

# 我国建设内陆核电站对环境的影响

曾娟, 肖国光, 余侃萍, 杨国超

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南长沙410012)

**摘要:** 未来十年我国内陆核电将处在快速增长的阶段, 本文以内陆核电站发电原理为基础, 考察污染产生种类及成因, 探讨我国内陆核电站在正常运营情况下可能对环境产生的影响, 并思考发展方向。

**关键词:** 内陆核电站; 温排水; 放射性废液; 余氯; 环境影响

中图分类号: X820 文献标识码: A 文章编号: 1006-8759(2012)05-0056-05

## CHINA INLAND NUCLEAR POWER PLANT IMPACTED ON THE ENVIRONMENT

ZENG Juan, XIAO guo-guang, YU kan-ping, YANG guochao

(Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy Co Ltd, Changsha410012, Hunan, China)

**Abstract:** China's inland nuclear exhibits rapid growth for china energy supply in the next ten years. In order to represent their influence on environment, variety pollutants discharged from nuclear stations and its causes are discussed. Additionally, the possible of environmental impact on China Inland nuclear power plant under normal operating conditions is discussed. This will be helpful to show clearly direction for the development of the inland nuclear power.

**Keywords:** Inland nuclear power plant; cooling water; radioactive liquid waste; residual chlorine; environmental impact

据世界原子能组织报告, 目前全世界正在运行的核电站超过439座, 拟建或在建的核电站超过75座, 占世界总发电量的16%。世界上厂址位于内陆滨河、滨湖地区的核电站约占全世界核电装机容量的2/3以上, 其主要的国家有美国、法国、加拿大等。如法国电力需求80%依赖核电, 有38个机组坐落在内陆的8条主要河流上。截至2011年3月底, 我国已有6个核电站13个机组投入运营, 装机容量1080.8千瓦, 仅为我国总电量的1.4%, 正在建造的有28个机组。目前已投入运行的和在建的核电站大多属于滨海核电站, 只有少数几个在建

的核电站如湖南桃花江, 湖北大畈等属于内陆核电站。根据《国家核电专题发展规划》, 到2020年核电装机达4000万千瓦, 新建和拟建的核电站中内陆核电站占60%以上, 因此, 未来十年我国内陆核电将处在快速增长的阶段。本文以核电发电原理为基础, 参考国外内陆核电运行情况, 结合国内已投入运行核电站的运行情况, 探讨我国内陆核电站在正常运营情况下可能对环境产生的影响, 并思考发展方向。

### 1 核电发电原理

核电站发电是以核反应堆代替火电站中的锅炉, 以核燃料在核反应堆中发生特殊形式的“燃烧”产生热量来加热水使之变成蒸气, 蒸气经过管路进

收稿日期: 2012-10-24

作者简介: 曾娟, 1984年10月, 湖南益阳人, 中南大学环境工程系, 硕士, 工程师, 现主要从事环境评价及废水治理研究。

入汽轮机,推动汽轮发电机发电。目前世界上常用的反应堆有沸水堆、压水堆、重水堆和改进型气冷堆以及快堆等,其中应用较为广泛是压水堆核电站。我国现已运行的和在建的滨海滨河核电站均拟采用压水堆技术。压水堆核电站是用铀制成的核燃料在反应堆设备内发生裂变反应而产生大量热能用于发电。

核电站主要由核岛和常规岛组成。核岛的核心即一回路主系统主要包括反应堆、冷却剂泵、蒸汽发生器、稳压器等。除此之外,核岛内还有一些安全和辅助系统,如化学和容积控制系统、余热排出系统和安全注入系统、设备冷却水系统、放射性废物处理系统及硼回收系统、反应堆安全壳及安全壳附属系统等。常规岛系统由二回路系统(包括蒸汽系统、汽轮发电机组、凝汽器、蒸汽排放系统、给水加热系统和辅助给水系统等)、循环冷却水系统、电气系统及厂用电设备组成。图1是以压水堆为例的核电站工作原理简易流程图。

