

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.013

严重事故下内陆核电水资源安全应对措施

周有胜, 彭疆南

(国核(福建)核电有限公司, 福州 350000)

摘要: [目的]文章旨在论证严重事故下内陆核电厂具有可靠的水资源安全应对措施。[方法]通过对比内陆核电放射性废液处理结果与国家相关标准,分析了严重事故工况下内陆核电的放射性废液的处理措施,同时提出了进一步提高安全性和可靠性的措施—加强备用电源、备用水源和增加废液存贮水池。[结果]结果证明:严重事故下,通过安全壳包容、核岛厂房滞留、水池暂存三道外层的放射性物质隔离措施,能够将放射性物质在厂内进行“存贮、封堵和处理”。[结论]CAP1000内陆核电具有完善的严重事故预防和事故缓解措施,能够从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性,有能力在严重事故下确保水资源安全。

关键词: 内陆核电; 严重事故; 水资源; 应对措施

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0076-05

Protection Measures of Water Resources in the Serious Accident of Inland Nuclear Power Plant

ZHOU Yousheng, PENG Jiangnan

(State Nuclear (Fujian) Nuclear Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: [Introduction]The paper aims to prove the reliable measures for water resources safety under the serious incident of inland nuclear power plant. [Method]By comparing the treatment results of the radioactive waste liquid in inland nuclear power and the national standards, it analyzed the treatment measures for the radioactive waste liquid under the serious incident of inland nuclear power, meanwhile, put forward the measures in order to further improve the safety and reliability of nuclear station, which were strengthening standby power supply, increasing standby water source and increasing waste liquid storage tank. [Result]The results show that under the serious incident, the radioactive material can be stored, blocked and treated in the plant by three radioactive material isolation measures of the containment holding, nuclear island plant retention and temporary storage in the pool at the plant. [Conclusion]CAP1000 inland nuclear power has perfect incident prevention and mitigation measures, which can effectively eliminate the possibility of releasing a large number of radioactive materials by the design. The inland nuclear power has the ability to ensure the safety of water resources under the serious incident.

Key words: inland nuclear power plant; serious accident; measures

2012年10月,国务院批复的《核电安全规划》等提出:新开工建设的核电机组必须符合URD和EUR三代安全标准,具备更加完善的严重事故预防和事故缓解措施。2016年及以后建设的核电机组,从设计上力争实现消除大量放射性物质释放的可能性。即使发生设计基准严重的堆芯损坏和融化事件,核电站本身也能有效地包容放射性,从而保证

不会对环境和公众造成不可接受的影响。2008年冰雪灾害后,国家发改委同意江西彭泽、湖南桃花江和湖北咸宁按AP1000技术路线开展核电厂前期工作。但目前因种种原因,内陆核电发展暂停,其中质疑最大的在于公众对于严重事故下内陆核电确保水资源安全的担忧。

1 内陆核电液态流出物排放管理要求

在我国法律和标准方面,对内陆核电厂液态流出物与滨海核电厂液态流出物的管理要求是一致

的。在遵循“辐射防护最优化”和“废物最小化”的原则下, 对放射性液态流出物实行排放浓度控制和年排放总量控制。

在排放总量方面, 国标《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011) 规定, 按每堆实施放射性液态流出物年排放总量控制。标准规定 3 GW 热功率的反应堆, 其控制值如表 1 所示^[1]:

表 1 放射性液态流出物控制值

Tab. 1 Control value of liquid radioactive effluent

放射性核素	Bq · a ⁻¹	
	轻水堆	重水堆
H-3	7.5×10^{13}	3.5×10^{14}
C-14	1.5×10^{11}	2×10^{11} (氙除外)
其它核素	5.0×10^{10}	2×10^{11} (氙除外)

对于热功率大于或者小于 3 GW 的反应堆, 根据其功率按照上述要求适当调整。同时, 《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》(GB 14587—2011)^[2] 进一步规定, 在核电厂设计阶段, 设计单位应该提出核电厂放射性液态流出物中包括 H-3 和 C-14 在内的各种放射性核素的年设计排放总量, 并经审批确定。同时规定, 按月和季度控制放射性液态流出物排放总量, 每一个月内的排放总量不应超过年度控制总量 1/5, 连续三个月内的排放量不应超过年度控制值的 1/2。滨河、滨湖或滨水库核电厂, 可以结合接纳水域的特性, 制定更合理的排放方式, 报批后实施。

