

核安全

NUCLEAR SAFETY

主管单位 中华人民共和国生态环境部
主办单位 生态环境部核与辐射安全中心
出版单位 《核安全》编辑部
主 编 周启甫
执行副主编 王晓峰
编辑部主任 于大鹏
地 址 北京市海淀区红联南村54号
邮 编 100082
信 箱 北京8088信箱
编 辑 部 010-82205563 82205716
010-82203444 82203547
广 告 部 010-82205645
发 行 部 010-82205713
传 真 010-82203590
官 网 <http://haqy.cbpt.cnki.net>(在线投稿)
邮 箱 heanquanzazhi@263.net.cn
广告发布登记 京海工商广登字20180003号
国际标准刊号 ISSN 1672-5360
国内统一刊号 CN11-5145/TL
国内发行 中国邮政集团公司北京市报刊发行局
邮发代号 82-956
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
发行代号 BM9557
印 刷 北京一二零一印刷有限公司
国内定价 80.00元

版权所有 未经许可 不得转载

如发现印刷、装帧等刊物质量问题请与发行部联系。
声明：本刊与网络数据库合作，以数字化方式传播本刊全文。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付，不再另行发放。作者如不同意将文章入编，投稿敬请说明。

2024年第3期 总第98期

双月刊 公开发行

2024年6月30日出版

阅读·检索



关于·我们



《核安全》微信公众号



生态环境部
核与辐射安全中心



《核安全》杂志
微信公众号



《核安全》杂志
官方微博

《核安全》编委会

编委会主任

王大中
清华大学·科学院院士·副主席

编委会副主任

于俊崇
中国核动力研究设计院·工程院院士

陈佳洱
北京大学·科学院院士

叶奇蓁
秦山核电集团筹备组·工程院院士

林忠钦
上海交通大学·工程院院士

孙玉发
中国核动力研究设计院·工程院院士

郑建超
中国广核集团有限公司·工程院院士

吴祖泽
军事医学科学院·科学院院士

魏炳波
西北工业大学·科学院院士

(按姓氏笔画排序)

编委会委员

于涛

王为

田文喜

史克亮

刘非

张庆贤

陈义学

周涛

顾汉洋

黄小桁

蒋诗平

程琦福

谭思超

叶延程

培育一流核安全领域科技期刊 持续提升核安全软实力

学术期刊作为开展学术交流的重要平台、传播思想文化的重要阵地,对于提升国家科技竞争力和文化软实力,构筑中国精神、中国价值、中国力量具有重要作用。习近平总书记在二十届中央政治局第三次集体学习时指出:“要加快培育世界一流科技期刊,建设具有国际影响力的科技文献和数据平台,发起高水平国际学术会议,鼓励重大基础研究成果率先在我国期刊、平台上发表和开发利用。”

《核安全》杂志是国内核安全领域唯一的国家级权威刊物。自 2003 年创刊以来,不断改进出版模式与规模,增加刊发文章的质与量,扩大学术影响力,有效地服务核安全科学技术交流,对于推动核安全健康发展起到了积极作用,成为核安全政策宣传阵地、技术交流平台 and 对外宣传窗口。

当前,我国核电建设进入规模化高峰期,在总体国家安全观视角下核安全越发显得重要。核安全不仅包括不出核事故的“硬安全”,确保核安全的技术与管理能力,也包括科学决策支持、正确信息传播、有效舆情应对、健康氛围营造等“软安全”,我们要下大力气尽快补上“软安全”这个短板。为此《核安全》广泛征文,刊发专刊,从不同角度分享了核与辐射安全的监管理念、方法模式、技术成果,提出了推动核安全高质量发展的探索与思考。

期刊如明镜,论文如明珠。希望《核安全》能够继续坚持办刊宗旨,提高政治站位,传承好、发扬好核与辐射安全监管宝贵经验,争创一流学术期刊,在提升核安全软实力方面发挥更重要的作用。

生态环境部 副部长
国家核安全局 局长

董保同

◆ 监管 40 年

- 1 在实践中不断发展的核电安全理念和方法——一种历史角度的考察·····汤搏
- 21 从核安全多重属性论促进核安全科学认知·····殷德健
- 25 纵深防御理念下的核电机组调频能力深入研究·····王煦嘉, 齐军, 沙正峰
- 33 总体国家安全观视域下辐射安全监管的“位”与“为”·····梁云平
- 37 基于海洋放射性核素时空演化体系的海洋核安全评估技术·····林武辉, 杜金秋, 拓飞, 等
- 45 我国核电运行与退役产生放射性废物回顾与发展·····谢荣荣, 李峰, 朱杰, 等
- 51 核技术利用领域“互联网+监管”实践总结与探索·····刘坤, 廖云华, 顾东辉, 等
- 55 基于知识图谱的核电厂安全审评辅助决策系统设计与工程小样实现·····郭超, 依岩, 骆文, 等
- 63 核安全“软实力”在知识积累和文化遗产等方面的实践与理论研究·····于大鹏, 宋培峰, 王桂敏, 等
- 70 双碳目标下高温气冷堆替代中小型火电的思考·····张浩, 王建建, 赵文军, 等
- 75 核安全管理体系在核电土建施工中的构建与实施探讨·····凡小芬
- 81 浅探核能利用生态补偿·····张蔚华, 粟俊杰, 王兴彪, 等
- 88 企业集团层级核与辐射安全监督评估模式的创新实践·····顾海荣, 陈军琦, 李现锋, 等
- 94 核电厂严重事故日常管理经验总结与发展建议·····孙峰平
- 99 地浸采铀过程中抽注平衡相关问题总结与建议·····雷富安, 史克亮, 杨掌众, 等
- 107 核电厂乏燃料水池扩容改造辐射防护技术实践与发展·····陈秋炆, 刘省勇, 张文利, 等
- 112 华东地区核电厂操纵人员管理现状和对策·····刘建

(本期责任编辑: 梁晔 徐晓娟 许龙飞)

- 1 Evolving Nuclear Power Concepts and Methods in Practice an Examination from a Historical Perspective
(Tang Bo)
- 21 Promoting Scientific Perception of Nuclear Safety in Light of the Multiple Attributes of Nuclear Safety
(Yin Dejian)
- 25 Deepening Research on the Frequency Control Capacity for Nuclear Power Plant under the Concept of Defense in Depth
(Wang Xujia, Qi Jun, Sha Zhengfeng)
- 33 The “Position” and “Action” of the Radiation Safety Supervision from the Perspective of the Overall National Security Concept
(Liang Yunping)
- 37 Assessment for Marine Nuclear Safety based on Spatiotemporal Evolving Systems of Marine Radioactivity
(Lin Wuhui, Du Jinqiu, Tuo Fei, Cao Shaofei, Zhang Yibang, Qi Di, Chen Liqi, Yu Kefu)
- 45 Review of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants Operation and Decommissioning in China
(Xie Rongrong, Li Feng, Zhu Jie, Wang Hongzu)
- 51 Practice Summary and Exploration of “Internet + Supervision” in the Field of Nuclear Technology Utilization
(Liu Kun, Liao Yunhua, Gu Donghui, Yu Qian)
- 55 Design and Engineering Sample Implementation of Nuclear Power Plant Safety Review Decision-Making Aided System based on Knowledge Graph
(Guo Chao, Yi Yan, Luo Wen, Liang Kanhui, Li Chun)
- 63 The Research and Discussion on the “Soft Power” of Nuclear Safety in Terms of Knowledge Accumulation and Cultural Inheritance
(Yu Dapeng, Song Peifeng, Wang Guimin, Zhang Yue, Dai Wenbo, Zhou Lin)
- 70 The Consideration of Replacing Small and Medium-sized Thermal Power Plants with High Temperature Gas Cooled Reactor under the Goal of Emission Peak and Carbon Neutrality
(Zhang Hao, Wang Jianjian, Zhao Wenjun, Wu Tingting)
- 75 Construction and Implementation of Nuclear Safety Management System in Civil Construction of Nuclear Power Plant
(Fan Xiaofen)
- 81 Explore the Ecological Compensation of Nuclear Energy Utilization
(Zhang Weihua, Su Junjie, Wang Xingbiao, Xu Xingjia, Zhang Weihua)
- 88 Innovative Practice of Nuclear and Radiation Safety Inspection and Assessment Model at Enterprise Group Level
(Gu Hairong, Chen Junqi, Li Xianfeng, Zhang Zhifei, Chen Zhaohui, Hu Xiaomin)
- 94 Summary of Daily Management Experience and Development Suggestions for Serious Accidents in Nuclear Power Plants
(Sun Fengping)
- 99 Summary on Issues Related to Pumping Balance in in-situ Uranium Mining
(Lei Fuan, Shi Keliang, Yang Zhangzhong, Chen Dongliang, Yu Jianxing, Yao Yongkui, Zhang Shucong, Wu Wangsuo)
- 107 Practice and Development of Radiation Protection Technology for Nuclear Power Plant Spent Fuel Pool Expansion and Renovation
(Chen Qiuyang, Liu Shengyong, Zhang Wenli, Qin Qiang)
- 112 Current Situation and Countermeasures of Nuclear Power Plant Operator License Management in East China
(Liu Jian)

汤搏. 在实践中不断发展的核电安全理念和方法——一种历史角度的考察[J]. 核安全, 2024, 23(3): 1-20.

Tang Bo. Evolving Nuclear Power Concepts and Methods in Practice an Examination from a Historical Perspective [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 1-20.

在实践中不断发展的核电安全理念和方法 ——一种历史角度的考察

汤搏

(生态环境部核电安全监管司, 北京 100082)

摘要: 核电安全理念、要求和方法是随着核能的发展而逐步建立的, 并且会随着新的挑战而不断发展下去。目前的核安全方法主要由确定论安全方法和概率论安全方法构成。确定论安全方法是针对特定堆型和系统的处方式的方法, 而后续发展起来的概率论安全方法则是一套系统化的方法。近年来, 概率论安全方法已得到越来越广泛的应用, 极大地改变了人们看待核安全问题的方式, 是未来重要的发展方向。

关键词: 确定论安全方法; 概率论安全方法; 基本安全功能; 安全目标; 风险评价

中图分类号: TL48 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0001-20

保证核电安全的一套基本理念、安全要求和方法论并不是在核能发展初期就很完备, 而是随着核反应堆和核电的发展, 以及对安全问题认识的发展和深化逐步建立起来的。

今天, 在核电厂设计方面, 这套理念和体系主要由两个互补的方法, 即确定论安全方法和概率论安全方法所构成, 与确定论安全方法和概率论安全方法所对应的就是确定论安全要求和概率论安全要求。确定论安全方法和概率论安全方法都主要是由美国人在核电发展过程中所建立的, 并被国际社会所广泛接受。

毛泽东同志曾经精辟地指出: “在生产斗争和科学实验范围内, 人类总是不断发展的, 自然界也总是不断发展的, 永远不会停止在一个水

平上。因此, 人类总得不断地总结经验, 有所发现, 有所发明, 有所创造, 有所前进。”这是马克思主义的认识论, 核安全的发展历史也生动地证明了这一点。像其他所有事情一样, 核安全也是在不断面临新的挑战下发展变化的, 而且会继续发展变化下去, 不可能一劳永逸, 也不存在什么“兜底”手段。

1 确定论安全方法

确定论安全方法的英文是“Deterministic approach”。发展到今天, 确定论安全方法可以概括为“以纵深防御概念为基础, 以确保三项基本安全功能为目的, 针对一套确定的设计基准工况, 采用保守的假设和分析方法, 以满足特定验收准则”的方法。

收稿日期: 2023-10-27 修回日期: 2024-05-13

作者简介: 汤搏 (1962—), 男, 研究员, 现主要从事核安全审评和监管工作

1.1 纵深防御概念

通常认为核安全领域的纵深防御概念起源于20世纪40年代中期美国汉福特核基地的汉福特B核材料生产堆的设计建造过程,汉福特B的建造工作是委托给杜邦公司的。在建造过程中,杜邦公司的化学工程师与核物理学家们产生了很大的分歧。此前在芝加哥1号的设计和临界试验过程中,核物理学家们产生了很强的自信,认为已经很好地掌握了反应堆的知识,但杜邦公司的化学工程师根据自己的工程经验,坚持在设计中留有裕度。这个思想被后来的核工程师们广泛借鉴,在与安全有关的方面采用设计裕度,以及设置多重防御措施等方式来保证安全功能的高度可靠性。纵深防御概念的理论基础就是人类认知能力的限制总是会导致不确定性,需要采取措施来补偿这种不确定性。^[1]

纵深防御概念在核电厂的一个典型应用就是在放射源(如反应堆堆芯)和环境之间设置多道包容屏障,包括燃料包壳、反应堆冷却剂系统压力边界和安全壳等。^[2]

今天,按照国际原子能机构的描述,在核电厂总体上存在五个纵深防御的层次:

第一层次是通过保守的设计、高质量的建造和严格的运行来防止偏离正常运行和防止系统失效;

第二层次是通过设置监测和保护系统来探测和纠正偏离正常运行状态,防止预计运行事件升级为事故工况;

第三层次是通过固有安全特性、故障安全设计、工程安全设施和事故处理规程来控制设计基准事故的后果;

第四层次是通过补充的措施和规程对付选定的超设计基准事故;

第五层次是通过应急计划减轻放射性物质释放所造成的后果。

与国际原子能机构的概念有所区别,美国人的纵深防御概念更多地指实体屏障和对实体屏障的保护。

概括地说,纵深防御概念要求设置多道防御层次。例如对核电厂内火灾的防护,我们就

可以清楚地划分出纵深防御的层次:

(1)通过减少可燃物和减少点火源来降低火灾发生的可能性;

(2)设置火灾探测系统和灭火系统来及时探测火灾并加以扑灭;

(3)划分防火分区并在防火分区的边界设置耐火屏障,在火灾不能被扑灭时限制其蔓延。

但是对于外部事件,如地震和洪水等,我们只能确定一个“设计基准”(后面会对这个概念给予解释),作为安全构筑物、系统和设备设计所需的设防要求,很难划分出“防御层次”。

当然,对纵深防御概念也存在争论,例如有人问:“如果能够确定不确定性的大小,并在设计中加以充分考虑,是否还需要采纳纵深防御概念?”

也许有人会反驳:“正是因为人类的认知能力有限制,所以无法确定不确定性的大小。”那么后一个问题就来了:“既然不能确定不确定性的大小,又如何确定什么样的纵深防御措施能够补偿这种不确定性呢?”