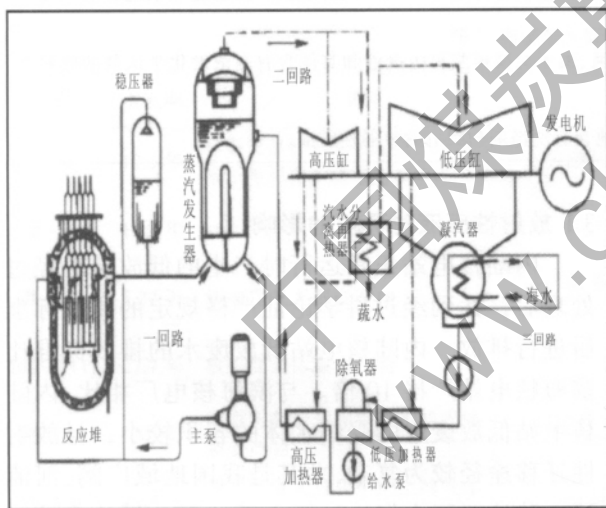


图1 核电站工作原理简单示意图

由图1可知,核电站通过三个回路(一回路、二回路、三回路)实现由核能-热能-机械能-电能的能量转换过程。一回路中,反应堆冷却剂在主泵的驱动下流入反应堆堆芯,将核裂变产生的热能带至蒸汽发生器,在实体隔离的条件下将热量传递给二回路中的给水,然后再由主泵打回到反应堆内重新加热,循环往复;二回路中的给水吸收了一回路传来的热量变为高压蒸汽,进入汽轮机膨胀做功将热能转变成机械能,而汽轮机转子与发电机转子刚性相连,汽轮机带动发电机发电,将机械能转变成电能;做功后的乏汽在冷凝器中被循环冷却水(三回路

水)冷凝成凝结水,经过加热除氧等步骤后再次被输入蒸汽发生器循环使用。

## 2 冷却水的产生及其影响

由图1可知,水被抽取利用到核电站的三个回路,其用水量的比例近似为3:5:326,主要被用于三回路,用以保证汽轮机的背压,带走凝汽器中的热量,将汽轮机乏汽冷凝以供二回路循环使用。河水作为冷却剂所带走的热量约占核反应产生热量的一半以上,据计算,每生产1千瓦时电大约排出1200大卡的热量,以100万千瓦的发电能力来计算,每天排出的废热可使550万 $\text{m}^3$ 的水温升高5.5 $^{\circ}\text{C}$ 。由于内陆核电站受厂址环境水体的水资源量和环境容量的限制,绝大多数均采用冷却塔二次循环散热方式,以减少循环冷却水的取水量,并将向环境水体排放的热量转而向大气排放,以减少冷却温排水对水体的影响,使厂址附近水域温升控制在3 $^{\circ}\text{C}$ 范围内<sup>[1]</sup>。如法国Civaux核电站采用了用于循环水冷却降温的机械通风冷却塔,下游河水温升<1 $^{\circ}\text{C}$ ,将温排水对环境的影响降到最低。同时冷却塔的存在产生的噪声、雾羽、荫屏及盐沉积均可通过直接或间接途径对环境产生影响<sup>[2]</sup>。

