,监测介质主要为沉积物和生物。海水中的颗粒物会吸附具有颗粒活性的放射

性核素,然后沉降到海底沉积物中。此外,放射性核素还会通过食物链在生态系统传递与蓄积<sup>[19]</sup>。

海洋核动力平台坐落在海上,离陆地有一定距离,因而可以忽略土壤监测。海洋核动力平台应急辐射监测项目侧重于空气吸收剂量率监测、空气监测、水体监测和海洋生物监测,根据应急准备和响应的要求和目的,分为事故早期监测和事故中后期监测。在事故早期,需要对事故快速响应,了解事故的污染程度和范围,选取最具代表性且检测方法简便的项目进行监测;在事故中后期,需要对事故进行环境影响评价和事故后果分析,辐射监测项目主要是半衰期较长、生物蓄积系数较高的核素<sup>[15]</sup>。目前,监测空气吸收剂量率较为先进的设备为配备自动气象观测装置的自动监测站,可对风向、风速、温度、湿度、气压、雨量、感雨连续监测。空气监测侧重于空气中气溶胶、气态放射性碘同位素和沉降物的监测。水体监测主要针对海水、海底沉积物、海滩涂潮间带土和潮下带土。海洋生物监测一般针对海鱼、带鱼、海虾、松针、牡蛎,主要监测项目包括有机结合氚、<sup>54</sup>Mn、<sup>58</sup>Co、<sup>60</sup>Co、<sup>131</sup>I、<sup>239</sup>Pu、<sup>65</sup>Zn、<sup>137</sup>Cs、<sup>134</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr、<sup>60</sup>Cr、<sup>14</sup>C、<sup>110m</sup>Ag、<sup>95</sup>Zr、<sup>124</sup>Sb等<sup>[20]</sup>。

在海洋核动力平台应急监测方法方面,考虑到事故的突发性和特殊性,采用的采样和测量技术应具备快速、灵活和适用的特点,特别是在事故早期。在采样方面,应根据应急预案、接收的指令和现场实际情况,充分考虑采样量、采样频次、采样位置和范围,合理选择路线,在定性的基础上定量设计。采集的样品可在现场使用便携/移动式仪器分析,或利用样品筛选技术,将高于某一确定水平的样品运回实验室进一步分析。可借鉴国内外海洋放射性核素监测方法,将固定点在线连续监测与实验室分析测量方法相结合,准确、全面地表征核事故周边海域的放射性核素浓度水平、变化情况及与其他区域的差异,所选择的特征核素应是监测区域具有代表性的放射性核素。对于核事故条件下的水下辐射监测,可以 $\gamma$ 射线和中子辐射监测为主,利用水下 $\gamma$ 能谱仪,对沉入海底的各类核设施进行长期监测,用以提供核泄漏早期预警,以及对海区采样点的优化<sup>[21]</sup>。水下 $\gamma$ 射线监测通常采用海水采样监测和探测器直接测量两种方法,前者通过船只或飞机对核泄漏海区不同区域和不同深度的海水采样,然后在船载实验室或岸上实验室测量分析;后者通过船载或安装在核泄漏海区的水下辐射探

测器,对海区的辐射状况直接监测。

### 3 结语与展望

海洋核动力平台是中国首创技术<sup>[22]</sup>,国内外关于海洋核动力平台核事故应急监测策略的研究尚处于探索阶段。结合国内外核事故应急监测法规标准、应急监测方法、应急辐射环境监测技术,考虑海洋核动力的特殊环境,我国海洋核动力平台核应急监测策略可以在以下几个方面开展进一步研究。

(1) 结合海洋、海洋船舶和核动力平台已有的国内外法规标准,制定一套专门针对海洋核动力平台核应急监测的政策及标准规范。

(2) 在应急准备阶段,根据各种可能的事故工况和气象、环境条件等,建立适用于不同情况的应急监测预案库,保证在事故发生时能快速选择合适的应急监测方案。

(3) 目前,我国近岸海域放射性监测采用单一的实验室分析测量方法,从采样到实验室分析耗时长、误差率高、应急性差。可借鉴国外先进的海洋监测技术,加快研发和优化应急采样与监测方法,包括提高应急监测准确度的方法、快速监测分析方法、应急监测仪器分析方法等<sup>[3]</sup>。

(4) 海上核动力平台若发生核事故,则事故发生速度很快,大风和洋流等影响使放射性核素快速扩散,对海洋生物和环境迅速造成危害。因此,有必要建立海洋放射性监测体系,通过设立海上固定浮标、岛屿上的陆基监测系统、船载海洋放射性实时监测系统、无人机监测系统,通过无线电远程传输、卫星传输与互联网数据交换,组成一个实时在线连续监测系统,对海洋放射性连续在线测量,对海洋核动力平台周边海域长期监测,在发生核泄漏时第一时间发现并及时报警。

#### [参考文献]

- [1] 王玮,刘聪,陈智,等. 浮动式核电站载体初步技术方案研究[J]. 科技视界,2015(36):37-38.
- [2] 中广核. 中国启动海上核电站实验堆建设 可为海岛供电[EB/OL]. [2016-11-04]. [http://news.ifeng.com/a/20161104/50206827\\_0.shtml](http://news.ifeng.com/a/20161104/50206827_0.shtml).
- [3] 黄彦君,孙雪峰,陶云良,等. 核电厂应急监测策略[J]. 环境监测管理与技术,2011,23(1):13-19.
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). Generic procedures

(下转第15页)