由于对纵深防御概念的理解有差异,所以对其的定位也有差异。美国人更多地是把纵深防御作为一种概念,在核安全要求的建立过程中恰当地给予考虑,而其本身并不是核安全要求。国际原子能机构在其安全标准中则把纵深防御作为一种要求来对待。

1.2 三项基本安全功能

三项基本安全功能指反应堆停堆、余热排出和放射性包容。所谓保证核电厂的安全,就是在各种设计基准工况下(今天已扩展到某些超设计基准工况)保证三项基本安全功能的执行。在确定论安全方法中,安全设计的重点也放在三项基本安全功能的实现上。

三项基本安全功能的确定有一个历史过程。按照时间顺序,关注的重点首先是反应堆停堆,然后是放射性包容,最后是余热排出。

1.2.1 反应堆停堆

1942年,当著名核物理学家费米教授率领一个团队在芝加哥大学体育场看台下建设世界上第一座“核反应堆”(pile)芝加哥1号时,特

别关注的是“一旦链式反应触发,是否能够得到控制”。

为了保证不出现链式反应失控,芝加哥1号设置了两套自动控制棒、一套手动控制棒,除此之外,还设置了一套绳索吊挂的“安全控制棒”,分派一个“安全控制棒斧头人”(Safety control rod axe man,美国人后来将上述单词的第一个字母组合起来,用SCRAM来代表反应堆停堆)手持利斧站在旁边,随时准备砍断绳索。因此,可靠的反应堆停堆成为首先被关注的基本安全功能。

1.2.2 放射性包容

在20世纪40年代到50年代初期,保证公众安全的方式是依赖于“禁区”的设置,就是在反应堆和公众之间保持足够的距离,以在反应堆发生事故时保证公众所受到的辐射照射可接受。这一时期的核安全管理政策又被称为“远距离厂址”政策。

如美国要求考虑“最坏的可想象事故”(实际就是全堆芯熔化),并且不考虑任何的放射性包容,计算出一个边界(在边界处公众受到的辐照剂量应小于3000毫希沃特),这个边界以内将被划分为“禁区”。由于这个时期的反应堆主要是服务于军事领域的研究性或生产性反应堆,多位于偏远的地区,例如新墨西哥沙漠这样的地区,所以“远距离厂址政策”是可以实现的。

1952年,美国要在离纽约州圣莱克迪镇19英里的克诺斯原子能实验室建设一座潜艇用原型钠冷反应堆。评估表明,反应堆所处的位置不能满足“远距离厂址政策”,但核能军事应用的紧迫性又占有压倒性的地位,此时所想到的方法是采用一个钢制球形“安全壳”(Containment),将放射性物质“包容”起来[美国人认为这是采取工程措施来解决核安全问题,并由此产生了一个外界听起来非常费解,而核能界经常使用的术语:“工程安全设施”(Engineering safety feature),国内经常翻译为“专设安全设施”]。当美国开始发展核电时,由于核电厂反应堆的功率远远大于研究性反应堆甚至核材料生产堆,同时必须考虑送配电的问题,采用“禁区”政策更加不现实,

所以“放射性包容”成为必不可少的选择,也成为“基本安全功能”之一。

1.2.3 余热排出

核裂变反应的一个重要特点是,即使链式反应中止,已发生的裂变反应所产生的裂变产物会继续衰变,放出衰变热。衰变热与反应堆结构材料、冷却剂等所含的显热之和被称为反应堆的余热。

20世纪60年代中期,为了改善核电厂的经济性,核电厂的功率开始急剧增加。此时,美国的核安全咨询委员会(Advisory Committee of reactor safeguard,ACRS)开始关注一个问题,即所谓“中国综合症”的问题。^[3]

“中国综合症”是美国布鲁海文实验室在核安全研究中提到的一个现象,就是在反应堆堆芯功率较大时,如果反应堆堆芯熔毁,即使已经停闭反应堆,其最终结果是衰变热仍可能熔穿反应堆压力容器,继而熔穿安全壳底板,进入安全壳下部的地层,并继续向下方穿透。由于在地球上与美国相对的一侧是中国,人们开玩笑说最坏的结果就是熔穿地球,并从中国一侧熔出,所以这种现象被称为“中国综合症”。实际上布鲁海文实验室评估到安全壳下方30米左右熔融物就会凝固。但熔融物熔穿安全壳底板后,放射性物质可能通过安全壳下方的地质结构进入环境,如通过泥土进入大气或地下水,所以“中国综合症”也是不可接受的。

由于当时工程上没有更好的措施可以解决“中国综合症”问题[其实美国西屋公司也提出了“堆芯捕集器”(core catcher)的设想],所以防止“中国综合症”的办法就是不让反应堆堆芯熔毁,此时的关注集中到“应急堆芯冷却系统”上。应急堆芯冷却系统的作用就是在反应堆发生事故,如丧失堆芯冷却剂时,向堆芯紧急注入冷却剂,排出堆芯的衰变热,以防止堆芯的熔化。为了在不同的事故情景下都能向堆芯注入足够的冷却剂,在压水堆核电厂中通常设有高压安注系统、中压安注系统和低压安注系统。由于反应堆衰变热的积累可能导致多道放射性包容屏障的破坏,所以排出堆芯余热也成为基本安全

功能之一。

目前核电厂安全所集中关注的问题是三项基本安全功能的实现。核电厂的安全构筑物、系统和设备主要是围绕实现三项基本功能设计的,核安全监管的重点也是集中在承担三项基本安全功能的构筑物、系统和设备上。出于对核电厂安全构筑物和设备可靠性的高度重视,对其提出了一系列严格甚至苛刻的要求,如特殊的质量保证措施、特殊的抗震要求,以及能够承受事故工况下环境条件的“环境鉴定”要求等(通常又被称为“安全级”构筑物或设备)。举个例子,对反应堆冷却剂系统而言,规范要求其质量应该达到“现有工业能力能够达到的最高标准”。安全系统的设计也要满足多重性、多样性和独立性等要求。

但是三项基本安全功能的设立并不平衡,可以用这样的话来概括,即反应堆停堆是手段,放射性包容是目的,而余热排出是关键。可以说余热排出是核电厂最关键的安全功能,实际上目前轻水堆核电厂的大部分安全系统是围绕余热排出设计的,余热排出的可靠性也在很大程度上决定了核电厂的安全水平。

也有一些人认为,目前的三项基本安全功能还不够完善。例如核电厂运行人员在处理核电厂事故时,需要对核电厂的状态有清晰的了解(通过福岛第一核电厂事故,这一点应该可以被更清楚地认识),所以核电厂状态监测也应列入基本安全功能。事实上,虽然在许多安全标准中没有将核电厂状态监测作为基本安全功能,但核电厂的设计已经把它作为实践,将负责事故后重要参数监测的系统设计为“安全级”。

1.3 设计基准工况

前面提到,在 20 世纪 40 年代到 50 年代初美国的远距离厂址政策要考虑“最坏的可想象事故”。20 世纪 50 年代初,美国开始考虑核电的发展,美国原子能委员会发现,即使考虑“安全壳”的作用,使用“最坏的可想象事故”评估,“除了离人口中心几百英里的地方,否则无法选到核电厂厂址”。

美国原子能委员会认为要在现实和极端的

考虑之间取得适当平衡,应该考虑的是“可信事故”而不是“最坏的可想象事故”。美国原子能委员会认为“可信事故”是由单个设备的失效,如某个管道的破裂、某个泵的卡轴、某个阀门的误动等所导致。对于当时一些人质疑的“为什么不是两台、三台或更多设备失效的组合”,美国原子能委员会简单回答:“我们认为那不可信。”后面我们还要提到,实际上当时的方法论也无法支持处理设备的组合失效问题,即无法建立合适的失效组合规则。

在众多的“可信事故”中,要找出一个后果最严重的事故,称为“最大可信事故”。安全评价主要集中在“最大可信事故”后果的评价上,认为“最大可信事故”的后果可接受,则核电厂的安全就是可接受的。

20 世纪 60 年代中期,英国核安全专家法墨提出了风险控制的概念。法墨认为,从风险控制的角度,不能认为“最大可信事故”的后果可接受,核电厂的安全就可接受,因为“最大可信事故”发生的概率可能很低,所以允许的后果可以更严重一些;而某些“可信事故”发生的概率可能较高,则允许的后果也应该比较小。法墨还提出,从社会可接受性角度说,即使一个事故发生的概率极低,也不能允许其后果无限大,对最大后果也应有所限制。

于是“可信事故”的概念很快被“设计基准事故”的概念所取代。所谓“设计基准事故”就是将“可信事故”按照可能发生的频率进行分类,并规定不同的可接受放射性后果(验收准则)。“设计基准事故”再加上核电厂的正常运行工况和异常运行工况(又称为“预计运行事件”或“预期运行瞬态”)构成了核电厂的“设计基准工况”。

设计基准工况划分过少,不能体现风险控制的原理;划分过多,又会增加工程分析的复杂性。目前核电厂设计基准工况多划分为四种工况,其工况划分和对应的可能发生频率如下:

- 正常运行:发生频率在 $10^0 \sim 10^{-1}$ /堆年;
- 预计运行事件(预期运行瞬态):发生频率在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ /堆年;

- 稀有事故(Ⅲ类事故): 发生频率在 $10^{-2}\sim 10^{-4}$ /堆年;
- 极限事故(Ⅳ类事故): 发生频率在 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ /堆年。

对压水堆核电厂而言,正常运行包括了功率运行、正常的功率升降和停堆换料等工况;预计运行事件的定性描述是一个核电厂寿期内可能发生一次到数次的工况,它包括了发电机甩负荷、汽轮机故障、丧失对蒸汽发生器的供水(主给水)、一束控制棒的意外提升或跌落和安全注入系统的误启动等;稀有事故的定性描述是在一个核电厂的寿期内预计不会发生,但在众多的运行核电厂中某一核电厂可能会发生的事故,它包括了反应堆冷却剂系统的小破口、主蒸汽管道或主给水管道的的小破口、反应堆冷却剂系统稳压器释放阀的误开启等;极限事故则包括反应堆冷却剂系统的大破口、主蒸汽或主给水管道的的大破口、反应堆冷却剂泵卡轴、蒸汽发生器传热管破裂和一束控制棒的意外弹出等。极限事故的定性描述是预计在核电厂内不会发生,但为了核电厂的安全要假想其会发生事故,所以极限事故又经常被称为“假想事故”,但有些文献将稀有事故也称为假想事故。

从上述设计基准工况的可能发生频率看,核电厂的设计中已考虑了发生频率极低的情况,这也是保证核电厂安全的必要条件。

上述设计基准工况都是考虑核电厂内部设备的失效,通常被称为“内部事件”。20世纪60年代中期,人们开始关注自然灾害或外部人为原因对核电厂安全的影响,这些事件又被称为“外部事件”。其后建立了一系列针对“外部事件”的设计要求。

对外部人为事件而言,如果不能证明其对核电厂安全构筑物、系统和设备发生不可接受影响的概率每堆年小于 10^{-7} ,则在这些构筑物、系统和设备的设计中就要考虑对这些事件的防护。

对自然灾害而言,也为安全构筑物、系统和设备确定了设防要求,如“安全停堆地震”(最大假想地震)、“可能最大洪水”“可能最大降

水”等,所考虑的这些自然灾害的可能发生频率大约都在 10^{-4} /堆年(万年一遇)。用一句定性的话描述,所考虑设防的自然灾害应该是以人类现有科学技术基础和认知水平所能认识到的最大灾害(作为对照,民用建筑的设防要求则低得多,如对地震的设防要求是500年一遇的水平,而三峡大坝的抗震设计基准是5000年一遇的水平)。

设计中所考虑的“外部事件”通常又称为“设计基准”。

由于要考虑的自然灾害的水平非常极端,受人类认知水平限制,所以有时其不确定性就相当大,日本福岛第一核电厂事故的经验教训充分表明了这一点。福岛第一核电厂事故后,国际上高度重视对“超过设计基准的自然灾害”的防护,评估核电厂防护“超过设计基准的自然灾害”的裕度,但像前面在讨论“纵深防御概念”时所提到的,由于经常无法确定不确定性的的大小,所以留出多大的裕度也是一直引起争论的问题。

1.4 保守假设和分析方法

由于在实际的核电厂中无法通过试验等手段来验证核电厂在事故工况下的真实表现,所以核电厂在事故工况下的安全性是否可接受是通过“事故分析”确定的。事故分析主要针对预计运行事件和设计基准事故,预计运行事件和设计基准事故在事故分析过程中又被称为“始发事件”或“假设始发事件”(始发事件,顾名思义,指的是事故分析的起点。从这点出发,按照事故发展的进程,分析事故最后到达的终点,即事故后果。在确定论安全方法中,对于外部事件,如地震,在发生小于安全停堆地震的地震时,只能假设按照抗安全停堆地震要求设计的构筑物、系统和设备都保持有效;而发生超过安全停堆地震的地震时,只能假设所有的构筑物、系统和设备都失效,即对外部事件无法构建“事故进程”,从而外部事件无法作为事故分析的始发事件,而只能作为安全构筑物、系统和设备的“设计基准”)。由于“事故分析”的计算量巨大,目前这种分析大都由计算机程序(事故分析程序)完成。

鉴于事故分析程序对确认核电站安全的重要性,程序分析结果的有效性和计算偏差被格外关注,核电发达国家数十年投入了大量的资源来开发并通过试验验证事故分析程序的有效性,许多国家的核安全监管当局还会对事故分析程序进行批准或认可。事实上,事故分析程序已成为核电知识产权的重点领域之一。

除了有效的事故分析程序和在分析结果中充分考虑偏差外,核电站在开展设计基准事故分析时还需要作出一系列保守的假设,以确保分析结果的保守性。主要的保守假设如下:

(1)应假设在发生事故时,核电站的状态和各项参数处在对后果最不利情况,同时测量仪表也要考虑对后果不利的偏差;

(2)应假设反应性价值最大的一束控制棒不能插入堆芯;

(3)仅考虑厂外交流电源或厂内交流电源(应急电源)中的一种能发挥作用;

(4)仅考虑安全系统或设备对事故的缓解作用,同时在安全系统或设备中还要假设发生了单一随机故障(单一故障准则)。

1.5 验收准则

验收准则是判断各类设计基准工况下核电站是否满足安全要求的依据,它通常由可接受的放射性后果来表示,如美国联邦法规规定,在轻水堆核电站最大可信事故下(反应堆冷却剂系统管道双端断裂),在放射性物质开始释放后的两小时内,厂址边界处个人的全身剂量不能超过 250 毫希沃特(不产生确定性效应的阈值),在整个放射性释放期内低人口区边界处个人的全身剂量不能超过 250 毫希沃特。

根据风险控制的原则,对于发生频率高的工况,验收准则允许的放射性后果应该很小,如通常要求正常运行工况下核电站向环境排放的放射性物质对公众的辐射照射剂量,与天然本底照射水平相比,相当或更低,约 1 毫希沃特。而对发生频率低到每堆年 10^{-4} ~ 10^{-6} 的极限事故(最大可信事故属于极限事故),则允许的放射性后果可以比较严重一些(通常设置为不允许产生辐射照射的确定性效应)。

为了简化工程分析,经常还会建立一些“次级准则”,如偏离泡核沸腾比(DNBR)等。通常次级准则不是必须满足的准则,如次级准则不满足,还可以通过放射性厂外后果分析确定是否满足验收准则。

1.6 美国联邦法规 10CFR50 部附录 A

1971 年,美国颁布了联邦法规 10CFR50 部的附录 A,对轻水反应堆共确立了 55 个“总设计准则”(general design criteria),这标志着确定论安全要求的形成和基本完备,后期虽然也有所发展和变化,但总的体系框架和基本概念至今没有改变。在 1979 年的美国三哩岛核电站事故之前,核电工作者和核安全工作者普遍自信,在如此保守的核安全要求和核安全评价方法下,核电站的保守设计使得反应堆堆芯发生熔毁的事故是“不可信”的。

1.7 关于确定论安全方法的评述

(1)确定论安全方法主要是由美国在对其反应堆和核电站实施安全监管的过程中逐步建立起来的,并为国际社会所广泛接受。后期的评估表明,确定论安全方法的保守要求保证了核电站很高的安全水平。

(2)按照确定论安全方法的主要建立者——美国核管理委员会(由于美国原子能委员会承担核能发展和核安全监管的双重角色,这使其经常处于在发展和安全两方面难以平衡的处境。在 20 世纪 60 年代中期建立应急堆芯冷却系统准则的过程中,美国原子能委员会对某些问题的处理不当,招致了广泛的社会批评。1974 年美国国会通过了“能源重组法”,将美国原子能委员会一分为二,包括美国能源部的前身美国能源研究和发展署及美国核管理委员会。美国核管理委员会的建立也确立了目前核安全监管中所广泛采用的一个实践,即核安全的独立监管)的说法,确定论安全方法是一个“打补丁”的工作(patch work)。从前面的描述也可以看到,由于当时的技术水平和方法论的限制,美国人在处理反应堆和核电站安全问题时,并没有采取从简单的公理和原理出发,通过严格的科学和逻辑推演来建立核安全体系的道

路,而是仅对一个个具体问题进行处理。这样导致确定论安全方法中存在很多逻辑不自洽之处,安全要求也不够平衡。所以将“Deterministic approach”翻译为“确定论安全方法”有些误导,更准确的翻译应该是“已确定的安全方法”。

(3)按照美国核管理委员会的另一个说法,确定论安全方法是“处方”(prescription)式的,许多确定论安全要求与特定堆型和特定系统设计密切相关,并且是当时的技术认识、经济性、可操作性等多种因素的一个妥协。换句话说,确定论安全方法不具备普适性。

(4)确定论安全方法企图通过简单的“保守假设”将复杂的核电厂事故工况简单化,换个角度说,这实际上也反映了确定论安全方法在处理复杂情况方面的无能为力。实际上,确定论安全方法无法处理多重故障所导致的核电厂事故,因为对于高度复杂的核电厂来说,如果考虑多重故障,则故障的组合方式可能是数量极其多的,需要分析的“事故序列”也会极其多。后期的概率风险评价表明(并且被美国三哩岛核电厂事故所证实),许多小的、单个并不对核电厂安全产生重大影响的常见故障同时发生时,其安全后果可能是很严重的。