在排放浓度方面, 《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》进一步明确, 内陆核电厂向环境排放的废液中, 除氙和碳-14 外其他放射性核素的浓度不超过 100 Bq/L, 且下游 1 公里处水中的总 β 放射性浓度不得超过 1 Bq/L, 氙浓度不得超过 100 Bq/L。同时规定内陆核电排放口下游 1 公里范围内不得设置取水口。

2 正常运行工况下放射性液态流出物对水资源的影响

CAP1000 核电放射性废液来源包括反应堆冷却剂流出液、地面疏水和设备疏水、洗手废液、化学废液四种放射性废液。正常运行工况下, 各类放射性废液的预计流量及其处理方式如表 2 所示。

正常运行工况下, 内陆核电厂经放射性液体废

物处理系统 (WLS) 处理后废液中放射性核素的浓度约 37 Bq/L, 小于《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011)^[1] 规定的 100 Bq/L。经测算, 一期工程 2 台 CAP1000 核电机组在正常运行工况下一年内产生的经处理合格后的放射性废液总量, 按照连续排放方式测算, 夏季和冬季的排放流量均约为 $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.1 排放总量方面

按照每年运行 7 500 h 计算, CAP1000 单台机组每年的放射性核素总量低于 $4.44 \times 10^8 \text{ Bq/a}$, 只有《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011)^[1] 中 3 GW 热功率的反应堆液态放射性流出物控制值的 1%。

2.2 排放浓度方面

首先, 经过处理后的放射性废液排放口浓度只有 37 Bq/L, 已经在标准要求的 100 Bq/L 以下。其次, 目前内陆核电厂的设计均采用二次循环方案, 处理合格后的放射性废液通过槽式排放系统进一步与电厂冷却塔退水混合后排出, 浓度进一步降低。以江西某内陆核电为例, 一期工程 2 台机组循环系统夏季退水量约 $2\,996 \text{ m}^3/\text{h}$, 冬季约 $2\,070.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 。循环水系统排污水、生活污水、低放废水及其它工业废水总计夏季退水约 $3\,203.69 \text{ m}^3/\text{h}$, 冬季退水约 $2\,278.76 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[4]。按照全年连续排放的方式, 稀释后最终进入受纳水体的退水中的核素浓度夏季约 0.01 Bq/L, 冬季不超过 0.016 Bq/L, 低于《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020—93)^[5] 规定的总 β 放射性物质浓度 1 Bq/L。同时, 混合液进入受纳水体后, 浓度完全在本底值涨落范围之内, 不会对长江水资源及下游饮用水安全造成大的影响。

3 严重事故工况下放射性废液处理的措施

3.1 严重事故废液水量

CAP1000 机组采用非能动专设安全设施, 在失去外部交流电源及全厂断电的情况下, 也能依靠势能、蓄能等非能动设施保证堆芯 72 h 的冷却, 从设计上大大降低了人因事故概率, 预防严重事故发生。即使在发生严重事故后, CAP1000 核电机组通过非能动堆芯冷却系统 (PXS) 持续的将堆芯热量带出堆芯, 再借助非能动安全壳冷却系统 (PCS) 最终将热量带到安全壳外的环境中, 能有效地维护反应