水温是对河流生态系统平衡和生物活动有较大作用的因素。虽然内陆河水温度在一年中变化较大,但河水温度的升高仍会对生物受精卵的成熟、胚胎的发育、生物体的新陈代谢、洄游等产生影响。水温因热废水的排入而升高,会使鱼类在错误的时间和错误的路线上洄游,破坏鱼类的繁衍。河水温度的异常升高还会导致水中的溶解氧含量降低,当水温升高到一定程度,水生动物会缺氧窒息而死。而生物死亡后尸体的分解又进一步促使水中氧气的消耗,这样循环往复,久而久之导致局部水质的恶化。姜礼燧<sup>[3]</sup>采集了我国几大水系鱼类及水产动物共65种,通过急性热冲击试验、热回避试验、最大起始致死高温试验和持续热影响实验,探讨了我国渔业水域的温排水对鱼类影响的温度标准。结果认为我国夏季废热排水最高温度珠江水系和湛江沿岸水域不得超过36 $^{\circ}\text{C}$ ;长江和钱塘江水系、黄河水系不得超过35 $^{\circ}\text{C}$ ;黑龙江和松花江水系不得超过26 $^{\circ}\text{C}$ ;西北地区冷水性鱼类水域不超过21 $^{\circ}\text{C}$ 。且各水系最大水温变化范围不能超过3 $^{\circ}\text{C}$ 。曾江宁<sup>[4]</sup>的研究结果表明,适度温升能够提高河流浮游植物的生产力,对应于夏季28 $^{\circ}\text{C}$ 、冬季12 $^{\circ}\text{C}$ 的河水

温度,浮游植物群落生产力的最适温升幅度分别为 2℃和 12℃。浮游动物的耐热性强于浮游植物,并存在种间差异,由于半致死温度(LT50)与自然适应水温的跨度较大,温排水造成的海域温升基本不影响受纳海域的浮游动物存活。徐晓群<sup>[5]</sup>等多火电厂附近河流浮游动物进行采样调查,发现河流浮游动物有较高的耐热承受力,7℃温升范围内 4 种实验物种均无个体死亡。

### 3 放射性废液的产生及其影响

内陆核电项目及其他工业项目相比,最大的区别来自低放废液(浓度 $\leq 4 \times 10^6 \text{Bq/L}$ )的排放。核电运行所产生的放射性物质首先来源于反应堆燃

料芯块内的链式裂变反应。正常运行过程中裂变反应产生的裂变产物绝大部分包容在燃料元件的包壳内,但仍有极少量的裂变产物通过燃料包壳缺陷泄漏到一回路冷却剂中。同时裂变产生的中子使一回路冷却剂本身以及腐蚀产物、控制棒、硼酸和其它材料受到激活而产生中子活化产物。这些裂变产物和活化腐蚀产物是反应堆冷却剂中的放射源,它们会通过冷却剂的净化、蒸汽发生器传热管束的泄露等过程造成对二回路的污染。因此,放射性废液根源于一回路冷却剂。我国 1988 年 9 月 1 日实施了《轻水堆核电站放射性废液处理系统技术规定》(GB9135-88)中说明了压水堆核电站的放射性废液来源,见表 1。

表 1 压水堆核电站放射性废液来源

堆形	废液组成	废液来源
压水堆	二回路系统废液	来自蒸汽发生器排污、汽轮机厂房排水、二回路系统离子交换器的废再生液和过滤废液。这类废液通常为非放射性废液,只有当一回路的放射性液体漏入时,此类废液才可能成为放射性废液。
	杂项废液	来自地漏排水、取样装置废液、辅助系统离子交换器和过滤器废液、余热排放系统、反应堆冷却剂辅助系统、紧急堆芯冷却系统、反应堆安全壳冷却系统、工艺设备冷却系统、燃料装卸系统、废物处理系统和蒸汽发生器排污系统等。
	化学废液	来自放射化学实验室排水、化学清洗去污废液、离子交换树脂再生废液和其他含有高浓度化学试剂的放射性废液。
	洗涤废液	来自洗衣服废液、工作人员淋浴废液及其他含有洗涤剂 and 肥皂的放射性废液。

运行过程中产生的放射性废液,按照其不同化学成份以及放射性浓度进行分类收集处理,达到经过科学论证严格规定的排放标准后排放,排放的废液中放射性核素的种类、含量、浓度因反应堆的类型、运行条件、净化设备等而有所不同,排放入河流后又会受到河流动力条件、在生物体内的迁移和浓集规律以及吸附、沉淀等因素的影响。据报道,从美国核电站<sup>[6]</sup>周围采集的样品中能够探测出来的放射性核素在压水堆周围为  $^3\text{H}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等。我国秦山核电站液态流出物中的主要放射性核素有  $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{124}\text{Sb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 。大亚湾核电站<sup>[7]</sup>液态流出物中主要的放射性核素是  $^{110}\text{mAg}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{124}\text{Sb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{131}\text{I}$ 。

