

海上浮式核电站温排水对海洋生态环境的影响

兰志刚, 李新仲, 肖 钢, 刘 聪

(中海油研究总院, 北京 100028)

摘要: 开发海上浮式核电站, 可以有效地解决海洋工业的用能需求, 符合国家能源发展战略。海上核电冷却循环系统产生的温排水会对海洋环境本体及其生态系统产生一定的负面影响, 是环评工作关注的重点。论述了海上核电站温排水的特点, 分析了其对受纳海域水文条件、海水水质、生态环境、生物群落组成与结构等方面产生的影响, 提出了温排水的热污染控制对策。

关键词: 海上浮式核电站; 温排水; 海洋环境影响

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)06-0084-05

doi: 10.11759/hyqx20151008004

发展核电是节能减排、减少温室气体排放、实现经济和生态环境协调发展的有效途径, 更是世界强国满足能源需求、优化能源结构、保障能源安全、促进经济可持续发展的重要战略举措。由于核电厂址的选择条件极其严格, 且核电厂运行需要大量冷却水作为最终热阱, 建设运行于海上的浮式核电站便成为发展核电的一个有效途径。

海上浮式核电站具有很好的海域适应性与灵活的移动性, 由于其远离大陆本土, 即便发生核物质泄漏事故, 也不会对大陆本土产生核污染, 引发严重生态危机。同时, 由于海洋是天然的无限热阱, 置身于海洋之中的海上核电站不会发生失水, 可有效地避免融堆事故的发生。俄罗斯几年前就开始研制浮式核电站, 它的第一座在建浮动核电站取名为“罗蒙诺索夫号”, 它可以装载 2 座 35MW 的 KLT-40S 反应堆, 为偏远的俄远东地区提供亟需的电力来源。美国也对浮式核电站表现出了浓厚兴趣。麻省理工学院核科学与工程学院波恩基诺博士的研究团队, 设计了一个可以抵挡地震和海啸的漂浮核电站方案。该方案采用海上石油勘探平台技术, 可以有效抵挡住地震和海啸的袭击。图 1 分别为俄罗斯的“罗蒙诺索夫号”海上核电船和美国麻省理工学院的海上浮式核电平台的概念设计图。我国有关部门对海上浮式核电站的设想非常重视, 一些设计研究单位也开始了相关技术研究工作, 特别是针对渤海油田核电供电的可行性开展了大量前期研究。

海上核电厂在运行期间, 会对海洋环境产生一定的影响。其中冷却循环系统产生的温排水会对海域水文条件、海水水质、生态环境、生物群落组成

与结构等多个方面产生影响^[1-2]。由于核电热效率低于火电, 会排放更多废热到周围环境中, 因此核能电厂的热污染更突出, 对环境的影响也更大。例如坐落在美国佛罗里达州比斯坎湾的一座核电站, 其排放的温排水使附近水域水温增加了 8℃, 导致了 1.5 km 海域内生物消失。因此, 除放射性影响外, 海上核电站的温排水也将成为海上核电项目环境影响评价的重点^[3-4]。渤海是我国海洋经济活动密集区, 也是我国唯一的半封闭型内海, 在我国海洋生态系统中具有重要作用和独特的功能。由于其封闭性强, 水交换周期长, 环境承载能力较弱, 面临着巨大的环境压力。为此, 搞清海上浮动核电温排水对渤海海洋生态环境的潜在影响, 是确保在渤海海域科学开发和利用海上核能的必要条件之一。

1 海上核电温排水特点

由工厂排入受纳水体且温度比受纳水体环境温度高的冷却水也称之为温排水。核电站发电时其核裂变能仅有少部分变成了电能, 其余大部分核裂变能则变成了热能。因此, 核电厂在运行过程中将有大量的废热通过冷却系统以温排水的形式被释放到水

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-12-01

基金项目: 中科华核电技术研究院有限公司委托项目(20150T-004); 中海石油有限公司综合科研课题(YXKY-2014-ZY-07-MR- PMT-013)