表2 放射性废液流出量及处理流程

Tab. 2 Radioactive waste water outflow and treatment proces

废液来源	预计流量	活度	基准	处理流程
流出液贮存箱	—	—	—	
反应堆冷却剂流出液				
化容下泄流	602 m ³ /a	100% 反应堆冷却剂	CAP1000 -特殊计算 ^①	
安全壳内泄漏至反应堆冷却剂疏水箱	38 l/d	167% 反应堆冷却剂	ANSI/ANS-55.6	过滤, 除盐, 暂存、排放
安全壳外泄漏至流出液贮存箱	303 l/d	100% 反应堆冷却剂	美国国家标准学会/美国核子学会—轻水冷却反应堆中液体放射性废物的处理系统 ^②	
取样疏水	757 l/d	100% 反应堆冷却剂		
地面疏水和设备疏水				
废液贮存箱	—	—	—	
反应堆安全壳冷却	1.9 m ³ /d	0.1% 反应堆冷却剂	—	过滤, 除盐, 暂存、排放
乏燃料池泄漏	95 l/d	0.1% 反应堆冷却剂	—	
其他疏水	2.56 m ³ /d	0.1% 反应堆冷却剂	—	
洗手废液				
洗涤剂废液	—	—	—	
热淋浴水	—	10 -7μCi/g	—	
洗手水	757 l/d	10 -7μCi/g	—	过滤, 监测, 暂存和排放, 如需要, 由反渗透模块进行处理
设备和地面去污	151 l/d	0.1% 反应堆冷却剂	—	
洗衣房	—	—	厂址废物处理设施 (SRTF) 洗衣房	
化学废液				
化学废液	27 l/d	≤5% 反应堆冷却剂	预估	中和处理后排放, 或送往厂址废物处理设施 (SRTF)

注: ①反应堆燃料周期运行时平均下泄; 初始加热, 稀释和硼化; ②ANSI/ANS-55.6 中规定取样疏水的活度为 5% 反应堆冷却剂活度; 100% 用作对 GALE(气态和液态流出物)程序分析的保守输入。

堆压力容器和钢制安全壳的完整性。在严重事故工况下, 安全壳内所有的非能动系统投入使用, 不考虑外界补水的情况下, 安全壳内的所有水源由于堆芯烧毁而最终成为放射性废液, 产生的最大废液量约 3 307.7 m³, 具体如表 3 所示。

表3 严重事故下安全壳内的最大废液量

Tab. 3 The max amount of waste water in the containment of a serious accident

来源	水量/m ³	备注
反应堆冷却剂主回路 (RCS)	243.6	—
堆芯补水箱 (CMT)	141.6	①
安注箱 (ACC)	96.2	②
安全壳内换料水箱 (IRWST)	2 132.3	—
硼酸贮存箱	277	③
乏燃料系统 (SFS) 装料池	417	③
汇总	3 307.7	—

注: ①—2 台, 每台储水量 70.8 m³; ②—2 台, 每台储水量 48.1 m³; ③—执行纵深防御功能水源。

在极限情况下, 安全壳泄漏, 考虑外部的应急补水, 经计算事故后 3 天废液量达到 4 800 m³,

7 天内到达 6 700 m³。同时保守考虑辅助厂房约 500 m³ 水量, 事故后最终需要处理的放射性废液量约 7 200 m³。7 天之后, 可通过辅助措施维持安全壳内的自然循环, 并维持废液量不会超过 7 200 m³。借鉴日本福岛核事故善后工作的有关经验反馈, 为了有效防止大量放射性废液非受控释放, 对有关放射性废液可以采用贮存、封堵和处理的措施, 确保不对外界环境产生影响^[6]。

3.2 隔离措施

(1) 在核电厂发生严重事故后, 首先将放射性废液包容在安全壳厂房(抗震 1 类, 0 m 以下约 3 300 m³) 内部; (2) 在利用上述有效滞留和包容措施的基础上, 利用厂区已有但在事故下未受损的其他贮存设施, 包括辅助厂房、放射性废物厂房内部的各种废液贮存罐(500 m³)、辅助厂房(抗震 1 类、0 m 以下空间约 3 000 m³)、厂区设置的低放废液贮存罐(抗震类, 两台机组 3 × 1 000 m³) 和非放射性废液贮存罐(抗震监测箱, 两台机组 3 × 1 000 m³); (3) 利用厂区空地新建一定数量的废液贮存