(5)确定论安全方法也是可以控制核电厂风险的,但这种控制通常是粗略的、定性的。

(6)确定论安全方法存在不确定性,例如将应急堆芯冷却系统交给两个不同的设计单位设计,两家提供的方案都可以满足“单一故障准则”,但两家设计的系统流程、选用的设备可能会有很大差异,从而导致两家方案的可靠性可能会有很大不同。

(7)确定论安全方法的根本缺陷在于不能回答核安全,包括一切安全的根本问题,即“多安全是足够的?”(How safe is safe enough?)这个问题的解决势必需要新的安全方法,比如下述的“概率论安全方法”。

2 概率论安全方法

概率论安全方法,在美国通常被称为“概率风险评价”或“概率风险分析”,在国际原子能机

构被称为“概率安全评价”或“概率安全分析”,它是一套系统化、量化的核电厂安全评价方法。概率论安全方法也是主要由美国人建立的,今天在核安全监管中发挥着越来越重要的作用。

(1)从核能发展之初,美国人就清醒地认识到,核能,像世界上所有事物一样,不可能实现绝对安全。在美国准备发展核电时,美国原子能委员会就委托布鲁海文实验室开展了一个研究,以评估核电的风险以及美国能否承受这个风险。1957年,研究结果以 WASH-740《大型核电厂重大事故的理论可能性和后果》报告(又称“布鲁海文报告”)发表。按照 WASH-740 报告的估计,在美国一次大型核电厂的“最大可信事故”将导致 3400 人死亡、43000 人受伤、财产损失 70 亿美元(按当时币值),发生的可能性是每十万到一百万堆年一次。

WASH-740 报告采用了非常保守的假设,如没有安全壳的包容作用和最坏的气象条件等。由于当时相关资料、数据和分析工具的缺乏,很多假设和分析结果得不到有力支持。

WASH-740 报告考虑了事故后果和事故发生的可能性,是一份典型的“风险”分析报告,但当时完成合理的“风险”分析的方法论并不完全具备。此后,美国原子能委员会将方向转到对一个个具体核安全问题进行处理,而和一个个具体核安全问题相关的“处方”式核安全要求和方法的总和就构成了所谓“确定论安全要求”和“确定论安全方法”。

(2)20 世纪 60 年代到 70 年代,核电厂在安全方面有许多向航空航天业的借鉴,如提高系统可靠性的“冗余”设计手段(单一故障准则)。此阶段,可靠性理论和方法在航空航天业得到了很好的发展,为进行核电厂“风险”评价提供了方法论和工具。

(3)1972 年,美国参议员 John . Pastore 再次要求美国原子能委员会对反应堆安全给出完整评价,美国原子能委员会将研究任务委托给了美国麻省理工学院的拉斯穆森教授所领导的一个团队。1974 年,研究团队完成了相关的研究

工作,工作成果以 WASH-1400《反应堆安全研究》报告发表。

WASH-1400 报告选取了美国比较有代表性的压水堆和沸水堆核电站,使用事件树模型来模化核事故的进程,使用故障树来建立安全系统可靠性模型。虽然也可采用其他方法,但 WASH-1400 报告所采用的事件树和故障树方法目前已成为开展概率风险分析所采用的最多的方法。

图 1 是一个以反应堆冷却剂系统大破口事故为假设始发事件的典型的事件树。最上一行第一项表示假设始发事件,后续项是缓解大破口事故所需要的系统(缓解系统)。当我们知道大破口事故发生的频率,同时又知道每个缓解系统的失效概率(或可靠度)时,我们就可以算出树型结构每个分叉的频率。将我们需要的结果,例如所有堆芯严重损坏的分叉频率求和,我们就可以得到大破口事故导致的堆芯严重损坏的频率。对每个假设始发事件使用同样的方法,并将所有假设始发事件导致的堆芯严重损坏频率求和,就得到了该反应堆的堆芯严重损坏频率。从事件树中也可以看出,缓解一个假设始发事件需要众多缓解系统的依次投入和相互配合,这也表明了现代核电站的复杂性。事实上这还是一个示意型的简化事件树,事件树中没有显示保证缓解系统正常工作的支持性系统。

反应堆冷却剂系统大破口	安全箱投入	安全壳喷淋系统投入	低压安注系统投入(直接注入阶段)	低压安注系统转入再循环注入	事件序列后果(堆芯严重损坏, CD)	堆芯严重损坏频率
Y					CD	3.03×10 ⁻⁹
Y			Y			
Y		N				
N		Y				
N					CD	7.60×10 ⁻⁹
N					CD	3.34×10 ⁻⁸
N					CD	5.08×10 ⁻⁷

Y: 系统投入成功 N: 系统投入失败

图 1 反应堆冷却剂系统大破口事故事件树
Fig.1 Event tree of reactor coolant system large breach accident

缓解系统的失效概率(或可靠度)可以通过系统的故障树计算。图 2 是一个简单系统的故障树,系统由一台泵和三个阀门组成,系统失效的表征是从阀门 C 输出的流量不够。通过构成系统的各个设备与阀门 C 输出流量不够的逻辑关系,我们就可以建立起系统的故障树。如果有各个设备的失效概率(或可靠度),我们就可以计算系统的失效概率(或可靠度)。

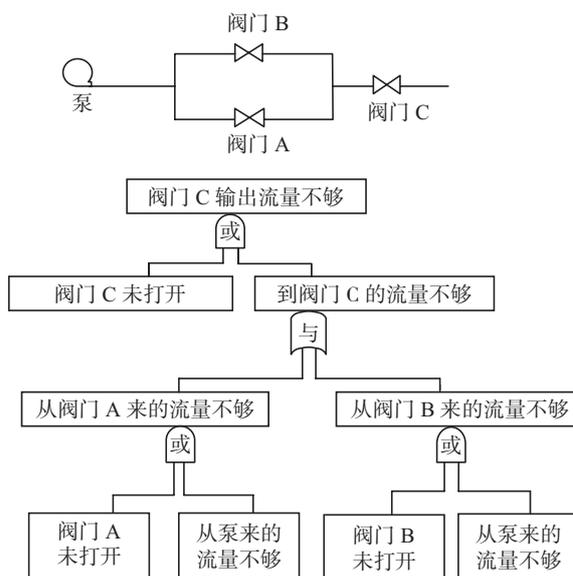


图 2 一个简单系统的故障树
Fig.2 A fault tree for a simple system

与确定论安全方法不同,对于概率论安全方法来说,内、外部事件均可以作为“假设始发事件”进行评价。WASH-1400 比较全面地评价了各种内、外部事件对核电站的安全影响以及对公众的风险,并与其他因素对公众造成的风险进行了比较,已成为核电站概率风险分析领域的经典性报告。表 1 给出了 WASH-1400 报告评估的美国社会公众致死风险。

表 1 美国社会公众死亡风险
Table 1 Risk of death of public in the United States

事故类型(死亡原因)	死亡人数	个人年死亡概率
机动车	55791	1/4000
意外跌落	17827	1/10000
火灾或烫死	7451	1/25000

续表

事故类型(死亡原因)	死亡人数	个人年死亡概率
溺水	6181	1/30000
火器	2309	1/100000
空中旅行	1778	1/100000
物体坠落	1271	1/160000
触电	1148	1/160000
闪电	160	1/2000000
龙卷风	91	1/2500000
飓风	93	1/2500000
所有事故	111992	1/1600
核反应堆事故	-	1/5000000000

表 1 中的其他原因死亡数据是美国 20 世纪 60 年代末和 70 年代初的统计数据。由于当时没有核反应堆造成的公众死亡,所以核反应堆造成公众死亡的概率是理论估算。WASH-1400 报告还给出了另外一组社会风险数据(见表 2)。

表 2 一次灾害导致多人死亡的风险

Table 2 The risk of multiple deaths in one disaster

事故类型	超过 100 人死亡的年概率	超过 1000 人死亡的年概率	
人为原因	飞机坠毁	1/2	1/2000
	火灾	1/7	1/200
	爆炸	1/16	1/120
	有毒气体	1/100	1/1000
自然原因	龙卷风	1/5	极小
	飓风	1/5	1/25
	地震	1/20	1/50
	陨石	1/100000	1/1000000
100 座核电厂	1/100000	1/1000000	

根据评价结果,WASH-1400 报告认为现代核电厂具有高度的安全水平,但 WASH-1400 报告受到了广泛的批评。批评的原因可以总体归结为两个方面,第一,当时的核能工作者和核安全工作者主要是在“确定论安全方法”的培养和

熏陶下成长起来的,对于概率论安全方法既不熟悉也不了解;第二,当时所掌握的知识有限,WASH-1400 报告在模型的适当性(对事故机理和事故进程的准确把握和模化)和输入数据(如事故发生的频率、设备可靠性数据、人因数据和共因失效数据等)的不确定性方面存在很多问题。

1974 年,美国核管理委员会成立后的首批行动之一就是宣布收回 WASH-1400 报告。

(4)1979 年,美国发生了三哩岛核电厂事故。在压水堆核电厂中,用于推动汽轮机转动的蒸汽是由一次侧(反应堆冷却剂系统)的反应堆冷却剂在蒸汽发生器中加热二次侧(主蒸汽和给水系统)的水产生的,而蒸汽在汽轮机中做功后,在冷凝器中被冷却成水,再由主给水系统送回蒸汽发生器。三哩岛核电厂的事故起因是在核电厂和火电厂中都比较常见的一个故障,即丧失主给水。核电厂的设计中对应对这种故障有着充分的考虑,专门设置了辅助给水系统,在丧失主给水时,反应堆立即自动降功率或停堆,同时自动触发辅助给水系统,向蒸汽发生器中注水,用于带出堆芯的余热。但此前三哩岛核电厂对辅助给水系统进行了检修,为了检修工作的需要而关闭了系统上设置的隔离阀,而检修完成后忘记将隔离阀打开,此时辅助给水泵虽然成功启动,但无法将水注入蒸汽发生器。堆芯衰变热的积累导致反应堆冷却剂系统的压力上升,稳压器上面的释放阀被顶开并卡在打开位置,反应堆冷却剂通过打开的释放阀不断流失,造成反应堆冷却剂系统的压力不断下降。

本来反应堆冷却剂系统丧失事故是在设计中给予了充分考虑的事故,设置了应急堆芯冷却系统向堆芯注水以带出衰变热。三哩岛核电厂的应急堆芯冷却系统也被自动触发,并成功地向堆芯注入了冷却水,但新的错误发生了。

三哩岛核电厂的设计中,在稳压器上设置了水位计用来监测反应堆冷却剂系统中的水位。由于三哩岛核电厂反应堆冷却剂系统稳压器释放阀的卡死,一次侧的压力下降,实际上反

应堆冷却剂已处于饱和状态,由汽水混合的两相流构成,但稳压器的水位计能够区分出水和蒸汽,却不能区分出水和两相流,而操纵员根据水位指示,误以为一次侧是满水的,因此手动停止了应急堆芯冷却系统(这违背了事故处理规程的要求),导致堆芯严重缺乏冷却剂,最终约三分之二的堆芯熔毁。

三哩岛核电厂事故对公众和环境所造成的实际后果是极其轻微的,厂外放射性监测装置没有测到明显的辐射变化,而理论估算表明公众受到的最大辐射照射不超过到医院照一次 X 光,但三哩岛核电厂事故的社会影响却远远超过了其实际影响。

在发生三哩岛核电厂事故之前不久,以 20 世纪 60 年代核安全研究中的“中国综合症”为背景,美国刚好放映了一部灾难电影,名字也叫“中国综合症”,三哩岛核电厂事故让公众将其与“中国综合症”联系起来。更为要命的是,此前核电界灌输给公众的是不可能发生堆芯熔毁事故,因而三哩岛核电厂事故极大地打击了公众的信心和对核电界的信任。

(5)三哩岛核电厂事故不可避免地引起了新一轮的核安全研究高潮。在三哩岛核电厂事故之前,高度关注反应堆冷却剂系统主管道双端断裂的事故(又称为大破口失水事故,被认为是轻水堆核电厂的“最大可信事故”)的研究,现在将重点转到了对反应堆冷却剂系统的一些小管道断裂事故(又称为小破口失水事故,大破口失水事故和小破口失水事故都属于反应堆冷却剂丧失事故)和核电厂瞬态事件的研究。其他研究包括改进人机接口和操纵员培训、改进核电厂规程(包括维修、试验、检查和运行、事故处理规程等)、改进应急响应等。当然,研究的重点之一放在包括反应堆堆芯熔毁事故(又被称为“严重事故”)的超设计基准事故机理、进程及预防和缓解措施等方面。

当人们研究三哩岛核电厂的事故序列(事故进程)时,惊讶地发现该事故序列已经在 WASH-1400 报告中被预见到,这重新引起了人们对概率风险分析技术的重视。另外,要改进

核电厂对严重事故的预防和缓解能力,就要找到可能导致核电厂严重事故的事故序列,并对其中重要的、风险贡献较大的(严重事故主导序列)采取预防和缓解措施,而概率风险分析是确定严重事故主导序列不可或缺的技术。

三哩岛核电厂事故带来的另一个攸关的问题是对核安全的重新诠释,这个诠释必须解决两个问题。对核电的运营者和开发商而言,必须确定一个安全的可接受阈值,作为核电厂设计和运行所应达到的安全尺度;对公众而言,必须能够以公众可以理解的方式明确告知公众核电厂的安全水平究竟是怎样的,使公众能够对核电厂的安全和可接受性给予判断。美国核管理委员会解决这个问题的方式是制定“安全目标”(下节给予详细阐述)。

上述需求促进了概率风险分析技术在美国的蓬勃发展,并且对今天的核安全监管理念和监管方式产生了重大影响。

(6)1979 年三哩岛核电厂事故后,美国核管理委员会启动了“安全目标”的制定工作。^[4]

想要理解美国的“安全目标”,必须对安全问题的本质有基本的认识。

《现代汉语词典》对安全的解释是“没有危险”,《牛津大词典》对安全的解释是“没有危险”或者“对危险的防护”,而《劳动安全大词典》对安全的解释是“可接受的风险”,不同的解释反映了对安全问题认识的差异。

我们考察安全问题,有几个基本的特征:

①安全是人类必须永远要面对的问题,没有一件事情是绝对安全的。

②从第一条可以推出,安全一定是一个相对的概念,绝对安全是不存在的。安全的相对性还体现在另一个方面,即你把一件事情孤立出来谈论其是否安全是无意义的,一件事情是否安全一定是与其他事物相互比较的结果。换句话说,当你讨论一件事情是否安全时,一定要找到一个坐标,我们可以将其称为“风险参照系”。

③安全是一个变化的概念。一段时间人们认为某件事情是安全的,但随着时间和环境的

变化,人们的认识也可能改变。

既然安全是不同事件相互比较的结果,为了能够进行这种比较,就必须为安全找到一个度量。

要找到合理的安全度量,又必须理解两个概念,即“灾害”和“风险”。灾害是一件事情已经产生的不利后果。当一件事情的不利后果还没有产生时,我们只能考察这件事情可能发生哪些灾害,这些灾害的后果有多大,以及发生这些灾害的可能性有多大。同时考察不利后果和发生的可能性,我们称为“风险”,或者说风险是不利后果和可能性的乘积(这里的乘积是集合而不是简单数学运算的概念)。

当我们用灾害来衡量安全水平时,会产生一个问题。科学界主流认为,6500 万年前一颗小行星的撞击导致了地球上大多数生物的灭绝,最著名的是恐龙的灭绝,我们今天也不能排除另一颗小行星的撞击结束人类对地球的统一,那么人类的生活还有什么意义呢?