含有各类放射性核素的废液排入河流中,受到河流的水文作用被稀释扩散,一部分会悬浮于水体或沉积到底泥中,一部分会通过各种途径迁移到生物体中并有不同程度的富集,甚至在人体富集。

#### 3.1 放射性废液对环境的影响

内陆核电站正常运行时产生的低放废液经过处理后,达到经过科学论证严格规定的排放标准后进行排放,内陆核电站低放废水的排放标准比滨海核电站严格 10 倍。与滨海核电厂相比,内陆核电站低放废水的受纳水体的容积较小,且放射性迁移途径较为复杂,尤其是我国地域广阔,河流从内陆地区至出海口蜿蜒上千公里。低放废液对水环境影响的程度如何,最重要的影响因素莫过于受纳水体的容积,只要受纳水体的容积够大,具备足够的稀释能力和扩散空间,是能够确保区域的水质安全的。由于我国的人口密度较西方发达国家大,且很多河流和水库都是饮用水源地,在这方面我国内陆核电的厂址选择需要比国外更加慎重。

目前,世界内陆核电站总体处于良好的运行状态,美国和法国的许多内陆核电站投入商业运行已经 30 多年,取得了良好的安全业绩,根据国内外研究资料显示在其长期的正常运行中,并未

监测到水体环境的异常变化,未见河道中放射性物质超标的相关报道。美国、法国及英国对低放废液在河道中的迁移和扩散的数值模拟研究结果认为低放废液排放对河道水质影响不大<sup>[8]</sup>。

由于我国内陆核电站建设刚刚起步,还未有运行监测记录和分析成果,仅有数值模拟结果可供分析评价。有关部门对某拟建核电厂进行了数值模拟研究<sup>[9]</sup>,分析了核电厂运行期间放射性液态流出物中不同半衰期的放射性核素在水域的掺混、稀释规律和相对浓度场的分布及其变化规律,其计算结果认为在 P=97% 的流量的设计不利工况下,满足排放口下游 1 km 处受纳水体中总放射性(除氙外)不超过 1 Bq/L,氙浓度不超过 100 Bq/L 的要求,机组正常运行期间所致最大个人的有效剂量也低于国家规定的限值。这种数值模拟的方法对于放射性核素在纯水流环境下的输移和扩散的模拟结果还是较为可信的,但是由于天然河流中存在大量的悬浮物及水生生物,悬浮物对核素

的吸附及水生生物对核素的累积、转移规律是十分复杂的问题。目前已知的数学模型计算方法均不能完全模拟,此对水环境的影响分析还需要搜集大量的运行监测结果和开展更加深入的科学研究。

### 3.2 放射性废液对人类的影响

放射性核素对人类的影响,主要是放射性物质在衰变过程中,从核内放出  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、 $\gamma$  光子以及其它射线,引起物质电离,形成电离辐射,通过内照射和外照射,对人体形成不同程度的损伤。人体对 X 射线和  $\gamma$  射线外照射吸收剂量在 0.25 戈瑞以下时,一般不会有明显效应,但剂量增加会出现损伤,当达到几个戈瑞时,就可能使部分人死亡;而不同放射性核素进入人体内,沉积在不同的器官,形成内照射,内照射主要是  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子,对人体产生的影响远大于外照射,严重损伤人体细胞。表 2 详细表述了在环境影响评价体系中,具有较大影响核素的排放方式及危害。

