

# 核电站对海洋环境及生物的影响\*

## EFFECTS OF NUCLEAR POWER PLANTS ON OCEAN ENVIRONMENT AND ORGANISMS: A REVIEW

李沫 蔡泽平

(中国科学院南海海洋研究所 广州 510301)

世界上越来越多的国家和地区都在发展核电事业。据国际原子能机构报道,至1999年,世界上共有31个国家拥有核电站,其中运行中的反应机组有436座,在建中的有38座,1999年核电发电量达2394.63 TW·h<sup>[1]</sup>。

核电站由于其自身的生产特点,会对其所处的环境及生态系统产生一定程度的影响。许多核电站建在水源充足的沿海一带,大量的高温排放废水势必对邻海水域环境造成影响。冷却水系统对水体的抽吸,会使水中的生物被携带进入冷却水系统而受到损伤。有些核电站(特别是沿海地区的)为了防止污损生物对冷却水系统的损害,在水中加入一些强氧化剂(如氯等),这一过程将对进入冷却水系统的生物体造成伤

害。核电站的运行,不可避免地会产生一些放射性物质,它们是否会对海洋环境和生物造成污染和伤害成为人们关注的一个问题。本文结合国内外的相关资料,就核电站对邻近海洋水域和生物环境的温排水的热影响、卷吸碰撞的机械影响、氧化剂的化学影响以及核废料的放射性影响等方面进行综述,同时也简述了核电站温排水的余热利用状况。

\* 广东省自然科学基金资助项目 970264 号、中科院大亚湾开放站基金资助项目 S9608 号和中科院九五重大项目 KZ951-A1-102 号。

收稿日期:2000-09-28;修回日期:2001-01-16

## 1 冷却水的热影响

核电站在生产过程中,需要大量的水作为冷却剂。大部分的废热都进入了冷却水,约占核反应产生的总热量的3/4。据统计,核电站每生产1 kW的电,约排出5 000 kJ的热量。核电站的发电能力一般为 $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$  kW,以 $2 \times 10^6$  kW的核电站计算,每天排出的废热有 $10^{10}$  kJ,可使 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的水体升温 $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>。建在海边的核电站的冷却水一般是直接抽取邻近的海水,经过循环冷凝器后,又就近排入海中。一般情况下,在局部海区,长期将超过周围海水正常水温 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的热水排到海洋里,就可能造成热污染,核电站的冷却水无疑是海区的一个重要的热污染源<sup>[3]</sup>。

从生物学角度看,水温对海洋生态系统和各类海洋生物活动起着极为重要的作用。它对生物个体的生长发育、新陈代谢、生殖细胞的成熟及生物生命周期都有显著的影响,在自然条件下,海洋水温的变化幅度要比陆地环境和淡水环境小得多。因此海洋生物对温度变化的忍受程度也较差,热污染对它们的影响更大。

冷却水的热效应会改变局部海区的自然水温状况,浮游植物最易受到影响。Chen, Yuh-ling Lee 于1992年指出,冷却水作用的季节性明显,尤其在夏季其热效应的影响较大,会使某些藻类暂时消失,使海区浮游植物基本的种类组成发生改变。钱树本等亦于1993年将热污染水域的海洋植物与正常水体环境的进行对比研究,发现冷却水改变了底栖海藻的群落结构,大量种群消失,刺松藻等个别海藻的生物量却提高了。

核电站的高温排水也直接作用于海洋浮游动物,对它们的分布和生活习性产生影响。

Suresh 等观测了东印度海岸的温排水在气温的协同作用下对浮游动物的影响,发现气温在 $27.2 \sim 31.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时有许多种群在该海区生活,当气温达到 $37.0 \sim 37.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,该海区几乎所有的大型浮游动物均消失了,桡足类的密度急剧下降,但荔枝螺还能大量地繁殖。

水温是鱼类生命活动中最重要的环境因子,因此温排水对鱼类的影响是不容忽视的。温度急变对某些鱼类的繁殖、胚胎发育、鱼苗的成活等均有不同程度的影响。郑丰洲等1996年指出,水温升高,可加速海洋动物的性腺发育、诱导某些海洋鱼类提早排卵并大大增加畸形鱼的比例。有些鱼在热影响下提前成熟、提前衰老、个体变小、不能生育。Sandstroem 等<sup>[9]</sup>研究