在现实生活中,很少有人关心小行星的撞击问题,因为我们知道其可能性是微乎其微的,实际上对这个问题我们是自觉或不自觉地问用风险的概念去思考的。科学界主流观点认为“风险”是对安全的比较合理的度量。

在美国,社会方方面面面对安全问题的认识始终是比较一致的。美国在核能发展过程中,产生过无数次涉及核安全监管当局、核电运营商和核电供货商、社会组织,以及公众的法律诉讼案件。在这些诉讼案件中,法庭的判决结果是一贯的,如强调原子能法中规定的对公众和环境的健康和安全的“恰当防护”(adequate protection)不是“绝对防护”(absolute protection),如要求核安全监管当局不能用“零风险”(zero risk)的方式来处理核安全问题等。所以美国原子能委员会和美国核管理委员会也经常地将“恰当防护”解释为“没有不适当的风险”(no undue risk),这个概念与《劳动安全大词典》对安全的解释是一致的。美国核管理委员会曾经说过,美国原子能委员会和美国核管理委员会多年在核安全领域所做的工作,用一句

话来概括,就是不断地确定和诠释什么是“没有不适当的风险”。前面提到,解决核安全,乃至一切安全的根本问题是“多安全是足够?”的问题,“没有不适当的风险”实际上可视为是对“多安全是足够的?”的回答。^[5]

美国核管理委员会安全目标的制定正是在这个背景下进行的。在安全目标的制定过程中,美国核管理委员会研究和讨论的问题是深入和广泛的,并就这些问题征求了社会组织和公众的意见。例如:

①设立单一目标还是复合目标?能否实现不同层级目标的有效结合?

②设立定量目标还是定性目标?定量目标如何验证?定性目标如何表达清晰和确定的含义?

③目标是结果导向还是过程导向?

④绝对目标还是相对目标?

⑤目标是个人导向还是社会导向?

⑥目标是厂址相关还是非厂址相关?

⑦目标是否与时间相关?

⑧定量目标是考虑个人死亡风险,还是事故发生频率和后果,或者在总的风险框架中考虑核电及其替代能源的风险?

⑨如何处理不确定性?

⑩如何考虑价值的平衡?如个人风险中考虑工作人员、周围居民还是总人口?社会风险中是否考虑风险和利益的平衡,向后代的风险传递,立即死亡和延迟死亡,以及财产损失?是否在安全决策中考虑经济影响?多大的资源应该用于满足特定安全目标?等等。

经过广泛讨论和争论,1986年,美国核管理委员会正式发布了政策声明 51FR30028:“Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants;Policy Statement”。在这个文件中,美国核管会确定了定性安全目标、定量安全目标和通用性能指导值。

两个定性安全目标是:

- 应该为公众的个体成员提供保护,以至其不因为核电厂的运行而对生命和健康承担明显的附加风险;

- 与可行的竞争发电技术相比,核电厂运行对生命和健康的社会风险应该比较少或更少,并且没有明显的社会附加风险。

作为对“没有明显的附加风险”的解释,确定了两个定量安全目标:

- 对紧邻核电厂的正常个体成员来说,由于反应堆事故所导致立即死亡的风险不应该超过美国社会成员所面对的其他事故所导致的立即死亡风险总和的千分之一;

- 对核电厂邻近区域的人口来说,由于核电厂运行所导致的癌症死亡风险不应该超过其他原因所导致癌症死亡风险总和的千分之一。

这两个定量安全目标通常被称为“两个千分之一”目标。“两个千分之一”目标针对的是辐射照射对人类的两种效应,即确定性效应和随机性效应。确定性效应是指在受到超过一定剂量的辐射照射后,可观测到的生理异常,如体毛脱落、皮肤溃烂、造血机能的损害,以至短时间内的死亡;随机性效应是指在受到比较低剂量的辐射照射后,作为个体成员可能不能观察到任何生理异常,但对于众多受到辐射照射的人群而言,患癌症的比例可能会有所上升。

由于评价一个具体核电厂是否满足“两个千分之一”目标是一个非常复杂的工作,每个核电厂都去进行也没必要,为了实际上和监管意义上的可用性,文件还推荐了通用性能指导值作为美国核管会成员检验安全目标是否得到满足的指导。经过评估,立即死亡风险是控制因素,而这仅需考虑可能导致立即死亡的大规模放射性物质释放,所以通用指导值针对大规模放射性物质释放给出:

- 与传统的纵深防御概念和事故缓解理念一致,要求安全壳系统具有可靠的性能,向环境释放的大规模放射性物质的总平均频率应该小于 10^{-6} /堆年。

美国核管理委员会发布有关安全目标的政策声明,在国际上产生了很大影响。但与美国不同,许多其他国家和国际组织没有从风险角度确定自己的定量安全目标,而仅仅采用了美国大规模放射性物质释放的频率值,并且把这

个频率值称为概率安全目标。由于大量评估表明在堆芯熔化条件下安全壳的条件失效概率大约在 10^{-1} ,所以又演化出另外一个目标,即反应堆堆芯熔化的频率小于 10^{-5} /堆年。

无论评价是否满足“两个千分之一”目标,还是评价大规模放射性物质释放的频率,都离不开概率风险分析技术。

美国的安全目标开启了核电厂量化风险管理先河,也在国际上产生了巨大的影响,但是对美国安全目标的争论一直没有停止,后面我们还要讨论。

(7) 概率风险分析技术在美国的蓬勃发展和进步不断增强了美国核管理委员会应用概率风险分析技术的信心。1995年,美国核管理委员会颁布了 60FR42622:“Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities; Final Policy Statement”,鼓励在核安全监管中更多地使用概率风险分析技术;1998年,美国核管理委员会发布了管理导则 RG1.174~1.178,为核电厂定量风险管理应用中的风险准则、在役试验、质量保证、运行技术规范、管道在役检查等提供指导;从20世纪90年代末开始,美国核管理委员会开始着手对联邦法规进行“风险指引和基于性能”(risk-informed and performance-based)的改进;2004年,新的联邦法规 10CFR50.69:“Risk-informed categorization and treatment of structures, systems and components for nuclear power reactors”颁布,同年还发布了管理导则 RG1.200:“An Approach for Determining the Technical Adequacy of Probabilistic Risk Assessment Results for Risk-Informed Activities”;2006年,美国核管理委员会发布了管理导则 RG1.201:“Guidelines for Categorizing Structures, Systems, and Components in Nuclear Power Plants According to Their Safety Significance”;2009年,美国核管理委员会发布了管理导则 RG1.205:“Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection for Existing Light-Water Nuclear Power Plants”。目前美国核管理委员会已完成了与大破口失水事故有关的风险指引法

规 10CFR50.46：“Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors”以及风险指引的单一故障准则法规等草案。可以说美国在定量风险监管方面已取得了巨大的进展，而世界上其他国家，包括欧洲各国和我国，由于技术基础和思想认识等方面的影响，已大大落后于美国。

(8)关于概率论安全方法的评述。

①区别于确定论安全方法的“处方”式方式，概率论安全方法是一个系统的安全评价方法，并且在极大地改变着人们对核电厂安全问题的认识深度和认知方式。由于核电厂的巨大复杂性，确定论安全方法在局部改变时，无法确定对整个核电厂安全水平的影响，甚至无法确定局部的改进对整个核电厂的安全水平是正面的还是负面的影响。举个例子，美国核管理委员会在 10CFR50.46 的修订草案中，将大破口失水事故从设计基准事故中排除出去，将其列为超设计基准事故。从确定论安全方法的角度认识，运行经验和近些年的大量研究表明，反应堆冷却剂系统主管道双端断裂事故发生的概率极低，将大破口失水事故列为“设计基准事故”过度保守，因而可以放松要求；从概率论安全方法的角度认识，由于大破口失水事故要求安全系统，例如应急堆芯冷却系统和应急柴油发电机快速启动（在大多数核电厂应急柴油发电机要求的启动时间在 10 秒左右），所以大大降低了这些系统的启动可靠性，从而增加了小破口失水事故的风险（对付这两个事故的应急堆芯冷却系统共用应急柴油发电机），但小破口失水事故对核电厂的风险贡献可能远大于大破口失水事故。将大破口失水事故从设计基准事故中排除后，可大大提高应急堆芯冷却系统和应急柴油发电机的启动可靠性，而降低小破口失水事故的风险，可提高整个核电厂的安全水平。再如，核电厂不同安全系统对安全的贡献，或者说安全重要度肯定是不同的，但确定论简单地统一要求满足“单一故障准则”。目前核电厂的运行经验和研究表明，对某些系统，例如保护系统和应急交流电源，满足单一故障准则的情况下仍

然不能提供足够的可靠性水平，而低压安注系统不一定非要满足单一故障准则。

②由于概率论安全方法是一个系统的方法，可以把核电厂作为一个整体来考察，因而概率论安全方法有助于核电厂设计的平衡，将有限资源用在能保证安全和改进安全最有利的地方，从而促进核电厂安全水平和经济性的共同提高。

③概率论安全方法可以处理确定论安全方法无法处理的一些复杂安全问题，例如多重故障所导致的安全问题，所以它对核电厂安全问题的考察更全面。

④1979 年美国三哩岛核电厂事故后，美国核管理委员会要求核电厂开展了“电厂安全检查”（Individual Plant Examination, IPE）和“针对外部事件的电厂安全检查”（Individual Plant Examination for External Events, IPEEE），以评估核电厂的安全水平并查找薄弱环节。美国核管理委员会没有限定评估所使用的方法，但几乎所有核电厂都选用了概率论安全方法。这说明，要能够清晰地表达核电厂的安全水平，回答“多安全是足够的？”或“没有不适当的风险”问题，除了概率论安全方法，很难找到更好的方法。

⑤必须承认，概率论安全方法也存在一些问题，例如不能处理美国“9·11”之后所关注的大型商用飞机对核电厂的恶意撞击问题，因为无法确定发生这样撞击的可能性大小。当然，人们对概率论安全方法关注最多的还是“不确定性”问题。

概率论安全方法存在不确定性，这是方法论所决定的。实际上不确定性来自三个方面，即模型的完整性（是否能够将全部事件序列模化）、模型的适当性（是否能够正确地描述事故进程中的物理、化学、材料、热工水力学等现象）以及输入数据（包括假设始发事件频率、设备可靠性数据、共因故障模型和人因模型）。但是也不能孤立地讨论概率论安全方法的不确定性，而必须结合确定论安全方法来看待。前面提到，确定论安全方法也有不确定性，表 3 给出了概率论安全方法和确定论安全方法不确定性因素

的比较。

表 3 确定论安全方法和概率论安全方法不确定因素的比较

Table 3 Comparison of uncertainties in deterministic and probabilistic safety methods

	模型完整性	模型适当性	输入数据
概率 风险 分析	可考察包括多重故障在内的众多可能的事故序列	对事故物理、热工水力、化学和材料学等的认识程度	①假设始发事件频率:中等频率可用经验数据,极端事件的先验数据 ②设备可靠性数据:经验数据 ③共因故障:共因故障模型 ④人因:人可靠性模型
确定 论分 析	始发事件+丧失厂外电+最大价值控制棒卡棒+安全系统的单一故障	与PRA技术同样的认知	①假设始发事件:依据早期认识的粗略工况分类 ②设备可靠性:单一故障准则 ③共因故障:独立性,仅能处理外在机理共因故障 ④人因:简单的30分钟不干预原则

从表3中可以看出,总而言之,概率论安全方法在模型完整性、输入数据方面比确定论安全方法处理得更精细,在模型适当性方面是基于与确定论安全方法同样的知识基础,但概率论安全方法存在的不确定性是无法否认的,所以在应用时也必须抱着正确的态度和方式,在决策过程中要高度关注不确定性问题。美国核管理委员会将相关提法从20世纪90年代的“基于风险”(risk-based)修改为今天的“风险指引”(risk-informed),正是反映了这种认识。

⑥使用风险概念在公众中也遇到一些问题,如“风险厌恶症”。科学家们以自身的思考方式对安全水平选择了“风险”表达,但与科学

家理性、逻辑的思维方式不同,相当多的公众在思考问题时使用的是“直觉”和“经验”,而日常生活中总与“大概率”事件打交道的经验导致了許多公众对风险概念的不理解甚至抵触,从而形成风险厌恶。

⑦在安全目标方面,美国1986年发布的51FR30028:“Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants;Policy Statement”提供了一个很好的范例,但对其的争论一直没有停止。在51FR30028发布之初,美国核管理委员会的核安全咨询委员会(advisory committee on reactor safeguards,ACRS)就提出批评,认为该安全目标的执行结果将导致“对于周围有大量人口的核电站,允许大的社会风险……,这导致不鼓励远距离厂址”。

我们还可以看到其他方面的问题,例如我们将风险定义为不利后果和可能性的乘积,但核电事故的不利后果可能是多种形式的。美国的安全目标考虑的是反应堆事故所导致的立即死亡和核电厂运行所导致的癌症死亡,但其他形式的后果还有许多。威斯康星大学和爱达荷国家实验室的Vicki Bier等在其论文中指出,事故的影响包括清洁、去污和再安置的费用,传统家园和社群的丧失,种植和生产土地的丧失,无法销售污染的食物,清洁水源的丧失,以及需要替代电源等。所以Vicki Bier等批评,美国的安全目标没有包括真正的社会风险,而实质上还是个人风险。这个问题在日本福岛第一核电厂事故后表现得更突出。福岛第一核电厂事故没有导致任何公众受到过量的辐射照射,但公众和社会仍不能接受它的后果。所以在福岛第一核电厂事故后,美国核管理委员会成立的特殊工作组(Near Term Task Force,NTTF)在其报告“Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century”中总结:“即使对公众提供了充分的保护,向环境的大规模放射性释放也是内在不可接受的。”

实际上这些问题在美国制定安全目标时都有涉及和讨论,但美国核管理委员会的困难存在于两个方面:第一是美国的立法原则,美国的

立法原则要求所设立的法律对于大多数拥有正常智慧的人都能够清晰地判断如何满足,所以美国核管理委员会强调安全目标必须是“在实际上和监管意义上都是可用的”,即它必须是实际可操作的;第二是技术方面的困难,除了死亡和癌症外,其他方面很难找到一个合适的风险参照系,从而无法给出一个合理的可度量风险指标,即无法满足“在实际上和监管意义上都是可用的”的目标。

迫于这种无奈,美国核管理委员会在制定安全目标时甚至采取了一种近乎“耍赖”的方式,例如当有人质疑为什么不考虑放射性污染的长期影响时,美国核管理委员会回答,有长期影响的不仅仅限于放射性污染,其他一些污染物,如重金属和某些化学物质也有长期性影响,仅仅要求考虑放射性污染的长期影响不公平。

但无论如何,不对这些问题给出合理回答,对于公众和社会而言,仍不能解决“多安全是足够的”问题。

3 后期核安全理念的发展

3.1 后期美国核安全理念的发展

(1)1971年美国联邦法规 10CFR50 附录 A 的发布意味着确定论安全要求的基本完备,美国所建立的确定论安全要求被国际社会所广泛借鉴,至今仍是大多数国家为颁发核电厂许可证所进行的“安全审评”的主要依据。

但是随着核电的发展,特别是美国三哩岛核电厂事故、苏联切尔诺贝利核电厂事故、日本福岛第一核电厂事故的陆续发生,核安全理念及与其相联系的核安全要求也在发生变化。

由于经济竞争力的原因,1974年美国的核电订货量开始下降,1978年以后就没有任何新的核电订货,而三哩岛核电厂事故后,许多原有的订货也被取消。美国核电面临着提高经济性和提高安全水平的双重压力,而以往的历史表明提高安全水平总是要付出经济代价。

核安全监管当局也不得不应对这种局面,作为对这两个方面的回应。三哩岛核电厂事故后,美国核管理委员会开展了庞大的三哩

岛行动计划,并根据行动计划所获得的成果,制定了 10CFR50.34(f):“补充的三哩岛相关要求”;1985年,美国核管理委员会发布了政策声明 50FE32138:“Severe Reactor Accidents Regarding Future Designs and Existing Plants”,对运行核电厂和未来核电厂在应对严重事故方面提出了要求,以进一步提高核电厂的安全水平;1986年,美国核管理委员会发布了政策声明 51FR24643:“Policy Statement on the Regulation of Advanced Reactors”,鼓励核电供货商开发在安全性和经济性上都有提高的“先进核电厂”。美国核管理委员会为先进核电厂确定了9个目标:

①高可靠性和较少复杂性的停堆和余热排出系统。鼓励使用固有的和非能动的方式(负温度系数、自然循环)达到这个目标。

②较长的时间系数和充足的仪表,允许在安全系统和/或重要设备暴露在恶劣工况前进行更多的诊断和处置。

③尽可能简化系统,以减少所要求的操纵员动作、面对恶劣环境条件的设备和维持安全停堆工况所需的部件。简单化的系统应该有利于操纵员的理解、有利于可靠的系统功能,以及有利于更直接的工程分析。

④设计上通过提供安全系统充分的固有安全性、可靠性、冗余性、多样性和独立性,使严重事故的可能性和后果最小。

⑤设计上提供可靠的 BOP(balance of plant,指的是主蒸汽系统、冷凝器、主给水系统、发电机等)设备(或使安全系统独立于 BOP),以减少对安全系统的挑战。