罐,并通过临时管线连接输送。针对一期工程2台机组而言,厂区贮存空间超过 1.8万 m^3 。

通过上述贮存设施,即使在考虑严重事故发生后的7天恢复闭式循环冷却的事故场景,CAP1000机组有足够的贮存空间来满足放射性废液隔离、存贮在厂内的要求。

3.3 封堵措施

我国内陆核电厂址选择均位于地震活动水平很低的地区,且均为基岩厂址。江西彭泽核电、湖南桃花江和湖北咸宁核电厂址的设计基准地面运动峰值加速度均为水平方向 0.15g ,竖向 0.1g ,小于CAP1000机组设计SSE安全停堆地震动水平峰值加速度 0.3g 。极不可能发生类似福岛核电厂因超设计基准地震造成核安全相关厂房破损而导致放射性废物外泄的事故。但为了加强纵深防御的最后一道防线,根据厂址土壤条件储备一定数量的阻水剂(如水玻璃等),并配备一定数量的挖掘机、铲车等,同时加强在线监测,一旦发现放射性废液泄漏,及时使用阻水剂进行封堵,防止放射性废液泄露影响环境。

3.4 处理措施

对于严重事故下产生的放射性废液,通过调用区域联合储备的移动式放射性废液处理设备,进行废液处理。包括以下处理措施:

1)除油:通过油水分离装置将放射性事故废液中的油分离,为后续离子交换等介质提供良好的水质条件。

2)无机离子吸附(除Cs外):第一级采用Cs选择性吸附性能高的专用无机离子吸附剂,既有效地降低Cs浓度,又避免吸附过量导致二次废物放射性水平过高;第二级可以采用核电厂常用的Cs吸附介质“沸石”来进行Cs分离处理^[7]。

3)采用絮凝沉淀技术:向事故放射性污水中添加化学絮凝剂,使其中尚未被处理的腐蚀产物和胶体进行有效的絮凝,凝聚成为更大的絮凝体后沉淀、吸附分离^[8]。

4)反渗透(RO):事故放射性污水的水质较为复杂,在含有大量盐类情况下采用反渗透工艺,能够有效降低液体中的含盐量。

5)干燥浓缩:可与RO技术配合使用,针对RO除盐产生的浓液进行干燥浓缩,以减少二次废物体积。

日本福岛放射性废液处理采用的ALPS装置^[9](东芝公司与美国Energy Solutions共同开发),通过多级吸附处理,除氚以外的放射性核素能得到有效去除,关键核素去污因子达到了 $10^7 \sim 10^8$,放射性活度降到 1Bq/L 以下。我国内陆核电厂可以考虑配置一到两套移动的核电厂事故放射性废液处理装置,紧急情况下相互调用。

4 进一步提高核电厂安全性和可靠性的措施

目前“两湖一江”内陆核电采用的CAP1000设计吸收了三门、海阳依托项目在评审、设计、制造、施工过程中的经验反馈,同时吸收世界核电发展过程的重要经验反馈,并针对近几年以来,中国工程院、核能行业协会和国内科研院所、高校就日本福岛事故分析所提出的改进,尤其是对内陆核电厂址所提出的改进意见,进一步提高设计安全裕度^[10]。

结合项目厂址特征,可以考虑进一步强化备用电源、备用水源和备用水池,增强防堆芯融化、防安全壳泄漏概率和增强放射性废液的暂存处理能力。

4.1 备用电源

提高外来220 kV交流电源安全。考虑从与500 kV输电线路不同的电网接入220 kV交流线路作为辅助厂用交流电源,同时提高输电线路铁塔抗震、防冰冻设计基准。对彭泽厂址来讲,一期工程220 kV电源从隶属于华中电网的江西电网引入;二期工程220 kV电源可以考虑从隶属华东电网的安徽东至县引入,同时两条输电线路互为备用。由于两条220 kV备用辅助厂用交流电源来源于不同的电网,大大提高单个电网瓦解时的辅助厂用备用电源的安全可靠性。

提高厂内应急交流电源安全性。采用大容量柴油发电机+分布式小容量柴油电动机相结合的布置方式,分散风险,提高应急厂用交流电源安全性。对重要补水泵、注水泵或消防泵,除设置交流/直流电动机驱动备用泵外,再增加一台柴油发动机直接驱动的备用泵,提高备用电源多样性。另外,根据厂内计算容量,配置应急情况下使用的移动电源设备。

4.2 备用水源

CAP1000 非能动技术在确保堆芯安全和余热导出方面, 设置了1个安全壳冷却水箱($2\ 864\ \text{m}^3$)、2个堆芯补水水箱(共 $142\ \text{m}^3$)、2个安注水箱(共 $96\ \text{m}^3$)和1个安全壳换料水箱($2\ 132\ \text{m}^3$), 正是通过这六个带有储能性质(势能和压力能)的非能动装置来保证堆芯注水冷却和堆芯余热导出, 实现严重事故下72 h无需人工干预, 保证堆芯安全。