[Foundation: Program Entrusted by China Nuclear Power Technology Research Institute, No. 20150T-004; Research Program of China National Offshore Oil Co., No.YXKY-2014-ZY-07-MR- PMT-013]

作者简介: 兰志刚(1963-), 男, 山东青岛人, 教授级高级工程师, 注册环评工程师, 博士, 从事海洋工程环境、环境影响评价和新能源应用研究工作, 电话: 010-84522243, E-mail: lanzhg@cnooc.com.cn

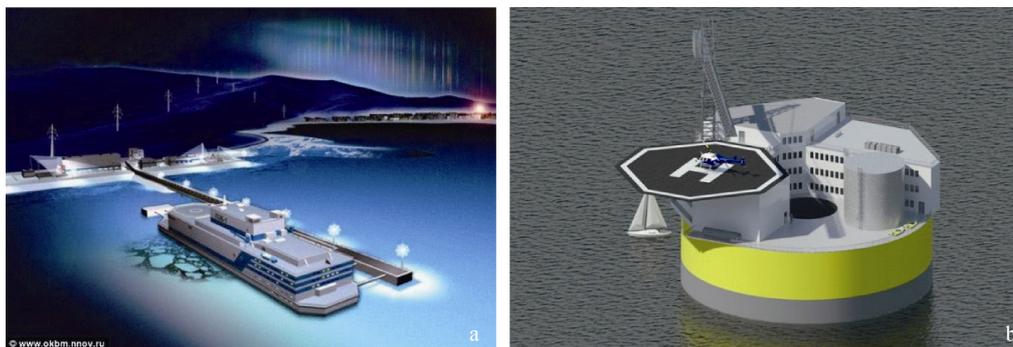


图1 海上浮式核电站概念设计图

Fig.1 Conceptual design of offshore nuclear power plant

a. 俄罗斯的“罗蒙诺索夫号”海上核电船; b. 美国麻省理工学院的海上浮式核电平台
a. Russia's floating nuclear power plant Lomonosov; b. MIT offshore floating nuclear power plant

环境中。核电站温排水排入海水后，在水中形成羽流，并在海洋水动力的作用下通过稀释、扩散等过程与海水水体混合，在排放口附近形成混合区，同时在浮力作用下，上升到水体表面形成温层，在海面通过蒸发和辐射与大气进行热交换。温排水的物理混合区域可分为近区和远区。近区是由初始排出流特征和浮力控制的典型区域，而远区则是由周围环境条件控制的区域。混合过程的空间范围及温升主要由温排水的动量和浮力、排放口的结构和位置以及排放口附近水体的特性，如深度和水流等因素决定。由于温排水是一种污染源，必需对其限定一定的范围，而该范围的设置应以不削弱水体功能的完整性、不危及重要的生态敏感区、不降低临近功能区的水质、确保海域环境功能的原有等级和生态系统的完整以及生态结构的相对稳定为准则^[5]。因此，从环境保护和监管角度来看，混合区是指接纳水体的水温超过该水域水质目标限值的有限包络范围。而影响到这个范围大小的排放因素包括温排水排放量、出口流速、温排水与接纳水体之间的温度差等^[6]。

目前，我国在役滨海核电站均采用一次循环冷却直排方式处理核电站的冷却水，即直接将吸收了乏气余热的冷却水排至自然水域，通过与自然水体的掺混从而将余热带入接纳水体。相对于火电而言，核电站效率较低，只有约 30%~35%，加之核电机组循环水量是火电机组的 1.2~1.5 倍^[7]，运行过程中超过 60%的热量将随冷却水排入接纳水体，如 1 台 1 000 MW 的核电机组，将会有 2 000 MW 的热量散失到环境中，当其采用直流冷却方式时，温排水流量约为 50 m³/s。若夏季工况温升 8℃，则每天排放到接纳水体的热量为 1.45×10¹¹ kJ；冬季工况温升 10℃，