⑥设计上提供容易维护的设备和部件。

⑦设计上减少电厂人员可能的辐射照射。

⑧设计上通过维持多道放射性屏障,以及降低严重事故的可能性和后果体现纵深防御原则。

⑨通过现存的技术或者可以满意建立的适当技术发展大纲能够证明设计特性。

在该政策声明中,提出了一些改进核电厂安全的新理念,如以往的核电厂设计过于复杂,

增加了工程分析和安全分析的困难,因而政策声明提出简单化的系统;原有的确定论安全要求主要关注承担三项基本安全功能的构筑物、系统和设备,核电厂的安全设计和核安全监管当局的监管也主要针对这些构筑物、系统和设备,但是概率风险分析表明,非安全系统和设备,例如汽轮机、发电机的故障导致的电厂瞬态也可能对核电厂的风险有显著贡献,所以政策声明中提出提供可靠的 BOP 设备,以减少对安全系统的挑战;最重要的是,对于美国核管理委员会而言,沿着传统的核电设计思路走下去,只能通过增加安全系统和设备的方式来改进安全水平,这又增加了核电的成本,所以美国核管理委员会希望探索新的模式,通过非能动技术的应用来改进核电厂的安全水平。

(2)如前所述,20 世纪 90 年代中期开始,美国核管理委员会大力推动风险指引和基于性能的核安全监管。20 世纪 90 年代,核能界开始探索所谓“第四代先进核能”系统以及小型模块式核电厂概念。第四代先进核能系统的开发目标是:在“先进核电厂”或“第三代核电厂”的基础上增加防止核扩散、可持续发展等内容,目前初步筛选了超高温气冷反应堆、超临界水堆、熔盐反应堆、气冷快中子反应堆、钠冷快中子反应堆和铅冷快中子反应堆等六种堆型。由于确定论安全要求是与具体堆型、具体系统密切相关的,目前主要是针对传统的压水堆核电厂和沸水堆核电厂,而此前所完成的风险指引和基于性能的法规修订工作也主要针对这些传统的确定论安全要求,所以针对第四代先进核能系统和小型模块式核电厂的安全要求非常不完备。为此,从 21 世纪初开始,美国核管理委员会在风险管理的框架内,启动了“技术中立执照框架”(technology-neutral licensing framework)。所谓技术中立,就是适应于不同堆型的一种普适性要求,而这种要求只能建立在共同的风险准则上。

(3)2001 年,美国发生了针对世贸大楼进行恐怖攻击的“9·11”事件,由于后期调查表明恐怖分子最初选择的攻击目标包括核电厂,所

以核电厂防止类似恐怖袭击的问题受到普遍关注。

在原有法规的要求中,并不是不考虑飞机撞击问题,但考虑的飞机撞击是由于飞机故障所导致的随机撞击。考虑的方式首先是距离筛选,如核电厂离航线大于一定距离,则不需考虑飞机撞击;当不能采用距离筛选时,则评价飞机坠毁在核电厂安全重要构筑物上的概率,当概率小于 10^{-7} 时,则不必考虑飞机撞击;当距离筛选和概率筛选都不能排除飞机撞击时,则核电厂的设计必须考虑对飞机撞击的防护,如美国三哩岛核电厂就考虑了对波音 727 飞机的撞击防护。但这种对飞机故障导致随机撞击的考虑方式并不适用于恐怖袭击。

2009 年,美国核管理委员会颁布了联邦法规 10CFR50.150 :“Aircraft impact assessment”,规定新的核电厂必须对商用大型飞机的撞击作出评价,以表明在这种撞击下堆芯能够维持冷却或安全壳完整,以及乏燃料池完整或乏燃料能够维持冷却。将商用大型飞机的撞击作为超设计基准事件进行评价(即可以采用现实模型和假设)。

在美国联邦法规 10CFR50.150 的立法过程中,发生了非常激烈的争论,赞成立法的一方固然理由很充分,反对的一方也做出了有力的抗辩,例如首先争论防止恐怖主义袭击的责任问题,反对方指责政府把责任全推给核电厂,犹如政府要求公民在纽约街头遇到拥有重型武器的歹徒时,能够自我保护一样,是完全放弃了政府的责任;又如指责 10CFR50.150 只针对新核电厂,但美国正面临恐怖主义高峰,受到最大威胁的是正在运行的 100 多座核电机组,而不是不知什么时间才能建成的新核电厂;也有人提出为什么不考虑小型飞机的撞击,当美国核管理委员会答辩小型飞机的质量和速度都比较小时,提问方马上指出进入大型商用飞机需要经过严格的安检程序,而小型飞机不需要,小型飞机还可以携带炸药;最机智的辩论是提出核电厂不但应该考虑大型商用飞机的撞击,还应考虑其他近地飞行物,如流星和人造卫星的撞击

等,针对美国核管理委员会认为其发生概率极低的答辩,提问方马上要求核管理委员会出具大型商用飞机恐怖袭击的概率。

(4)日本福岛第一核电站事故后,美国核管理委员会做出了迅速的响应,一方面向公众表示,福岛事故的情景不能简单照搬到美国核电站,对美国核电站的安全有充分信心;另一方面成立了特殊工作组,研究福岛第一核电站事故的经验教训,并完成了报告:“Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century”,提出了美国核电站的安全改进建议。

根据报告的建议,美国核管理委员会以政府令(order)的方式提出了三项安全改进要求,即全面检查 B5b 计划的有效性,改进乏燃料水池的液位和温度监测,为压水堆的冰冷凝器型安全壳和沸水堆的 MARK I 型和 MARK II 型安全壳提供加强的卸压装置。B5b 计划是美国在“9·11”事件后在运行核电站实施的一项计划,实际上就是增设移动电源和移动泵等,以在核电站发生大面积损坏(extensive damage)时为堆芯和乏燃料水池提供冷却,又称缓解策略(mitigation strategy)。加强的安全壳卸压装置是在原有严重事故管理策略考虑的安全壳卸压装置的基础上对其进一步强化,使其管道、阀门等能够承受预计的严重事故条件。与我国核电站的福岛改进项比较,可以说美国核管理委员会所要求的改进少得多,但即使如此,核管理委员会的改进要求仍然引起了很大的争议,认为其所要求改进的技术基础不充分。道理很简单,既然福岛第一核电站事故的情景不能简单照搬到其他核电站,其他核电站应该考虑什么样的情景呢?如果情景都不能确定,又如何判断改进措施的必要性和有效性呢?

针对 10CFR50.150 和福岛改进项的辩论充分表明了目前核安全所面临的困境,即由于目前核安全问题多集中在一些极端事件的处理上,此时技术手段往往匮乏和无力,而争论往往又会被引导到道德伦理甚至哲学领域,在这些领域又最难达成共识。

(5)日本福岛第一核电站事故后,美国核管理

委员会的特殊工作组在其报告“Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century”中还提出了一些其他建议,如特殊工作组发现,虽然美国核能界频繁地提到“纵深防御概念”,但迄今为止美国从没有给出纵深防御概念的官方定义,也没有准则表明如何满足纵深防御;特殊工作组还建议,建立一个“扩展的设计基准”(extended design basis)的概念,将以往法规中分散的对某些超设计基准事故的要求和一些重要的“严重事故主导序列”纳入其中。^[6]

2016年3月,美国核管理委员会正式批准了其工作人员在 SECY-15-0168:“RECOMMENDATIONS ON ISSUES RELATED TO IMPLEMENTATION OF A RISK MANAGEMENT REGULATORY FRAMEWORK”中的建议,维持风险管理的核安全框架,不发展“扩展的设计基准”[SECY-15-0168 中将其修改为“设计扩展工况”(design extension condition),与国际原子能机构的名称一致],并且不再发展官方的纵深防御定义以及确定如何满足纵深防御的准则。从前面的讨论可以看出,美国核管理委员会的这个决定是非常合乎逻辑的。

3.2 后期欧洲核安全理念的发展

(1)世界上第一座商用核电站是英国的卡德尔·霍恩核电站,于 1956 年建成。这个核电站是一座石墨气冷堆核电站,既用于军用核材料生产,又用于商业发电。由于气冷堆核电站的建设,20 世纪 50 年代英国成为世界上最大的核电国家。从 20 世纪 60 年代末到 70 年代初,英国发现了北海油田,从而丧失了对大规模发展核电的兴趣,其核安全理念也产生了很大的世界影响。

从 20 世纪 60 年代末到 70 年代初,法国、德国等国家决定大规模发展核电,由于当时轻水堆核电站已显示出了在安全性和经济性方面的优势,法国、德国都决定从美国引进轻水堆核电技术,在这个过程中也接受了美国的核安全理念。

法国先后引进了美国 90 万千瓦电功率压水堆核电技术和 130 万千瓦电功率压水堆核电

技术,随后在 20 世纪 90 年代自己开发了 140 万千瓦电功率压水堆技术(N4 核电厂)。在这个过程中,法国的核安全理念没有产生大的变化。

德国在引进美国的压水堆和沸水堆核电技术后,很快开始了自主开发,在开发过程中核安全理念有所变化,如增加了安全系统的冗余度,采用了双层安全壳,大破口失水事故不考虑一回路主管道的双端完全错开的断裂,仅考虑 10% 主管道截面积的断裂等。同时,德国也属于最早发展“破前漏”技术(Leakage before Break, LBB,它是指在一些管道设计中,由于材料和管道应力的特点,不可能出现管道的突然快速断裂,而首先产生小的裂纹并导致泄漏;只要能够及时探测到这些泄漏,并采取管道降温减压等措施,就可以避免管道的双端断裂)的国家之一。

(2)20 世纪 90 年代初,法国和德国决定联合开发新一代核电厂,这个核电厂被命名为“欧洲压水堆”(European pressurized water reactor, EPR。我国台山核电厂引进了该技术)。为了指导 EPR 的开发,法国和德国的核安全当局合作提出了“Technical guidelines for the design and construction of the next generation of nuclear power plants with pressurized water reactors”。实际上,EPR 的概念受德国设计,特别是德国 20 世纪 70 年代开发的 KONVOI 核电厂设计影响很大,如采用了双层安全壳(法国在 N4 核电厂上也采用了双层安全壳,但在内层安全壳设计上没有采用钢内衬)、四个安全系列等,最重要的是,在 EPR 的开发中首次提出了“导致大量早期释放的事故工况必须‘实际上被消除’”的概念。

实质上 EPR 的“导致大量早期释放的事故工况必须‘实际上被消除’”概念还是一个“确定论”的外延,即针对几种压水堆核电厂典型的“严重事故主导序列”提出“确定的”设计要求,如针对安全壳设计压力,要求考虑大破口失水事故的质量能量输入,同时考虑堆芯 100% 的锆发生锆-水反应所产生氢气的燃烧的能量输入;针对核电厂的高压熔堆工况[高压熔堆是指堆

芯熔毁时,反应堆冷却剂还处在较高压力,此时一旦反应堆压力容器破裂,冷却剂系统的高压会将熔融的堆芯“吹散”到安全壳内,形成细小的熔融物颗粒,大大增强向安全壳内大气的传热和颗粒与安全壳内大气的放热化学反应,从而引起安全壳内快速升压,导致安全壳的完整性受到破坏。熔融物如果直接与安全壳壁面接触,“直接攻击”(direct attack)也可能导致安全壳完整性的破坏],提出设置一个“与防一回路超压同等可靠的卸压装置”;针对安全壳底板熔穿,提出设置一个“堆芯捕集器”等。

在该技术指南中,还提出“总的目标是加强纵深防御”。这个思想在日本福岛第一核电厂事故后被西欧核监管者协会(West European Nuclear Regulators Association, WENRA)所接受,在其 2013 年发表的报告“Report: Safety of new NPP designs”中提出,在新核电厂:“应该在全局相关的原则方面加强纵深防御概念,包括纵深防御概念每个层次的加强和层次之间独立性的改进。”

在 EPR 核电厂出口到芬兰后,芬兰提出了“设计扩展工况”的概念。后期“实际消除大规模放射性释放”和“设计扩展工况”的概念被国际原子能机构所接受,并在最新的安全标准中确定。但国际原子能机构的这两个概念与法国、德国和芬兰的概念又有所区别,将在后面讨论。

设计扩展工况的出发点是在设计基准工况外再考虑一些事故情景,特别是多重故障所导致的事故情景,以进一步提高核电厂的安全水平,但将设计扩展工况作为设计基准工况的外延是有问题的,因为设计基准工况的分类是按照始发事件的频率划分的,而设计扩展工况的选择在很大程度上考虑的是事故序列的频率和后果,两者的划分方式存在很大不同。如前所述,虽然福岛核电厂事故后美国核管理委员会的特殊工作组也提出了类似建议,但美国核管理委员会没有接受,而仍然采用“超设计基准事故”的表述,应该也是类似的考虑。

欧洲的情况与我国有些类似,即从美国引

进了核安全理念,但本身并没有深入地参与这些安全理念的建立过程,因而对这些安全理念建立的技术背景以及可能存在的问题并不完全了解。在这种背景下,核安全理念的“发展”往往是一种“外延”式的,而难于做到“变革”式的,而这种外延式的发展经常会使本来就不平衡的确定论安全要求变得更加不平衡。

3.3 后期国际原子能机构核安全理念的发展

在 20 世纪 90 年代之前,国际原子能机构的标准主要参照美国的法规和标准制定,但鉴于美国长期对国际原子能机构的“核安全”(nuclear safety,主要指针对核设施的一套技术安全措施)领域工作不重视,而主要将重点放在“核安保”(nuclear security,主要指防止对核设施和核材料的攻击、破坏、盗窃和转移)和“核保障”(nuclear safeguard,主要指防止核扩散的一套制度安排)领域,导致 20 世纪 90 年代以后欧洲对国际原子能机构的标准制定产生越来越大的影响,如国际原子能机构的标准委员会主席就长期由法国人担任,此后国际原子能机构安全标准的“欧洲痕迹”越来越明显。

在 2000 年版的国际原子能机构标准 NS-R-1:“Safety of Nuclear Power Plants:Design”中,国际原子能机构提出“一个基本目标是,尽管监管当局仍然可以要求,厂外干预措施从技术上是有限的甚至是可以消除的”,这明显是接受了法、德核安全当局为 EPR 提出的目标:“事故产生的最大可能(假想)释放只需要无论在地域上,还是在时间上都是有限的保护措施。”

在 2000 年版的国际原子能机构标准 NS-R-2:“Safety of Nuclear Power Plants:Operation”中,国际原子能机构还提出了定期安全审查的要求,这也是法国的实践。

实际上,“实际地消除大规模放射性释放”和“厂外干预措施是有限的”是两个相互联系的概念,“厂外干预措施是有限的”既是“实际地消除大规模放射性释放”的目的,也是衡量是否做到“实际地消除大规模放射性释放”的尺度,所以国际原子能机构在 2012 年发布的 SSR2/1:“Safety of Nuclear Power Plants:

Design”中更加明确地提出了“实际地消除大规模放射性释放”的观点。

2016 年,国际原子能机构发布了 SSR2/1 (Revision 1):“Safety of Nuclear Power Plants:Design”,此标准提出了所谓针对日本福岛第一核电站事故经验教训的改进要求。不出所料,因为无法确定合理的“事故情景”,改进要求与我国、美国和其他一些国家在福岛第一核电站事故后的改进类似,无非是增加移动泵、移动电源等移动设备的设置。

国际原子能机构的安全标准对于成员国是推荐性的,事实上只有少数发展中国家,例如中国、巴基斯坦等采用基本照搬的方式。但在福岛第一核电站事故后,当一些欧洲国家,例如瑞士建议把“实际地消除大规模放射性释放”的观点写入对缔约国有约束力的“核安全公约”时,矛盾就充分暴露出来。

在多年的核电发展和有关核安全问题的争论过程中,美国的核电界、监管当局和社会公众已普遍接受了安全的“风险”和“风险控制”的观点。从前面有关商用大型飞机撞击的 10CFR50.150 立法讨论过程等章节的描述也可看出,赞成方和反对方通常都是在利用风险的概念反驳对方,争论的往往是考虑的风险种类以及接受准则是否合适,而“实际地消除大规模放射性释放”这样的概念经不起逻辑诘问(实际上,美国社会和公众不仅仅在核电领域普遍接受“风险”和“风险控制”的概念,在其他领域也一样。例如在控枪争论中,反对控枪的一方指出美国每年交通事故导致的死亡人数远多于枪击,如果控枪的话,是不是也要“控车”)。这样,当美国接受将“实际地消除大规模放射性释放”写入“核安全公约”后,势必要对国内法进行修改,而美国核管理委员会很难说服国内接受这个概念。在国际原子能机构争论的结果是最后将“实际地消除大规模放射性释放”写入不具约束力的“维也纳核安全宣言”。

国际原子能机构面临的这种困境必然导致其安全标准经常是模糊的、模棱两可的,且难于操作的,例如当国际原子能机构将“实际地

消除大规模放射性释放”写入其安全标准后,对“实际地消除”给出的解释是“实质上不可能”(physical impossible)或者“极高的置信度其发生概率极低”,这样国际原子能机构实际上又回到了概率的概念。但是国际原子能机构的这种解释仍然与美国的核安全理念是不完全相符的,例如在福岛第一核电厂事故后美国核管理委员会进行了一项工作,就是将美国的核安全法规与日本的核安全法规进行比较,发现日本在将某些工况排除在考虑之外时所使用的依据是发生概率很低,美国核管理委员会正确地指出:“似乎日本人对风险的理解存在问题。”因为风险不仅要考虑其发生概率,还要考虑其后果。

参考文献

- [1] U.S.NRC.NUREG-1610 “Controlling the Atom: Beginnings of Nuclear Regulation, 1946-1962” [S] .Rockville City: U.S.NRC.
- [2] U.S.NRC.NUREG/KM-0009 “History Review and Observations of Defense-in-Depth” [S] .Rockville City: U.S.NRC.
- [3] U.S.NRC.NUREG-1933 “Containing the Atom: Nuclear Regulation in a Changing Environment, 1963-1971” [S] .Rockville City: U.S.NRC.
- [4] U.S.NRC.NUREG/BR-0175 “A Short History of Nuclear Regulation, 1946-2009” [S] .Rockville City: U.S.NRC.
- [5] U.S.NRC.NUREG/BR-0518 “No Undue Risk: Regulating the Safety of Operating Nuclear Power Plants” [S] .Rockville City: U.S.NRC.
- [6] U.S.NRC.NUREG/CR-6042 “Perspectives on Reactor Safety” [S] .Rockville City: U.S.NRC.