了在核电站的温排水系统中温度对鲈鱼的生活周期的影响后发现温排水使鲈鱼生长能力降低,在个体很小的时候就成熟,产卵时间提早,产卵期延长,尽管受精率提高了,但很少有受精卵能正常发育至孵化。当然,一些鱼类适应温度的能力比较强,在核电站的温排水区域也能正常生长。蔡泽平等<sup>[4]</sup>对大亚湾3种重要经济鱼类进行热效应模拟实验,并结合其生殖生态习性和水域环境进行研究,结果表明,大亚湾核电站温排水热效应对黑鲷和平鲷种群资源没有明显的不利影响。

对于有洄游习性的鱼类来说,温排水的影响是很严重的。如鲈鱼、梭鱼、大马哈鱼等海洋鱼类习惯于逆流溯河产卵,若河口区被热废水“占据”,就等于形成了一道不可逾越的屏障,将影响其种群繁衍。Clark 等曾调查 Haddam Neck 核电站对一种鲑鱼洄游的影响,发现该鱼受核电站热废水影响而改变了常规的洄游路线。美国 Argonne 国立实验所曾组织调查密执安 Point Beech 核电站热废水与鱼群分布的关系,结果显示,在低温季节鱼群频繁出入于热羽流区域,而在高温季节则回避该海区。鱼类被冷却水流导引和阻隔,其生殖迁徙活动受到影响。因此,水温是影响鱼类逆流迁徙的一个重要因素,而冷却水的排放对其迁徙活动是有破坏作用的。

核电站冷却水的排放,对邻近海区环境及生物的影响是不容忽视的。Friedlander 等1996年指出,核电站的热影响还可通过与其他环境因素的相互作用而产生综合效应。它不仅能以热的形式直接作用于生物体上,还能将热施加于理化环境,使水体含氧量降低,使水中一些有毒物质的毒性增大,腐殖质增多,使水体恶化,从而影响海洋生物的正常生存<sup>[13,14]</sup>。水质的恶化亦可能引发一些病害及寄生虫的滋生,对生物群落产生更大的压力<sup>[10]</sup>,因此核电站的热影响成了目前核电站-海洋环境效应中最大的影响因素。

## 2 核电站对海洋环境及生物的机械作用影响

核电站运转过程对水体有抽吸和搅动作用,冷却水体还要经过许多特殊的处理工序,这些过程将会对水体中的生物造成一个连续的机械损伤。

冷却水在进入冷却系统之前要经过一段由筛篦和筛网组成的过滤屏障,以去除水中的悬浮固体物质和较大生物。水体以较大的速度通过筛篦,水体中动、植物体将随水流被卷吸,有些生物撞击在筛网上,冲

击力之大足以使许多生物死亡。一些浮游动物亦可能在经过这些过滤屏障之时因撞击而肢体残缺造成死亡<sup>[5]</sup>。

水流通过过滤屏障进入水泵,水体的压力即从 101 325 Pa 下降至 2 938 Pa,后又急速上升至 162 120 Pa,几秒钟内,压力变化很大,会对海水中的生物体造成极大的伤害。对于具有空气泡的生物,压力变化尤其是负压力的产生,会使水中的生物体内所携带的气泡或液体中溶解的气体逸出,在组织中形成空气栓塞,从而影响正常的生理代谢活动,导致机体损伤至死亡<sup>[6]</sup>。

冷却水进入水泵后,水泵高速旋转的叶片会对水中的生物体产生巨大的冲击力, Schultze 1989 年报道,许多海洋生物与水泵壁、叶片发生剧烈碰撞而受伤、死亡,严重时死亡率可达 80% 以上。Ulanowicz 指出,冷却水系统中,存在着湍流区域,旋涡的边缘或液体流过固体表面时会产生剪切力,对水生生物有很大的伤害作用。Carpenter 等对美国长岛海湾东北部的 Millstone Point 核电站附近的桡足类在无温排水和氯处理的情况下研究其死亡率,通过对照表明,机械应力是导致桡足类死亡的主要原因, Evans 等从 80 年代初起对 Donald C. Cook 核电站的浮游动物进行了 8 a 的观测研究,数据显示,导致该海区浮游动物死亡的主要原因是机械损伤而不是热污染。