则每天排放到接纳水体的热量为 1.81×10¹¹ kJ。因此与相同发电功率的火电厂相比，核电厂具有温排水排放量大、废热排放多的特点。

2 海上核电温排水对海洋环境的影响

水温是影响海水水质、水动力环境，特别是水生生物生长繁殖和分布的重要环境因子。欧美等国家早在 20 世纪 40 年代就开展了温排水对接纳水体环境影响研究，包括温排水模型研究以及温排水中余氯和温升对浮游动植物和底栖动物影响等方面的研究。研究表明在适温范围内，生物的生长速度与温度成正比；超过适温范围时，生物的行为活动以及生长繁殖都将受到抑制，甚至导致死亡。研究还发现温排水对水域生态环境的影响多为潜在的和累积的，严重时会对根本上、整体上改变水体理化特征，进而严重影响水生生态系统的结构和功能^[8]。国内研究人员针对水生生物开展了热影响实验研究，研究了温排水对于海洋生物的影响与促进，以确定温升对鱼类造成的致死或亚致死效应，同时研究了不同季节、不同增温引起浮游植物和浮游动物种类和数量的变化^[9]。在确立温度影响指标方面，研究了不同生物的起始致死温度(ILT)、最高起始致死温度(UUILT)、临界热最大值(CTMax)、选择/回避温度、生长最适温度(OGT)、最高周平均温度(MWAT)、短期暴露最高温度(MTSE)等的热影响指标，获得了大量的生物热影响基础数据^[3]。

海上核电温排水对接纳水体的影响主要集中在以下几个方面。

2.1 对水动力环境的影响

温排水排放后会上升到水体的表面形成温层或

径直冲到排放口前方, 在水体中形成羽流, 进而扩散到大气中或与冷水混合, 在混合区形成明显和持久的温跃层, 并由此改变了海水局部层化结构和流态。温排水对温层结构的影响程度由冷却水系统的布局和排放水域的水动力状况决定: 温排水带来的升温会加深分层, 而冷水取用造成的水体循环则减小分层。对温排水数值模拟研究表明, 温排水产生的升温影响, 最大升温影响在表层, 底层升温影响较小^[10]。另外, 水温升高后水体黏度降低, 有可能使悬浮物的沉积性能发生改变, 加之是排放口处的水流速较高, 因此也会对局部沉积环境产生影响。图 2 为温排水形成的羽流效果示意图。

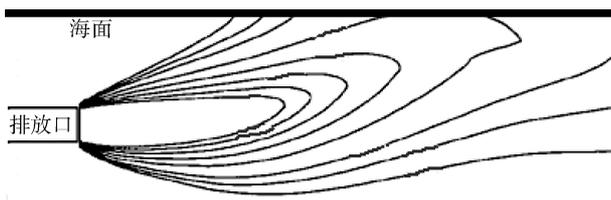


图 2 温排水形成的羽流效果
Fig. 2 Plume of thermal discharge

2.2 对海洋水质的影响

海上核电温排水带来的升温会造成受纳水体局部理化性质, 特别是水温、溶解氧等指标的改变, 从而对海洋水质环境造成影响。主要体现在以下 3 个方面: (1)造成水体缺氧。由于氧气溶解度随着水体温度升高而降低, 温排水排放带来的升温将导致底层的溶解氧含量降低, 造成氧亏损; 同时, 水温升高会加速底泥中有机物的生物降解, 分解速度加快, 耗氧量增多, 致使水体缺氧进一步加剧。(2)增加海水中有毒物质毒性。研究表明, 热污染会增加海水中有毒物质对水生生物的毒性, 当水温增至 30℃时, 一些重金属离子对浮游动物和底栖动物的毒性会增加 2~4 倍。(3)提高生物对有害物质的富集能力。贝壳类水生生物体内核素(铯、钴、碘、锌)的积累量将随温度升高而增大, 某些藻类对钴、铯放射性同位素的吸收也随温度升高而升高^[2]。