Evolving Nuclear Power Concepts and Methods in Practice an Examination from a Historical Perspective

Tang Bo

(Department of Nuclear Power Safety Regulation, MEE, Beijing 100082, China)

Abstract: Nuclear power safety concepts, requirements and methods are gradually established with the development of nuclear energy and will continue to evolve with new challenges. The current approach to nuclear security consists mainly of deterministic and probabilistic methods, both of which were developed primarily by Americans and widely accepted internationally. The deterministic method is a method for specific reactors and systems, while the subsequent development of probability theory method is a systematic one. In recent years, the probability theory method has been more and more widely used, which has greatly changed the way that people regard nuclear safety issues, and is an important development direction in the future.

Key words: deterministic security approach; probabilistic security approach; basic security functions; security objectives; risk assessment

(责任编辑:徐晓娟)

殷德健. 从核安全多重属性论促进核安全科学认知[J]. 核安全, 2024, 23(3): 21-24.

Yin Dejian. Promoting Scientific Perception of Nuclear Safety in Light of the Multiple Attributes of Nuclear Safety [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 21-24.

从核安全多重属性论促进核安全科学认知

殷德健

(生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 本文从安全的客观性和主观性双重内涵出发, 深入分析了核安全所具有的政治性、技术性和社会性三重属性及其特征和关系; 结合核安全特殊的技术复杂性和社会敏感度, 阐述核安全在科学认知和公众沟通方面存在的困难和挑战, 强调风险管理和有效沟通是提高客观安全性和主观安全感的关键; 最后从政策、技术和舆论三个角度就促进核安全科学认知提出了相关建议。

关键词: 核与辐射; 核安全; 风险管理; 舆情; 科学认知

中图分类号: TL99 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0021-04

鉴于核安全特殊的技术复杂性和社会敏感度, 核安全议题在认知和沟通上存在一些具体困难和挑战, 因此有必要深入分析核安全的内涵和特点, 研究推进有利于形成核安全科学认知的社会舆论环境和政策工具。

1 安全具有客观性和主观性双重内涵

不同人员对于不同领域、不同场景下的安全内涵的理解会有所不同。从广义来讲, 安全是指客观上没有或有很少威胁、主观上没有或有很少恐惧。^[1]其中, 前者基于物质的客观状态, 可称为安全性; 后者基于认知的主观判断, 可称为安全感, 两者共同构建了安全度。安全感的物质基础是安全性, 但也具有其自身特点和规律。

工程技术领域常常将安全定义为可接受的风险, 也包括主客观双重内涵, 即客观风险及其主观认知和接受度。在操作层面, 相关法规标

准明文规定了必要的客观技术要求; 公共政策和行政程序规范了利益攸关方发表意见和决策者进行综合决策的具体程序, 以便于有效应对不同群体的不同认识。

核安全专业性强, 技术复杂, 不易为普通公众所熟悉或理解, 对其安全性和安全感的认识和判断往往伴随着分歧。核电厂设计较为复杂, 强调保守决策, 遵循着体系化的安全逻辑, 综合了确定论、概率论分析和工程判断, 要求使用经验证的成熟技术, 客观上产生一定的封闭性以及不为外界所熟知的保守性。电离辐射概念/量纲繁多且相对抽象、难以直接感知, 低剂量电离辐射的健康效应具有不确定性。因此核安全的认知门槛较高, 难以用通俗易懂的语言进行准确诠释, 而利益攸关者的关注阈值低(即低安全重要度事件受到过高重视)、不易理解一些具体概念和现象, 或受到一些似是而非观点的影响, 加之核武器试验(或爆炸)和过量辐射照射

收稿日期: 2024-03-05 修回日期: 2024-03-07

作者简介: 殷德健(1976—), 男, 现主要从事核电厂和核安全设备安全监管技术支持工作

受害者等图片、视频的视觉冲击以及一些关于核事故的不实报道,易于助长恐核情绪。此外,核安全关注的问题往往是低概率或极低概率事件,根据行为心理学,人们对极低概率事件(如核风险)的直觉判断与事实(或理性判断)之间往往存在系统性偏差^[2]。这些问题都需要正确面对和妥善应对。

2 核安全具有政治性、社会性和技术性三重属性

核安全的主客观双重内涵及其高度敏感性,自然派生出政治性、社会性和技术性等不同属性。

政治性基于核事业和核安全的极端重要性。核能发展不仅是能源问题,对于中国这样的大国,还事关综合国力。核能技术引进或输出直接取决于政治外交关系。严重核事故会对政治局面和社会稳定产生强力冲击,广泛影响内政外交。一些似是而非的谣言或者有失客观的断言可能导致非理性的舆论环境并消耗大量的行政资源,严重时甚至会损害事业发展和社会秩序。在西方国家,核能议题往往成为政治左派和右派的分水岭。因此有必要从政治高度定位核安全事务,在政策层面予以厘清和规范。

社会性基于核的高度敏感性和广泛关注度^[3]。除了前文所述的科学判断、恐核心理以及认知偏差等问题外,随着人们物质生活水平的提升,公众对安全需求更加敏感和强烈;互联网使得热点议题的关注群体扁平化。同时,我国核能事业正处于快速发展期,核安全问题更易受到社会关注,一些安全意义很低的异常就能引发与其重要度不相匹配的关注度。

技术性基于核安全的复杂性。核设施往往系统复杂、专业繁多,其对安全系统的可靠性要求极高。一些安全措施难以通过反复试错加以验证或完善。而且人类认知水平总是有限的,因而必然要面对和处理一些不确定因素,以及在不确定条件下进行决策^[2]。因此,逻辑严密、结构清晰、系统完整的核安全理念及其实现方式(如理论计算、数值模拟、实验试验、可靠的系

统设备等)不可或缺。我们只有依靠技术手段才能有效解决具体的核安全问题,切实保障核安全。

就三者关系而言,政治性和社会性是需求侧,来源于决策层和公众层,反映了其对核安全的要求和期待,这种安全感的需求客观上需要足够的安全性来满足。技术性是供给侧,来源于专业技术层,是解决发展和安全问题、提高安全性的最终手段。

当出现具有显著不确定性的复杂技术问题时,专业技术层将同时面临来自决策层和公众层的双向确定性信息需求。专业技术人员的知识结构和思维惯性更关注相对客观的安全性,而对安全感重视不够,往往缺乏有针对性地主动回应的意识和技巧。积极负责的供应侧需恪守科学理性,发挥能动性,兼顾多重需求但不简单迎合,尽可能提供准确且有温度的信息。决策层也要认识到资源和认知能力的有限性,不能寄望于完全消除所有的不确定因素后才进行决策和实践。实践是检验真理的唯一标准,为了实践、为了进步,往往不得不有所妥协,这是所有实践者的责任。

3 安全性和安全感的关键是风险管理和有效沟通

统筹发展和安全,其关键是有有效管控风险。风险是绝对的,拒绝风险,往往意味着拒绝机会、错失良机,乃至抑制发展。风险管理在国内外很多行业都有广泛实践,已经形成了系统化的技术理念和分析工具。风险管理体现了系统观念和问题导向,既有助于对风险进行定性和定量化评估,又为利益攸关方提供了有效沟通的桥梁。

核行业内外部的有效沟通需处理好两个关系。一是一般性和特殊性关系。核行业作为主动方,需要以非专业人员所能理解的方式诠释核安全问题。因此从业者应该善于发现和总结核行业与其他行业的共性特征,必要时要主动去敏感度和去神秘化,如果过于强调特殊性,则易筑起妨碍沟通的沟壑高墙。二是精确性和通

俗性关系。知识普及往往要求通俗易懂,但通俗性必然忽略了一些精细度或精准性,有些忽略可能是有害的。因此通俗性和精确性的有效组合,才能满足不同群体的信息需求,从而培育出科学理性的舆论环境和持久的公众信任度。

风险管理和公众沟通都要体现分级分类管理理念,要根据安全重要度来确定资源投入强度、应对流程和措施,促进理性共识,努力避免人为因素造成非重要事项(或指标)权重的失真或夸大,从而造成不必要的损失。

4 促进核安全科学认知的几点考虑

习近平总书记强调,既要善于运用发展成果夯实国家安全的实力基础,又要善于塑造有利于经济社会发展的安全环境。落实到核安全领域,就是要通过核事业发展和核安全治理成果的有效积累和再应用不断提升技术能力,并塑造促进高质量发展的安全环境,即强化安全性、提升安全感。

4.1 尊重客观规律,构建具有韧性的政策环境

核电厂异常事件数量将随着核电机组数量的增加而增加,因此需要将风险管理理念和分级分类方法贯彻到具体工作环节,从而做到科学理性分析、综合平衡研判、审慎保守决策。一是完善重要事件报告制度、信息公开制度。构建促进政府(各层级各部门)、行业以及公众之间认知趋同的平台,合理设定并细化报告准则,区分内部报告和对外公开、即时报告和定期报告,既要做到应报尽报,也要体现轻重缓急,并通过逻辑清晰、层级分明的响应机制,避免过度反应或反应不足。二是构建快捷便利高效的经验反馈体系。加强数据统计和深度分析,全面呈现信息,合理确定应对方案或改进措施,既要避免同类事件重复发生,又要避免短期情绪性操作。三是培育卓越的核安全文化和积极的错误文化(也称错误管理文化)^[4,5]。善于从错误中学习和进步,鼓励主动报告和分享,把积极性错误或异常视为提升能力的重要机会,而不是洪水猛兽,避免简单责难或恐慌失策,更要杜绝弄虚作假、谎报瞒报。

4.2 突出专业致胜,实现高水平科技自立自强

解决具体工程问题的最终钥匙是科学技术。长期以来,我国核安全监管工作往往参考国际实践或直接使用国外技术文件,同时核行业原始创新和正向设计能力尚有欠缺。随着我国核事业的迅速发展、技术路线更加多样,必然要面对和处理一些新的复杂问题,无先例可循,无经验可鉴,因此要敢于创新、善于创新,独立做出判断和决策,并经得住舆论挑战和历史考验,做到以下几个方面:一是发扬主动精神,突出专业致胜,严格溯源求真,尤其是强化对基础性和共性问题的凝练、聚焦和协同研究;同时避免研究领域的形式主义(研究虚假问题)和奢靡之风(投入过大却缺乏成效);二是敢于和善于通过不断实践提高认知水平,在事业发展和经验积累中持续夯实技术能力,提高独立处理复杂技术问题的能力;三是善于有效应用和管控新技术,采取开放积极的态度研究一些新兴技术或颠覆性技术对核安全的影响,包括其应用的可行性和规范性以及实现条件和路径,并加以协同推进。

4.3 结合舆情时代特征,做好舆论引导和正向传播

互联网更易于传播负面信息。在我国举国体制和大政府管理模式下,经过充分发酵的网络负面信息和公共话题更易于最终指向政治话题。核能是一个高度社会分化的议题,负面核安全信息有可能迅速成为热点问题,并出现放大、叠加和膨胀效应,可能产生难以预料的影响。因此,要从以下几个方面加强防控:一是要努力避免核能或核安全议题成为舆论热点,规范信息发布、管控不良炒作,尤其是避免官方机构挑起不必要的纷争;二是要更加重视常态化信息公开和知识普及,提供多内容多层次多形式的信息,既有通俗易懂的科普短文,又有科学严谨、系统全面的陈述诠释,平时发布的知识信息往往比应急情况下临时发布的信息更易获得公众信任,同时,网民知识结构的多样化要求核行业能够提供经得起比较、推敲、质疑的严谨信息,如果信息混乱、自相矛盾,就会破坏信任且

很难恢复;三是要妥善应对舆情危机,坚持实事求是、科学理性、态度诚恳的原则,在保证发布信息客观真实的情况下避免舆情蔓延到其他问题或领域,如果为了迎合外部对信息精确性的要求,刻意对那些难以准确量化的信息进行量化判定,那么其所固有的巨大不确定性容易造成后期被动局面;四是要结合谣言产生和传播的特点,避免自身原因助长谣言滋生。根据传媒学观点,除了公众判断力外,谣言与事情的重要度和模糊性紧密相关,^[5]而有些重要度具有虚假性,这种虚假性源于受众(包括决策者和公众)的主观直觉判断或信息不对称,因此平时就要注重客观全面诠释,正本清源,消除不必要

的关注度,模糊性往往来自当事方对事实的有意回避、遮蔽甚至扭曲,迅速发布准确事实是制止谣言传播的最有效方法。

参考文献

- [1] 赵磊. 国家安全学与总体国家安全观 [M]. 北京: 中国民主法治出版社, 2023.
- [2] 雷德·海斯蒂. 不确定世界的理性选择: 判断与决策心理学 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [3] 尼克·皮金, 罗杰·E. 卡斯帕森, 保罗·斯洛维奇. 风险的社会放大 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2023.
- [4] 殷德健, 张泽宇, 齐媛. 浅论安全文化与错误文化的异同 [J]. 核安全, 2023, 21(06): 1-10.
- [5] 奥尔波特. 谣言心理学 [M]. 辽宁: 辽宁教育出版社, 2003.

Promoting Scientific Perception of Nuclear Safety in Light of the Multiple Attributes of Nuclear Safety

Yin Dejian

(Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 100082, China)

Abstract: Based on the dual connotations of safety which refer to objectivity and subjectivity, this paper delves into the triple attributes of nuclear safety including political, technical and social dimensions, as well as their characteristics and relationship. And then the specific difficulties and challenges in the perception and communication of nuclear safety are discussed, taking account for the unique technical complexity and social sensitivity of nuclear safety. And the crucial role of risk management and effective communication is addressed in promoting the objective and subjective safety. Finally, this paper presents some propositions in order to promote scientific perception of nuclear safety from three aspects of policy, technology and public opinion.

Key words: nuclear and radiation; nuclear safety; risk management; public opinion; scientific perception

(责任编辑: 徐晓娟)

王煦嘉, 齐军, 沙正峰. 纵深防御理念下的核电机组调频能力深化研究[J]. 核安全, 2024, 23(3):25-32.

Wang Xujia, Qi Jun, Sha Zhengfeng. Deepening Research on the Frequency Control Capacity for Nuclear Power Plant under the Concept of Defense in Depth [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3):25-32.