核电站的机械效应对海水中的鱼类的影响也是十分明显的。在进水口处,个体较大的鱼可能被水夹带冲撞在过滤网上而伤亡。鱼卵和仔鱼更易遭受机械损伤,水泵中的剪切力足够大时,会使鱼卵解体、仔鱼畸形。Lacroix<sup>[11]</sup>对法国海岸 Gravelines 核电站进行了长期观察和研究,发现被携带进入冷却水系统的鱼卵、仔鱼大部分的死因是机械作用造成的,约占总死亡率的 75%~90%。Marcy 等的实验结果也显示机械作用对鱼卵和仔鱼造成的损伤超过了热作用。

### 3 核电站的余氯对海洋环境及生物的影响

为了防止核电站的冷凝器被附着生物堵塞、降低热交换效率,多数核电站使用氯气消毒的方式以除去水中的污损生物或降低生物附着活性<sup>[7]</sup>。氯气加入海水中,会产生一系列化学反应,生成盐酸、次氯酸、高氯酸等产物。氯气产物具有强氧化性,除了能抑制水中的污损生物以外,还能与水中的一些无机物和有机物反应,产生一些有毒的副产物:如溴、溴酸、溴仿

等卤化物或其他有毒物质。这些物质对水域中的生物有毒害作用,会对海洋环境和海洋生物产生影响。

有研究认为,核电站排放的余氯对浮游植物有很大的影响,即使氯含量较低,仍能导致浮游植物生产力和生物量明显降低。Eppley 于 70 年代对美国加利福尼亚海滨的核电站进行了研究,发现海洋浮游植物对氯非常敏感,即使浓度很低对光合作用影响也很大。Saravanane 1998 年报道,浮游植物在经过核电站冷却水系统的氯处理后,种群个体数减少,光合作用和呼吸作用受到抑制<sup>[12]</sup>。余氯对浮游动物也有很大影响。Chardy 等于 1988 年在 Chesapeake 海湾 3 个低盐度河口区记录到因氯处理造成桡足类大量死亡。调查表明,当浮游动物经过氯含量超过 0.5 mol/L 的水体时,可造成死亡。

不同生物种类对氯处理的反应有所差别。Stenton 等于 90 年代初研究了氯对斧蛤的行为的影响,结果发现低氯浓度 ( $< 6 \times 10^{-5}$  mol/L) 虽对斧蛤并无太大致死作用,但是其挖掘能力会受些影响。Rajagopal 等在 1994 年研究了翡翠贻贝在不同氯浓度条件下的活动,发现翡翠贻贝在余氯水中的生理活动发生了改变,这些变化均与余氯有关。Thompson 等研究了电站冷却水中低浓度的氯对贻贝的影响,发现在 1 mg/L 氯浓度下,幼体在爬行和游泳方面有所改变,生长率也降低了。

### 4 核电站对海洋环境和海洋生物的放射性影响

核电站是利用原子核在裂变时产生的巨大能量来发电的。这些核燃料在裂变过程中会产生放射性裂变产物,因此在核电站排出物中,不可避免的会带有一些放射性物质。若不加限制地将其排放入海洋,势必会对海区中的生物环境造成影响。

不过,现在的核电站对放射性物质有严格的限制和管理措施。根据有关规定,压水堆核电站的设计标准应保证核电站附近的居民通过空气和水两个主要途径,接受的辐射剂量不超过 3.9 mSv/a。一般而言,只要对人的辐射照度在安全范围内,就不会对海洋生物造成危害。在对已运行的核电站的放射性排出物质的调查中,均发现放射性水平较低,并不会对生物造成明显的损伤。刘广山等<sup>[8]</sup>用  $\gamma$  光谱法测定了大亚湾核电站运行前和运行后 1 a 中大亚湾海域一些海洋生物、海水和沉积物中的 <sup>137</sup>Cs 的含量。结果显示,核电站运行 1 a 后和运行前相比,海洋生物、海水沉积物

中的<sup>137</sup>Cs含量没有明显变化。Osterberg等人对核电站排出物的放射性元素进行追踪调查发现:在核电站投产后(1961年)约有 $5.18 \times 10^{14}$  Bq的<sup>65</sup>Zn进入太平洋,但这些同位素的浓缩富集量比推荐的MPC标准还低,因此对周围海洋生物是不会有危害的。程炯等人采用邻苯三酚自氧化法,测定了大亚湾核电站I、II号机组运转前与运转后第1、2年附近地区动物体肝组织及红细胞中超氧化歧化酶活性,发现无明显差异。当然,海洋生物对海区中的元素具有聚集和浓缩的功能。因此,海洋生物富集放射性元素可能引起的慢性影响引起了人们的关注。从已发表的国外资料看,对放射性元素含量低于3700 Bq/L的水,未发现对鱼类有可察觉的影响。英国温茨凯尔后核电站排入北爱尔兰海的废水已持续20a多,对于栖息在这个区域的底栖鱼类——鳎鱼的种群没有任何不利影响。