此外, 温排水排放还有可能使水色变浊、透明度降低、氨氮、总磷、总氮含量增高, 造成受纳水体的富营养化^[11]。在影响赤潮的诸多因素中, 营养化水平是发生赤潮的最基本因素, 而针对渤海, 特别是辽东湾海域的监测结果表明, 其富营养化的水平已具备了发生赤潮的基础条件, 只要其它因素适宜, 就

可能暴发赤潮^[12-13]。因此, 应海上核电运行中, 应严格控制温排水排量, 以免进一步恶化水质, 引发赤潮。

2.3 对浮游生物的影响

海洋浮游生物是海洋生态系统中物质循环和能量传递的重要环节, 在海洋生态系统的结构和功能中, 占据极为重要的位置。海洋浮游生物作为海洋生物生产力的基础, 既控制着海洋初级生产力, 也影响着鱼类和其他动物的生物量。

研究表明若环境水温升高超过海洋生物生长的适宜温度范围, 则海洋生物生长将受到抑制或损害, 若不出该温度范围, 则会促进海洋生物的生长和繁殖。首先, 温升导致水体溶解氧下降, 会加剧微厌氧菌的繁殖以及海洋中存积生物残体的生物分解, 致使有机物的氮、磷分解速度加快以及海水富营养化, 促进了水中富营养化藻类的生长, 使优势种突出, 继而导致多样性指数下降。同时, 温升导致的富营养化会使悬浮物的浓度增大, 导致浮游植物的关键生境条件光照和温度发生显著变化, 也会造成浮游植物生物量和种群结构发生变化。研究表明, 浮游植物在 20℃水生环境中生长最慢, 30~35℃生长最快, 但超过 35℃时生长速率开始下降, 30℃以上高水温可加速浮游植物生长, 但使浮游植物多样性降低, 耐污种增加; 对于浮游动物来说, 水温超过 35℃时, 特别是夏季在强增温($\Delta T > 4^\circ\text{C}$)区内, 浮游动物的生存条件将明显受到威胁, 种类和数量都会减少, 群落的物种多样性降低, 群落中物种组成发生改变, 个别耐热种类数量开始增多, 成为明显的优势种。如从各类群浮游动物的耐温特性得知, 35℃时原生动物和轮虫的生物数量较大, 枝角类数量稀少, 桡足类则基本消失。由于温排水直接作用于海洋浮游生物, 会对它们的分布和生活习性产生影响, 在上行效应的作用下, 处于食物链上层的鱼类、哺乳类动物及甲壳类进而也会受到直接或间接的影响。

2.4 对鱼类的影响

鱼类是变温动物, 其体温的调节能力相对较弱, 对周边水温的变化十分敏感, 会选择在温度适宜的水域内活动, 对超出适宜温度范围的高温或低温水体有回避反应。在适宜温度范围内, 水温的升高会提高鱼类的摄食能力, 促进其性成熟和身体生长; 当水温过高时, 会对水域中的鱼类产生热冲击, 阻止营养物质在鱼类生殖腺中的积累, 从而限制鱼卵的成熟, 影响鱼类生殖, 甚至会引起鱼类异常发育事件的发

生,对鱼类会造成明显的危害^[14];同时水温的变化,也将会引起鱼类饵料生物群落结构发生变化,进而影响鱼类生长。鱼类对高温水体的回避反应,也将导致其洄游通道、产卵区、栖息地的改变,进而影响环境和生态平衡。

2.5 对底栖生物的影响

底栖生物是海洋生物中的重要生态类群,是海洋食物链中重要的一环,其数量的多少影响着经济类鱼虾资源的数量和渔业的发展。海洋底栖生物的分布主要受底质、水温、盐度等海洋环境因子的影响。由于底栖生物长期栖息在水底底质表面或底质的浅层中,它们栖息地相对固定、迁移能力弱,难以回避热排放冲击,当升温超过其适应阈值,则会导致其代谢异常甚至死亡,最终导致强增温区内底栖生物消失。研究表明,底栖生物对于高温冲击极为敏感^[15],温排水海域最先出现的海洋生态破坏往往就是底栖生物绝灭现象。