另外设计上, 每台机组为安全壳冷却配置有一个辅助水箱, 辅助水箱容积 $3\ 028\ \text{m}^3$, 通过两台泵向安全壳冷却系统补水, 补水量能够将安全壳非能动冷却时间从72 h延长一倍。在设计上可以考虑在不同机组的辅助水箱之间设置联络母管, 实现辅助水箱互联互通。

4.3 增加废液存贮水池

在严重事故下, 针对实现闭式循环冷却的严重事故场景中可能产生的总放射性废液量在 $7\ 200\ \text{m}^3$ 的数量级水平。可以考虑在厂区设置一个低位的 $2 \times 5\ 000\ \text{m}^3$ 的大容量废液贮存水池, 确保即使发生严重事故, 核电站首先能够第一时间将高放废液长期滞留、隔离、存储在厂区之内, 从实际措施上消除大量放射性废液流入长江, 确保长江水资源安全万无一失。

5 结论

内陆核电厂采用的CAP1000压水堆技术, 通过强化备用电源、备用水源和备用水池等手段, 再加上原设计中的通过非能动技术确保堆芯完整, 堆芯熔融物滞留技术缓解堆芯融化事故, 钢制安全壳设计技术包容放射性物质, 基于干厂址的设计确保防洪安全等措施, 在严重事故下确保安全壳的完整性, 保证大量放射性物质不向环境释放。即使在发生安全壳泄露, 也可通过“存贮、封堵和处理”等措施, 在设计上实际上消除大量放射性废液释放到环境, 确保水资源安全。

参考文献:

- [1] 环境保护部核与辐射安全中心. 核动力厂环境辐射防护规定: GB 6249—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 环境保护部核与安全中心. 核电厂放射性液态流出物排放技术要求: GB 14587—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.

- [3] 上海核工程研究设计院. 江西彭泽核电项目一期工程初步设计文件 [E]. 上海: 上海核工程研究设计院, 2010.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活应用水水源水质标准: CJ 3020—93 [S]. 北京: 华文出版社, 1993.
- [5] 武汉大学. 江西彭泽核电项目一期 $2 \times 1\ 000\ \text{MW}$ 级机组水资源论证报告书 [E]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- [6] 中国核能行业协会. 内陆核电厂严重事故工况下确保水资源安全的应急预案研究 [R]. 北京: 中国核能行业协会, 2013.
- [7] 李元, 林建中, 汤东升, 等. 沉淀絮凝—吸附处理放射性废水的模拟实验 [J]. 南方能源建设, 2015, 5(4): 81-87.
LI Y, LIN J Z, TANG D S, et al. Flocculation and adsorption experiment for treatment of simulated radioactive wastewater [J]. Southern Energy Construction, 2015, 5(4): 81-87.
- [8] 李元, 林建中, 汤东升. 内陆AP1000放射性废液处理工艺改进分析 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 66-69.
LI Y, LIN J Z, TANG D S. Improvement of radioactive waste water treatment technology in inland AP1000 nuclear power plant [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 66-69.
- [9] 王旭东. 多核素去除装置ALPS进行热试 [J]. 辐射防护通讯, 2013, 5(10): 44-45.
WANG X D. Multi nuclide removal device APLS for thermal test [J]. Radiation Protection Bulletin, 2013, 5(10): 44-45.
- [10] 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研究现状 [J]. 广东水利水电, 2010(10): 12-15+19.
LIU D, HUANG B S, QIU J, et al. Problems and research status of Inland nuclear power construction on water resources safety [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010(10): 12-15+19.

作者简介:



ZHOU Y S

周有胜(通信作者)

1984-, 男, 甘肃民勤人, 工程师, 经济师, 工程管理学士, 主要从事于核电工程项目前期开发工作(e-mail)271105575@qq.com。

彭疆南

1973-, 男, 湖南衡阳人, 高级工程师, 电力系统自动化博士, 主要从事核电管理和项目开发工作(e-mail) pengjiangnan@snptc.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)