可见,就现有的资料来看,在现在的核电站的技术水平条件下,核电站的运行过程中,仅有极少量的放射性物质进入周围的水体环境,经过海洋的稀释和转移,在水体中的含量均已低于天然本底水平,并不会对海洋生物造成明显的伤害。

## 5 对核电站余热的开发利用

核电站的运行必然在一定程度上对周围的海洋生态环境及其生物产生影响。人们根据核电站的生产特点,已开始利用核电站的余热资源。日本利用核电站的温排水进行工业化养殖,使养殖业迅速发展。他们还将核电站的冷却水引入丹生湾,使那里的渔获量得到明显的增加。比利时利用核电站余热高密度养殖罗非鱼,饲养9个月,产量达 $100 \text{ kg/m}^2$ 。冷却水的急速流动带来了丰富的溶解氧和悬浮营养盐,使某些种类得到良好的生长,甚至成为优势种。英国曾用鳎鱼做过试验,在苏格兰核动力站的热废水贮水池中饲养的鳎鱼,18个月即可达到市场出售标准,而在正常海水中饲养的鳎鱼要4~5a才能达到同一个标准。Chiba等在80年代中期,利用核电站温排水进行海洋动物养殖,将温排水抽入黑鲷、对虾、蟹及鲍鱼等的养殖网箱中,加速它们的生长成熟,并使其繁殖季节提早。还有人将虾类移入核电站的温排水区域中养殖,得到了良好的效果。中国山东省亦利用电厂余热水养殖罗非鱼,4个月内增产3倍,经济效益十分可观。

此外,Khalanski 1987年指出,某些温带海区,核电站的冷却废水的排入,可以防止冬季冰冻现象的出现,增加海水中的溶解氧,为某些鱼类提供越冬的有利场所,使这些海区成为有用的渔场。

综上所述,核电站因其生产特点和产能形式,不可避免地会对周围的海区环境和海洋生物产生影响,其影响是多个因素综合作用的结果,涉及面广,成为一种系统效应。人类建造核电站,应重视核电站对海洋环境及生物环境的各方面的影响,关注核电站运行的动态、实施有效的环境监控机制,力争充分发挥核电站的正面效应,将其对环境的不利影响减少到最低水平。

## 参考文献

- 核情报研究所情报研究室主办。国外核信息-每日快讯。2000,3(13):1053
- 国家海洋局人事劳动教育司组织编写。海洋环境保护与监测。北京:海洋出版社,1998
- 国家海洋局《海洋污染及其防治》编译组。海洋污染及其防治。北京:石油工业出版社,1981
- 蔡泽平、陈浩如、金启增。热带海洋,1999,18(2):11~19
- 艾和尔兹(Eichholz G.G),李国鼎译。核动力环境问题。北京:原子能出版社,1985
- 潘明祥、王肇鼎。南海研究与开发,1999,2:66~80
- 黄洪辉、王肇鼎、张 懿。南海研究与开发,1998,2:46~58
- 刘广山、张彩芸。海洋环境科学,1998,17(4):7~10
- Sandstroem O., Abrahamsson I., Andersson J. et al. *Journal of Fish Biology*, 1997, 51(5):1015~1024
- Moravec F., Gelnar M., Ergens R. et al. *Acta Societatis Zoologicae Bohemicae*, 1997, 61(1):65~76
- Lacroix H. *La Mer*, 1989, 27:101~102
- Saravanane N., Satpathy K.K., Nair K.V.K. et al. *J. Therm. Bio.*, 1998, 23(2):91~97
- Thompson I.S., Seed R., Richardson C.A. et al. *Ecology of Marine Molluscs*, 1997, 7:77~85
- T.D. Lukey, *Hormesis with Ionizing Radiation*, U.S.A.: CRC Press, 1980
- Rohlwing T., Palm H.W., Rosenthal H. *Diseases of Aquatic Organisms*. 1998, 32(3):233~236

(本文编辑:谭雪静)