纵深防御理念下的核电机组调频能力深化研究

王煦嘉¹, 齐军², 沙正峰¹

(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233; 2. 山东核电有限公司, 烟台 265116)

摘要: 通过调研总结了国内、国外核电机组在调频方面的设计和运行经验, 以国和一号调频能力深化研究为例, 提出了开展核电机组调频能力优化评估的基本思路: 首先是确定调频能力的优化目标; 然后基于优化目标开展可行性评估, 包括全寿期内反应堆冷却剂压力边界的完整性, 控制棒和控制棒驱动机构的使用情况, 以及运行中可能的技术风险; 最后基于核安全纵深防御的理念提出了调频运行相关的安全改进措施, 包括调频运行的投运和退出限制条件。深化研究表明, 以包络 EUR、URD 和我国火电机组下限调频能力要求为优化目标, 并考虑必要的纵深防御安全措施, 国和一号具备进一步开展调频能力优化的技术可行性。

关键词: 一次调频; 二次调频; 设计瞬态; 纵深防御

中图分类号: TL3 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0025-08

我国发电厂与维持电网频率有关的辅助服务主要包括一次调频、二次调频和调峰。“十三五”期间新能源行业迅速发展。在国家“3060”双碳目标下, 预计“十四五”期间, 以风、光为代表的可再生能源装机容量将持续增长, 逐步替代部分低效老旧的火电机组。在该发展趋势下, 我国电力系统频率响应能力进一步减弱^[1]。核电机组参与电网频率调节辅助服务的必要性以及具体的性能要求关注度日益提升。

在我国核电参与调峰的策略以及一次调频具体技术方案方面, 已有不少相关的研究: 有些研究系统地总结了国外核电 (尤其是法国) 机组参与调峰的技术及管理经验, 论证了我国核电机组参与调峰的可行性, 并提出了积极稳妥推进我国核电参与调峰的建议^[2]; 另有一些研

究是针对核电机组汽轮机一次调频的设计方案和应用等方面的^[3]。本文基于我国自主大型压水堆核电技术国和一号, 重点研究了进一步开展调频能力深化的技术可行性。

1 一、二次调频的基本概念

广义上的调频, 包括一次调频、二次调频和三次调频 (即调峰)。本研究主要关注一次调频和二次调频。

发电机组响应电网频率的变化做出适当的调节是维护系统运行频率稳定的第一道防线, 即一次调频。一次调频是一种有差调节方式, 只有当电网频率波动突破控制死区时, 机组才按照一定的限幅进行负荷调节, 从而实时纠正超出死区以外的频率偏离。当电网频率恢复到

收稿日期: 2024-04-11 修回日期: 2024-04-29

作者简介: 王煦嘉 (1983—), 男, 硕士, 现主要从事核电厂总体设计工作

控制死区以内,一次调频结束。进一步的频率恢复需要通过二次调频完成,目前主流的二次调频主要采用自动发电控制(AGC)方式,发电机组在规定的出力调整范围内跟踪电力调度指令按照一定调节速率(如1%/min)实时自动调整发电出力,使电网频率恢复到额定值。除了AGC外,二次调频也可采用手动调节(MGC)方式,但需机组严格执行发电计划,与调峰的方式类似,实际较少采用。因此也常采用AGC来指代二次调频。典型电网频率控制过程如图1所示。

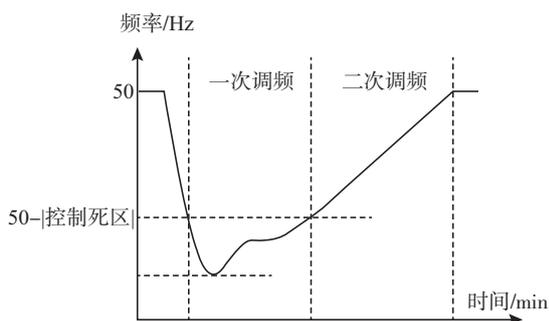


图1 电网频率控制过程示意图(一次调频和 AGC)
Fig.1 Schematic diagram of the power grid frequency control process (primary frequency control and AGC)

从电网对并网机组的考核角度,一次调频服务是机组必须具备的能力,核电机组如不参与将可能面临考核罚款;AGC为有偿辅助服务,业主可自主决策是否参与。

2 国外核电机组调频设计和运行经验

2.1 概括

2018年,国际原子能机构(IAEA)发布了成员国范围内核电机组非基负荷运行情况总结报告^[4],给出了各成员国核电机组参与电网调频以及调峰的情况,包括美国、法国、德国、俄罗斯等国核电机组核电设计以及在实际运行中的考虑。

2.2 美国

较长一段时间以来,美国大部分核电机组均是维持基本负荷运行,较少参与电网调频和调峰,主要是由于:

(1)美国核电装机容量占比较低。美国电力市场辅助服务主要还是依靠天然气(考虑页岩气的开发利用)和燃煤发电,而气电在调频方面的作用非常强。

(2)美国已有的大部分核电机组服役时间较长,且大部分机组进行了延寿,综合考虑高昂的固定资产折旧和低廉的燃料成本,维持基本负荷运行是经济的选择。

(3)美国电力市场实施了电力服务报价的市场化,核电参与有偿的调频辅助服务报价不占优势。

然而随着美国风能、太阳能和水力发电能力的持续增加,以及新能源抵免税收的政策持续影响,核电机组如果继续维持基本负荷运行将有可能在未来面临零电价或者负电价的风险。因此,美国电力研究院(EPRI)发布的先进轻水反应堆用户要求文件(URD)^[5]中明确要求了核电机组设计需具备自动频率控制(AFC)的功能。

2.3 法国

由于核电发电占比较高(超过75%),法国核电机组参与一次调频、AGC和调峰。法国核电机组汽轮机控制系统总负荷控制逻辑原理图如图2所示^[6]。

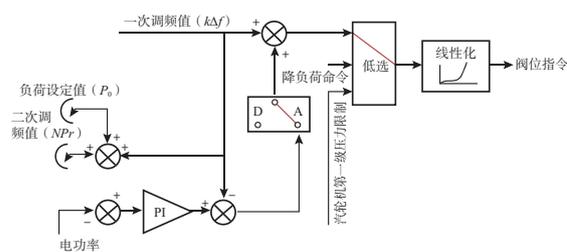


图2 法国核电机组汽轮机负荷控制原理图
Fig.2 Schematic diagram of the steam turbine load control logic for French nuclear power units

基于图2所示的控制方式,正常运行期间汽轮机负荷总输出目标值由如下公式确定:

$$P = P_0 + k\Delta f + NP_r$$

其中, P 为总目标输出功率, P_0 为负荷设定目标值, k 、 N 为由操纵员设置的系数, Δf 为电网频率变化值, P_r 为电网调度要求的负荷变化值。

因此,法国核电机组在进行一次调频的同时可进行二次调频,以及调峰。实际运行期间,将由操纵员对一次调频和 AGC 限幅进行控制,根据 EDF 的经验,通常,一次调频限幅($k\Delta f$)为 2% 额定功率,AGC 限幅(INP)为 5% 额定功率。

法国主导的欧洲先进压水堆(EPR)设计中充分考虑机组的调频性能,设计满足欧洲先进压水堆用户要求文件(EUR)^[7]的要求。

2.4 俄罗斯

与美国的情况类似,由于核电装机容量占比较小,而火电等其他资源丰富,俄罗斯核电机组维持以基负荷运行为主。但在核电机组设计上,俄罗斯原子公司在 VVER 核电机组设计上兼顾了各种参与电网调峰和调频的能力,VVER-1000、VVER-1200、VVER-TOI 等机型的设计能力也均符合 EUR 的要求。

尤其是新一代 VVER-TOI 机组,其设计旨在提高俄罗斯 VVER 技术在国际市场上的竞争力,其调频能力可同时覆盖俄罗斯电网以及 EUR 的要求,具体见表 1。

表 1 VVER-TOI 一、二次调频设计能力
Table 1 VVER-TOI Primary and Secondary Frequency Control Design Capabilities

参数	值
一次调频负荷限幅	$\pm 2\%RTP$,可增加至 $\pm 5\%RTP$
允许次数	7×10^6
一次调频最大能力	$+2\%RTP$ 到 $-8\%RTP$,可增加至 $+5\%RTP$ 到 $-8\%RTP$
允许次数	每 6 h 不超过一次,同时一年不超过 20 次
二次调频负荷限幅	$\pm 5\%RTP$,可增加至 $\pm 10\%RTP$
允许次数	5×10^6

2.5 比利时

比利时在 1974—1985 年建造了 7 座商用核电站,2003 年以后明确停止新建核电机组。截止到 2014 年,核电占其国内发电量的 47%,仍占据较高的份额。

比利时在核电的调峰调频方面开展了大量

的支持性研究,目前其国内的核电机组较保守地参与一次调频和调峰。一次调频的最大调节限幅为 2.5%,且不允许在机组调峰时投运一次调频功能。比利时核电机组也不参与二次调频。

2.6 韩国

自 1970 年以来,韩国一直坚定地致力于发展核电。韩国核电机组一直维持基本负荷运行,政府要求核电机组不参与电网辅助服务。韩国的水电、化石能源以及抽水蓄能电站足够满足电网平衡电力供需和频率控制的要求。然而,近年来,基于政府可能会对其国内新能源进行整合考虑,为满足未来对核电机组的灵活性要求,韩国新一代的 APR+ 系列机组在设计上充分考虑灵活性的同时,也针对在运的 OPR-1000 开展了一些设计改进和评估,从而使之可实现限幅为 $\pm 2.5\%$ 的一次调频能力和限幅为 $\pm 5\%$ 的 AGC 能力。

2.7 德国

德国的核能研究起步很早,西德早在 20 世纪 50 年代就开展核电研究,建立了一系列核能研究中心,并且大部分研究中心和大学的研究院都拥有实验反应堆,在核电机组调峰相关技术方面开展了深入研究,其中多项技术均在后续 EPR 设计中有所应用,如部分功率台阶平均温度不变的控制方案、气动小球活化方案的三维堆芯在线监测系统。

然而自福岛核事故后,德国国内开始实施彻底弃核政策,逐步开始关停一些核电机组,核电机组装机容量占比进一步减小,未关停的机组均维持基本负荷运行。直至 2023 年 4 月 15 日,德国最后 3 座核电厂停止运行,宣告了德国核电生产时代的全部结束^[8]。在新能源占据主体的情况下,德国采取了多项措施来维持电网频率稳定,其中一条重要的措施是实现了与邻国联网电力互通,其邻国均是核电占比较大的国家,因此,虽然德国放弃了核电,但是核电对于其国内电力系统的影响仍在。

2.8 小结

与调峰的情况类似,核电占比较大的国家,以法国、比利时为代表,尤其是法国,在利用核电

进行调频方面的经验较为丰富。美、俄、韩基于其本国能源政策,核电机组的调频经验虽然相对较少,但考虑新能源的发展趋势,核电机组设计中按照“用户文件要求”和各自国家电网要求考虑了调频能力,并对在运机组进行改进优化。

已有参与调频的国外核电机组中,一次调频的实际调节限幅为 $\pm 2\%$ (法国)和 $\pm 2.5\%$ (比利时);AGC 调节限幅为 $\pm 5\%$ (法国)。

俄罗斯 VVER-TOI 的调频性能同时覆盖了俄罗斯本国电网需求和 EUR 的要求,是一种可借鉴的总体设计采标思路。

3 我国核电机组参与调频的现状

3.1 核电机组参与一次调频和 AGC 的现状

近年来,我国越来越多的核电机组参与一次调频辅助服务。在 2020 年前后,中核集团秦山核电基地多台机组(秦山二期 1—4 号机组和方家山 1—2 号机组)完成了一次调频功能改造^[9]。2022 年,三门、海阳 AP1000 依托项目先后委托开展了一次调频优化的可行性评估,并基于纵深防御的考虑,增加了一次调频的安全闭锁条件,基于此开展了技术改造。预计 2024 年底 AP1000 依托项目 4 台机组将全部具备一次调频功能。以上机组一次调频实际调节限幅设定值为 $\pm 3\%$ 。

在二次调频方面,我国核电机组尚无参加 AGC 的先例,我国电网该辅助服务仍是以火电机组为主力完成。

3.2 核电机组参与一次调频与 AGC 的性能要求

2021 年,国家电网牵头发布了 GB/T 40595^[10],首次在国家标准层面对核电一次调频性能要求进行了规定,要求:核电机组一次调频死区设置应不大于 ± 0.067 Hz,一次调频最大调节幅度应不小于 6% 额定功率(见表 2)。此外,该标准还要求当机组以额定有功功率运行时,增负荷调节方向变化幅度应达到 2%~6% 额定功率,如果执行该条要求,正常运行期间核电机组的瞬时功率可能达到 102%~106%,这与核电机组运行严格控制堆芯核功率不超额定值的实际情况和核安全纵深防御的理念不符,可能有待进一步

的探讨。

表 2 区域电网对一次调频的要求

Table 2 Requirements for primary frequency control of regional power grids

技术指标	南方电网	华东电网	东北电网
控制死区	± 0.067 Hz	± 0.067 Hz	± 0.067 Hz
最大调节限幅	$\pm 6\%$	$\pm 3\%$	4%~5%

我国区域电网对并网机组辅助服务要求的实施细则文件^[11-13],也对核电一次调频的性能要求进行了规定,具体见表 3。

通过对比可知,区域电网细则要求中,南方电网对核电一次调频性能的要求相对较高,该要求与 GB/T 40595-2021 一致。考虑到不同核电型号在安全设计和运行要求方面的区别,建议进一步讨论完善核电机组参与一次调频的通用要求。

我国电网对核电机组暂无 AGC 相关的要求。

4 国和一号调频能力优化简介

4.1 背景和优化的必要性

国和一号是基于《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》确定的 16 个科技重大专项之一“大型先进压水堆及高温气冷核电站”研发的,并结合了我国数十年压水堆技术研发、设计、建造和安全运行的成功经验及近年来核电技术的发展成果,形成的具有完全自主知识产权的大型三代压水堆核电技术。

国和一号在电网频率控制设计方面要求满足 URD 的要求^[14]。然而,根据我国当前新能源的政策导向,结合近年来核电机组陆续开始参与一次调频的情况考虑,国和一号在对标其他基于 EUR 的机组调频设计方面,仍有不足。因此,为使国和一号更好地适应我国未来电网的需求,并兼顾增强该型号的国际竞争力,有必要针对国和一号的调频能力进行优化设计。

4.2 调频性能优化目标的确定

参考 VVER-TOI 的采标经验,在确定国和一号调频设计能力优化目标时,首先考虑优化

后的机组调频性能应能同时满足我国未来电网需求,并包络 URD 和 EUR 的要求。因此,优化目标选取的关键点在于确定我国未来电网对核电机组的调频性能需求。

从替代老旧火电机组的调频能力考虑,假设未来核电机组的调频能力能够达到当前火电机组的下限,则可最大程度地减小大量老旧火电机组退出带来的影响。因此,初步考虑,以当前火电机组的调频能力下限作为未来核电机组调频能力的优化目标。

表 3 给出了 URD、EUR 与我国火电机组下限一、二次调频能力的要求对比。

表 3 URD、EUR 以及火电机组下限调频能力要求对比
Table 3 Comparison of URD, EUR, and thermal power units' lower frequency control capacity requirements

	主要性能参数	URD	EUR	火电机组下限能力
一次调频	控制死区	-	± 0.05 Hz	± 0.033 Hz
	负荷限幅	-	$\pm 3\%$, 最大不超过 $\pm 5\%$	$\pm 6\%$
AGC	调节幅度(峰峰值)	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 25\%$
	负荷变化速率	2%/min	1%/min	1%/min
	每天允许次数	35 次	-	-

因此,考虑包络的性能参数,得到一次调频和 AGC 的初步优化性能目标如下:

(1)一次调频:

- ①控制死区: ± 0.033 Hz;
- ②最大调节限幅: $\pm 6\%$ 额定功率。

(2)AGC:

- ①最大调节限幅: $\pm 25\%$ 额定功率;
- ②调节速率:2% 额定功率 /min;
- ③平均每天允许次数:35 次。

在确定了初步优化目标后,下一步通过分析论证实现该目标的可行性。可行性的评估是

以国和一号已有系统、设备和部件设计为基础的。如果分析结果显示该优化目标的实现存在难度,或需对国和一号的重要系统进行设计调整才可满足,则对优化目标进行适当调整,并再次进行评估。