另外,核电厂取、排水过程中形成的卷载效应,会对通过滤网系统而进入冷凝器的小型浮游生物、卵及鱼类幼体等所造成的巨大伤害。冷却水取水口的卷载和温排水形成的羽流也会阻断水生生物的洄游路线。这些都会对受纳水体的生态环境产生不利影响。

鉴于上述原因,为控制和减少温排水对海洋环境的影响,各国在确立温排水混合区时,都规定了混合区不能妨碍现有受纳水体的使用功能,不能妨碍水生生物的自然迁移、洄游、繁殖和生长等强制要求,以尽可能降低温排水对水生生物的影响。

3 结论和建议

开发海上浮式核电站,可以有效地解决海洋工业的用能需求,符合国家能源发展战略。然而海上浮动核电站在运行过程中将有大量的废热通过冷却系统以温排水的形式被释放到水环境,对受纳海域水文条件、海水水质、生态环境、生物群落组成与结构等方面产生影响,需要引起足够的重视。

为合理控制温排水排放对环境的影响,应针对拟建海上浮式核电站海域的生态群落结构特征,开展厂址附近海洋生物的耐温特性及其他热影响特性专项研究,进而利用热影响研究数据,结合拟建水域的水动力特征,论证并确立核电站温排水混合区范围、混合区边缘温升限值以及排放口极端高温值等混合区参数,确定更科学的温排水控制方案。

另外,核电厂温排水具有流量稳定、水质清洁等特点,是一种理想的低品质热源。应加强海上核电温排水资源化利用技术的研究,开展核电厂温排水余热综合利用。渤海是我国海洋油气开发的主战场,产能占国内海洋油气产量的50%以上。海上油气生产过程中,需要大量的热和淡水资源。特别是渤海稠油储量巨大,现阶段最成熟的稠油开采技术便是热采技术。因此,应积极探索将海上核电产生的余热用于稠油热采、平台冬季供暖以及海水淡化等方面的技术可行性,以便在发展海上核电的同时,实现油田生产的节能减排。

参考文献:

- [1] 於凡,张永兴,曹颖. 全球变暖背景下核电站温排水对海洋生态系统的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2010, 2: 155-161.
Yu Fan, Zhang Yongxing, Cao Ying. The influence of NPP warm drainage on the marine ecosystems in the context of global warming[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010, 2: 155-161.
- [2] 黄晓琛,陈雪初,彭欣. 滨海电厂温排水对海洋环境的影响研究进展[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 972-976.
Huang Xiaochen, Chen Xuechu, Peng Xin. The research progress of the impact of thermal discharge from coastal power plants on marine environment[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 972-976.
- [3] 张晓峰. 核电厂温排水环境影响评价及减缓措施[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 38-43.
Zhang Xiaofeng. Assessment and mitigation to the environmental impact of thermal discharge from nuclear power plants[J]. Ocean Technology, 2010, 29(4): 38-43.
- [4] 陈晓秋,商照荣. 核电厂环境影响审查中的温排水问题[J]. 核安全, 2007, 2: 46-50.
Chen Xiaoqiu, Shang Zhaorong. The issue of thermal discharge in the reviewing of environmental impact report for nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2007, 2: 46-50.
- [5] 於凡,张永兴,杨东. 滨海核电站温排水的混合区设置[J]. 水资源保护, 2010, 26: 53-56.
Yu Fan, Zhang Yong-xing, Yang Dong. An exploratory study on setting up mixing zone of thermal discharge water from nuclear power plant[J]. Water Resources Protection, 2010, 26: 53-56.
- [6] 刘永叶,刘森林,陈晓秋. 核电站温排水的热污染控制对策[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(12): 191-196.
Liu Yongye, Liu Senlin, Chen Xiaoqiu. Control countermeasures about thermal pollution of thermal discharge from nuclear power plants[J]. Atomic Energy