表 2 具有较大影响的核素具体情况

元素	半衰期	来源	排放方式	危害
氙 <sup>[10]</sup>	12.3 年	可裂变重核三分裂变过程产生及硼酸作为有毒添加剂控制反应堆生成	通过大气稀释排放和水排放	在环境中以氙水存在,与普通水性质相似,属低毒核素,基本不被人体吸收,对人体外照射可忽略不计。
氙-85	10.3 年		大气稀释排放	低毒核素,主要发射 $\beta$ 射线,基本不被人体吸收,对人体外照射影响较小。
氙-133	5.27 天	核裂变气态裂变产物	贮存滞留,待放射性衰减后,排放大气中	低毒核素,基本不被人体吸收,对人体照射主要是外照射,
铯-90 <sup>[11]</sup>	27.7 年	核裂变固体裂变产物	通过水排放到环境中	高毒类核素,聚集在人体骨骼中,代谢难,对人体内照射。
铯-137	30 年	核燃料裂变过程中产生的固体裂变产物	空气载带沉降地面及通过水排放进入环境	中毒类核素,在人类的食物链环节中聚集,聚集在人体肌肉内,难代谢。
碘-131	8.65 年	核燃料裂变过程中产生的气体裂变产物	空气载带和水排放进入环境	高毒类核素,主要发射 $\beta$ 射线,易于被人体吸收,聚集在人体甲状腺中,造成明显的甲状腺剂量。
钴-60	5.26 年	冷却剂回路中的腐蚀产物,中子辐照活化生成的核素。	通过水排放进入环境	高毒类核素,主要发射 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线,进入人体后在肠胃中累积,产生很大辐射剂量。

赵成昆<sup>[12]</sup>分析了我国日前已经完成的内陆核电站址选址阶段环境影响报告中低放废水排放的模拟计算及对居民造成的辐射剂量的分析计算结果,认为在考虑 4 台百万千瓦级机组的规划容量,核电厂正常运行可能产生的最大公众个人年有效剂量在几个或 10 几个  $\mu\text{Sv}$  的水平,与我国滨海核电厂址的公众剂量水平处在同一个数量级,也与美国 NRC 已经接受的 4 个 ESP 厂址的公众剂量水平相近。同时,卫生部在 20 世纪 80 年代完成了

我国天然  $\gamma$  辐射剂量率水平的调查,得出我国居民人均年有效剂量为  $684\mu\text{Sv}$ 。相比之下,我国内陆核电站运行可能对公众的影响远小于天然  $\gamma$  辐射对公众的剂量率水平。内陆核电正常运行的情况下,排放的废液中含有的放射性物质很少,一年给周边居民带来的放射性影响,不及一次 X 光透所受的剂量。

## 4 余氯的产生及其影响

滨海核电厂利用海水做冷却水,将汽轮机乏汽冷凝,以供循环使用。在取水过程中,虽有生物拦截设施将体积较大的生物和污物阻截,但还是会有一些小型植物以及微生物进入循环冷却水系统中。这些污损生物附着在管路甚至是冷凝器中,导致管道断面变小、效率降低。为了保护核电厂循环冷却水系统不被海水的生物堵塞,通常会对冷却水进行氯处理。在防止污损生物粘附的同时,也产生了余氯。此外,氯会与水中的多种有机、无机化学成分反应,产生各种副产物,水生生物产生毒害作用。其作用效果受到生物种类、余氯形态、浓度、作用时间、温度等因素的影响。

余氯是损害浮游植物的主要因素<sup>[13]</sup>,而温排水的热冲击对浮游植物的影响不大,0.2 mg/L的氯可以直接杀死冷却水中60%~80%的藻类<sup>[14]</sup>。但Glasstone等<sup>[15]</sup>认为即使20%的浮游植物种群被杀死,水域的净影响也可以被忽略。Hamilton等按氯处理时损失91%的浮游植物,氯处理时间占一天的25%,冷却用水占河流流量的30%,对美国马里兰州 Patuxent 河畔 Chalk Point 电厂邻近水域浮游植物受氯处理的损失估算结果仅为6.6%。而浮游动物对氯较敏感,较低浓度的氯即可对浮游动物产生明显的影响,其受氯连续暴露影响的浓度低于间歇暴露的浓度。余氯对鱼鳃有损伤作用,使鱼鳃组织发生病变,如组织增生、上皮组织脱离、鳃中积累大量粘液,生成动脉瘤等<sup>[16]</sup>,从而影响并阻碍鱼鳃与水中溶解氧的交换。余氯也可能通过鱼鳃组织渗入血液中,把血液中能携带氧的还原性血红蛋白氧化成不能携带氧的正铁血蛋白,还可能抑制正铁血蛋白还原性酶的活性,从而导致血液运载氧的能力下降<sup>[17]</sup>。