- Science and Technology, 2009, 43(12): 191-196.
- [7] 贺益英. 关于火、核电厂循环冷却水的余热利用问题[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 12(14): 315-320.
He Yiyang. Discussion on utilization of surplus heat of circulating cooling water of fossil fuel nuclear power plants[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 12(14): 315-320.
- [8] Cowles R B, Bogert C M. A preliminary study of the thermal requirements of desert reptiles[J]. Bulletin of the American Museum of Natural History, 1944, 83: 265-296.
- [9] 杨纯, 傅龙泉, 黄东涛, 等. 电厂温排水接纳水域热与流动的数值计算[J]. 上海电厂学院学报, 1995, 11(2): 1-9.
Yang Chun, Fu Longquan, Huang Dongtao, et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in the power plant thermal discharge waters[J]. Journal of Shanghai Institute of Electric Power, 1995, 11(2): 1-9.
- [10] 丁跃平, 郭远明, 李铁军, 等. 三门湾春季温排水增温效应数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(4): 101-107.
Ding Yueping, Guo Yuanming, Li Tiejun, et al. The numerical simulation studies of the effect of increasing temperature on warmly discharged water in Sanmen Bay[J]. Marine Sciences, 2015, 39(4): 101-107.
- [11] 徐镜波. 电厂热排水对水体溶解氧的影响[J]. 重庆环境科学, 1990, 12(6): 24-28.
Xu Jingbo. Effects of thermal discharge from power plant to dissolved oxygen in body of water[J]. Chongqing Environmental Science, 1990, 12(6): 24-28.
- [12] 曹宇峰, 曾松福, 林春梅. 浅谈我国滨海电厂温排水对海洋环境的影响状况[J]. 海洋开发与管理, 2013, 2: 72-75.
Cao Yufeng, Zeng Songfu, Lin Chunmei. Brief probe into the impact of thermal discharge from coastal power plants on ocean environment[J]. Ocean Development and Management, 2013, 2: 72-75.
- [13] 方志刚. 渤海辽东湾富营养化的趋势研究[J]. 环境保护科学, 2001, 27(105): 15-17.
Fang Zhigang. Research in the trend of Eutrophication in Liaodong Bay of Bohai Sea[J]. Environmental Protection Science, 2001, 27(105): 15-17.
- [14] Saravanan P, Priya A M, Sundarakrishnan B, et al. Effects of thermal discharge from a nuclear power plant on culturable bacteria at a tropical coastal location in India[J]. Journal of Thermal Biology, 2008, 33(7): 385-394.
- [15] 刘莲, 任敏, 陈丹琴, 等. 象山港乌沙山电厂附近海域的底栖生物状况[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(s1): 19-22.
Liu Lian, Ren Min, Chen Danqin, et al. Situation of benthos in sea area near Wusha Mountain Power Station in Xiangshan Bay[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(s1): 19-22.

Potential impacts of thermal discharge on marine environment from offshore floating nuclear power plant

LAN Zhi-gang, LI Xin-zhong, XIAO Gang, LIU Cong
(CNOOC Research institute, Beijing 100028, China)

Received: Oct. 8, 2015

Key words: offshore floating nuclear power plant; thermal discharge; environmental impact

Abstract: Development of offshore floating nuclear power plants can effectively solve the energy demands of the marine industry, which is definitely in line with national energy development strategies. However, the thermal discharge generated by the cooling system of an offshore nuclear power plant would have negative impacts on the marine ecosystem and would thus be the focus of an environmental impact assessment. This article discusses the characteristics of thermal discharge from offshore nuclear power plants; analyzes its impact on the receiving water body with respect to hydrological conditions, water quality, ecosystems, and the composition and structure of biological communities; and proposes control measures for preventing or limiting the impacts of thermal discharge.

(本文编辑: 刘珊珊)