## 5 结论

内陆核电站在正常营运期间对环境的影响主要是温排水所造成的热影响、循环冷却水中的残余余氯和低放废液中放射性核素的累积生态效应以及取水系统的卷吸撞击引起的机械效应的影响。目前,国外对于内陆核电站对环境的影响研究取得了一定的成果,但国内的内陆核电正处在起步阶段,符合选址要求的水域往往人口密度较大,其低放废水的接纳水体往往是饮用水源地或作为饮用水源的水库,因此,建设内陆核电站需要开展

长期而谨慎的研究论证。在建设前应注重模拟预测和分析以及进行河道水质、地下水、土壤、水生物及居民健康等的调查取样,而且在核电站建成后更需要对上述内容进行大范围的长期严密监测和调查。同时,为了让我们的核电更加安全,我们必须采用更加安全的核电技术或开发更安全的核聚变发电技术。我们应该相信,随着科学技术的进步,核能的利用越来越安全,越来越高效。

## 参考文献:

- [1]上官志洪,张启明,陶云良.内陆核电厂冷却塔的环境影响预测计算[J].辐射防护,2009,7(4):211~218.
- [2] USNRC. Standard review plans for environment reviews for nuclear power plants. NUREG-1555, October 1999.
- [3]姜礼燧.热冲击对鱼类影响的研究[J].中国水产科学,2000,7(2):77~81.
- [4]曾江宁.滨海电厂温排水对亚热带海域生态影响的研究[D].浙江:浙江大学,2008.
- [5]徐晓群,曾江宁,曾淦宁等.电厂温排水对浮游动物分布的影响[J].生态学杂志,2008,27(6):933~939.
- [6]李培泉等.海洋放射性及其污染[M].北京:科学出版社,1983.204~257.
- [7]白志良.广东大亚湾核电站1994~2001年正常运行期间放射性释放的环境影响评价.见:中国核学会,编.全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会论文集汇编.2003.405~410.
- [8]刘达,黄本胜,邱静等.内陆核电站建设对水资源安全影响的问题及对策[J].广东水利水电,2010,10(10):12~19.
- [9]李红,过春燕,刘鸿诗等.内陆压水堆核电站放射性液态流出物对水环境的影响[J].辐射防护通讯,2009,29(2):12~16.
- [10]陈志岳.核电站对环境影响较大的核素,清洁能源(1).
- [11]陈志岳.核电站对环境影响较大的核素,清洁能源(2).
- [12]赵成昆,徐玉明,周如明等.内陆核电厂需关注的问题及不同类型核电机组的适宜性分析[C].全国内陆核电站核与辐射安全学术讨论会,2009.
- [13] Hamilton D H, Jr Flemer D A, et al. Power plants: Effects of chlorination on estuarine primary production. Science [J].1970, 166: 197~198.
- [14] Langford T E. Ecology and cooling water use by power stations[J]. Atom., 1988, 38:5~7.
- [15] Glasstone S, Jordan W H. The disposal of waste heat: In Nuclear power and its environmental effects [J]. An Nuclear Society, La Gaange park, Illinois,1980:304~340.
- [16] Cohen GM,Valenzuela J M.Gill damage in the mosquitofish, gambusia affinis, caused by chlorine in fresh water[J]. Science of Biology Journal, 1977:361~371.
- [17] Mitz S V, Giesy J P. Sewage effluent biomonitoring Survival, growth, and histopathological effects in channel catfish. Ecotoxicol. Environ. Saf., 1985,10:22~39.