4.3 优化目标的可行性评估

4.3.1 关键设备和部件的疲劳

为满足 60 年设计使用寿命的要求,需保证反应堆冷却剂系统(RCS)压力边界在设计寿命期内的完整性,需对 RCS 压力边界内的关键设备和部件开展疲劳影响评估,这种疲劳影响评估应基于全寿命期内所有计划发生或可能发生的运行事件,而不是仅针对机组调频瞬态。

经过瞬态和力学分析迭代,最终确定的调频设计瞬态清单见表 4。考虑 $\pm 25\%$ 调节能力的 AGC 与日负荷跟踪的幅度相当,因此这两个瞬态作为互斥瞬态考虑(实际运行中控制不在同一天进行),另外再考虑每天 35 次 $\pm 10\%$ 调节能力 AGC 能力以覆盖 URD 和 EUR 的要求,在这样的瞬态组合下,RCS 压力边界设计仍可满足机组 60 年设计使用寿命的要求。

表 4 调频设计瞬态清单

Table 4 Frequency control design transient list

瞬态名称	工况分类	60 年设计频次	ASME 使用限制
一次调频(负荷先升再降)	正常	2×10^6 ^①	A 级
一次调频(负荷先降再升)	正常	2×10^6 ^①	A 级
AGC($\pm 10\%$ 峰峰值变化)	正常	7.5×10^5 ^②	A 级
AGC($\pm 25\%$ 峰峰值变化) ^①	正常	1.78×10^4 ^③	A 级
日负荷跟踪 ^①	正常	1.78×10^4 ^③	A 级

注:① 保守假设每月 3000 次;

② 沿用 URD 的要求,每天考虑 35 次;

③ 50%AGC 与日负荷跟踪瞬态互斥,每天允许一次,且不在同一天发生。

4.3.2 控制棒及控制棒驱动机构的使用寿命

国和一号采用了机械补偿调节控制策略,

燃料循环寿期的大部分时间内依靠控制棒控制反应性和轴向功率分布,并阶段性调节冷却剂中可溶硼的浓度以维持控制棒在调节区内。调频能力优化后对该运行策略下的运行要求进一步提高,同时也对控制棒的使用寿命和驱动机构的最大步跃数提出了更高要求,为此需开展相关分析评估,分析结果表明:

(1) 国和一号现有控制棒设计寿命仍可满足调频能力优化后的堆芯反应性和轴向功率分布控制;

(2) 考虑相对现实的假设,一次调频按照现阶段实际评估的瞬态次数(100次/年),同时机组不参与AGC,日负荷跟踪能力仍维持不变,得到60年寿期内最大控制棒步跃数约为533万步,小于当前控制棒驱动机构最大步跃数600万步。

需补充说明的是,实际机组参与调峰调频运行不可能每次都是最大限幅,且表4中的瞬态次数是非常保守的,不宜视为真实情况进行评估,或作为设备设计的设计输入。因此,采用了相对现实的评估。当然,在代价可接受的范围内,驱动机构的最大允许步跃数越大,对机组的优化后调频能力发挥是越有利的。此外,还可考虑采取进一步减小控制棒动作数量的技术措施,如开展反应堆功率控制系统方面的优化。

4.3.3 运行控制仿真

国和一号仪控系统满足10%额定功率阶跃和每分钟5%额定功率线性的变负荷能力,这两种运行瞬态理论上可分别包络一次调频和AGC。但考虑一次调频瞬态过程较快,且存在快速返回100%额定功率的过程,因此开展了仿真分析,重点研究瞬态过程中超功率的情况,主要分析假设如下:

- (1) 按照寿期初(BOL)工况开展模拟分析;
- (2) 控制棒微分价值取1 pcm/步;
- (3) 一次调频阶跃发生后考虑充分发展2000s后再完成反向阶跃。

分析得到一次调频期间反应堆功率随汽轮机负荷的变化情况如图3所示,如果汽轮机负荷由94%阶跃升到100%额定功率,反应堆峰值瞬时核功率达到了约100.8%,虽不超过

102%的瞬时功率限值,但仍可能存在超规定的10 min平均热功率干预值(100.1%)的风险,因此从纵深防御的角度分析,在调频的控制系统设计中应考虑对超核功率的风险进行控制。

此外,更进一步地分析还表明:RCS的系统参数也会因为一次调频的原因出现比稳态运行时更大的波动。图4给出了一次调频期间稳压器压力变化过程,作为示例。此类波动可能会增加进入技术规格书的操纵员的干预数量。

而AGC的优化方面,由于负荷调节的速率维持2%额定功率/min的设计能力不变,仅是对最大调节限幅进行调整,因此判断对控制系统的影响不大。

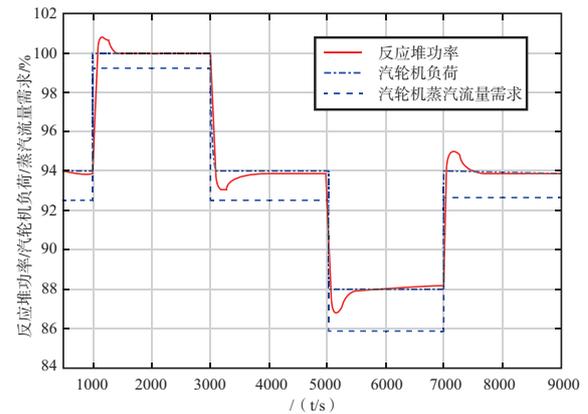


图3 一次调频期间反应堆、汽轮机功率及蒸汽流量需求
Fig.3 Reactor, turbine power, and steam flow demand during primary frequency control

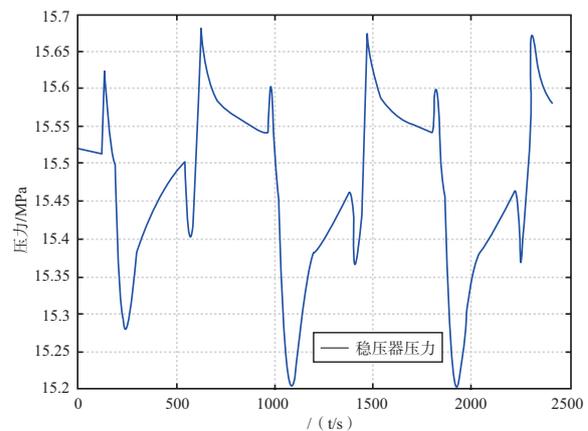


图4 一次调频期间稳压器压力
Fig.4 Pressurizer pressure during primary frequency control

4.4 调频运行安全的改进措施

国和一号机组调频运行属于正常运行瞬态,由于瞬态过程的随机性较强,且瞬态初始反应堆所处的状态也不确定,调频运行可能会加重瞬态期间电厂主参数偏离稳态运行点的程度,距离达到安全系统动作整定值的裕量降低。因此,调频运行的安全首先是基于纵深防御理念考虑的,可通过设置一系列的退出和进入条件,避免预计运行事件和非计划停堆的发生,从而进一步加强电厂的安全性和可用性。这些退出和进入条件是基于已有一次调频改造的实施经验、调频运行的仿真结果结合工程判断得出的。与此相关的电网考核条件,建议与电网协商申请进行豁免。

调频运行的退出条件可通过对控制系统的优化实现,典型的退出条件总体考虑如下:

(1) 机组处于技术规格书中规定的正常运行允许的偏离运行状态时(如允许范围内的燃料破损、一回路可被补水补充的连续泄漏);

(2) 核蒸汽供应系统参数波动较大出现自动报警信号时(如稳压器、蒸汽发生器等参数报警);

(3) 反应堆功率测量或功率裕度条件不足以支撑调频时(如反应堆冷却剂 ΔT 功率突破上下限值);

(4) 反应堆反应性调节功能丧失或不足时(如机组处于延伸运行或操纵员进行手动控制反应性时);

(5) 常规岛系统性能不足时(如汽轮机甩负荷、汽轮机跳机等)。

在投运方面,需通过操纵员手动投运,而不设置自动投运功能。根据优化后的规程,操纵员在完成进入条件的核实后才可投入调频功能,典型的进入条件如下:

(1) 并网后机组升功率达到调峰功率范围;

(2) 在燃料合同规定的升、降功率运行限制内;

(3) 汽轮机控制系统的负荷限制功能有效。

5 总结和实施建议

基于当前我国能源规划以及电力系统特

点,核电机组具备优化的调频能力将成为未来重要的发展方向。世界范围内,核电机组参与调频的经验证明了技术的可行性,具有重要的借鉴意义。从适应未来电网要求和提升竞争力的角度,结合核电型号的设计流程,国和一号开展了调频性能优化的深化研究和评估,研究结果表明:以包络 EUR、URD 和我国火电机组的下限能力的性能参数作为调频能力优化目标,并考虑控制系统(退出条件、死区调节)和运行规程(进入条件)方面的局部优化,国和一号的调频能力具备进一步优化的技术可行性。

从实施角度考虑,建议以循序渐进的方式稳步推进核电机组参与调频,在保证安全可靠的前提下,进一步挖掘核电频率调节的潜力,使核电机组在我国未来的新型电力系统下发挥更大作用,从而为实现国家“3060”双碳战略目标提供助力。

参考文献

- [1] 李卫东. 关于频率响应控制未来发展的思考[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 84-89.
- [2] 孙杉, 苟峰. 我国核电调峰要采取积极稳妥的策略[J]. 中国核工业, 2017, 26(4): 1-6.
- [3] 展晓磊, 曾彬. 核电厂汽轮机一次调频设计方案与应用研究[J]. 电力系统自动化, 2017, 38(11): 88-95.
- [4] International Atomic Energy Agency. Non-baseload operation in nuclear power plants: Load following and frequency control modes of flexible operation[R]. VIENNA: IAEA, 2018.
- [5] Electric Power Research Institute. Advanced Nuclear Technology Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document: Volume III ALWR Passive Plant: Chapter 1: Overall Requirements[R]. California: Electric Power Research Institute, 1999: 4.
- [6] Patrick Morilhat. Nuclear Power Plant Flexibility at EDF: 30 years of experience[C]. *Flexible nuclear power and ancillary services*, Stockholm Sweden, 2019.
- [7] European Utilities Requirement Document (EUR). European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Volume 2, Generic nuclear island requirements. Chapter 3 grid requirements[R]. 2012.
- [8] 环球时报-环球网. 最后三座关闭!“德国告别一个时代”[EB/OL]. 国家核安全局, 2023. <https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/>

- gjzx/202304/t20230420_1027768.html.
- [9] 秦山核电生产计划处. 浙江秦山核电四台机组一次调频功能投运 [EB/OL]. 北极星核电网, 2019. <https://news.bjx.com.cn/html/20200319/1055800.shtml>.
- [10] 国家标准化管理委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595-2021 [S/OL]. 中国标准出版社. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?heno=03B767C66C72E791F978942578237835>.
- [11] 国家能源局华东监督局. 华东区域电力并网运行管理实施细则 (模拟运行稿) [R/OL]. (2022-08-29). http://hdj.nea.gov.cn/load.loadPage.d?newsid=1486513218&page=gknr_detail.xml&siteCode=hddjwucm&urlChannelId=1481002301&urlMenuId=1481001293.
- [12] 国家能源局南方监督局. 南方区域并网发电厂辅助服务管理实施细则 [R/OL]. (2022-06-13). <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=4028811c80b7744a01815cbdb9a4006e>.
- [13] 国家能源局东北监督局. 东北区域电力并网运行管理实施细则 (模拟运行稿) [R/OL]. (2023-04-03). <https://dbj.nea.gov.cn/dbjnea/zwfw/zcfg/2023041410312923795/index.shtml>.
- [14] Mingguang Zheng, Jinquan Yan, Shentu Jun, et al. The General Design and Technology Innovations of CAP1400 [J]. Engineering, 2016, 2 (1): 97-102.

Deepening Research on the Frequency Control Capacity for Nuclear Power Plant under the Concept of Defense in Depth

Wang Xujia¹, Qi Jun², Sha Zhengfeng¹

- (1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;
2. Shandong Nuclear Power Company, Co., Ltd., Yantai 265116, China)

Abstract: Through research, the design and operation experience of domestic and foreign nuclear power units in grid's frequency control are summarized. Taking the deepening research on frequency control capacity of CAP1400 as an example, the basic ideas for carrying out optimization evaluation of frequency control capacity of nuclear power units are proposed: firstly, the optimization objective of frequency control capacity is determined; then, the feasibility evaluation is carried out based on the optimization objective, including: the integrity of reactor coolant pressure boundary during the whole life period, the use of control rods and control rod driving mechanisms, and possible technical risks in operation; finally, based on the concept of depth defense of nuclear safety, the safety improvement measures related to frequency control operation are proposed, including the operation and exit restrictions of frequency control operation. The deepening research shows that, with the optimization objective of enveloping EUR, URD and the lower limit of frequency control capacity requirements of Chinese thermal power units, and considering the necessary depth defense safety measures, CAP1400 has the technical feasibility to further carry out frequency control capacity optimization.

Key words: primary frequency control; secondary frequency control; design transient; defense in depth

(责任编辑:徐晓娟)

梁云平. 总体国家安全观视域下辐射安全监管的“位”与“为”[J]. 核安全, 2024, 23(3):33-36.

Liang Yunping. The “Position” and “Action” of the Radiation Safety Supervision from the Perspective of the Overall National Security Concept [J].

Nuclear Safety, 2024, 23(3):33-36.

总体国家安全观视域下辐射安全监管的“位”与“为”

梁云平

(北京市核与辐射安全中心, 北京 100089)

摘要: 为进一步做好核与辐射安全监管工作, 在总体国家安全观视域下, 本文分析了当前北京市辐射安全面临的形势、辐射安全监管存在的问题与不足, 提出在维护国家安全工作中找准目标定位, 把握辐射安全监管工作的重点和方向, 明晰工作路径, 以在“位”必有“为”的责任感, 进一步担当作为, 全面履行好辐射安全监管职责, 防范风险, 真正把总体国家安全观落到实处。

关键词: 总体; 国家安全; 视域; 辐射安全; 监管

中图分类号: X3 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0033-04

作为国家重点支持的战略性新兴产业, 目前, 核技术在工业、农业、医疗和安全等领域被广泛应用, 如同位素检测、辐照育种、辐照保鲜、辐照消毒、核医学诊断与治疗以及行李检测设备等方面均有应用, 且呈快速发展态势。核技术是一把“双刃剑”, 它在带来社会效益的同时, 也带来了诸多安全隐患, 若是利用不当, 可能引发辐射安全事故。

国家高度重视辐射安全。近些年, 我国先后出台了相关法律、法规, 对核技术的应用进行了严格的规定, 授权生态环境部门统一对放射性同位素与射线装置的安全和防护工作进行监管, 并建立了“两级审批、四级监管”体系, 这对于推动我国核技术的安全应用、保障人民的健康安全具有重要意义。在 2023 年全国生态环境保护大会上, 习近平总书记强调“要守牢美丽中国建设安全底线, 贯彻总体国家安全观, 积极有效应对各种风险挑战, 切实维护生态安全、核

与辐射安全等”^[1], 辐射安全事关国家安全、人民福祉和社会稳定, 辐射安全监管工作是党中央、国务院赋予生态环境部门的政治任务和光荣使命, 是生态环境部门法定的“责任田”。

本文以北京市为例, 在总体国家安全观视域下, 分析了当前北京市辐射安全面临的形势、辐射安全监管存在的问题与不足, 并提出对策建议, 以期为做好新形势下辐射安全监管工作提供思路。

1 机遇与挑战

1.1 核技术应用高速发展

北京作为全国核技术应用较活跃的地区之一, 集中了全国顶级核技术医疗、核科研教学、核检测、辐照加工等行业。目前, 北京共有核技术利用单位 4000 多家, 其中 70% 以上为医疗行业, 比十年前增加了 2000 多家, 增长一倍以上, 且以平均 300 家/年的速度增长; 全市在用射线

收稿日期: 2023-08-30 修回日期: 2024-03-11

作者简介: 梁云平 (1975—), 女, 教授级高工, 硕士, 从事环境监测与评价、辐射安全管理工作

装置 1.1 万余台套,较十年前增加了 4500 多台套,增长超过 60%。

1.2 辐射安全风险大

目前,北京市在用放射源 3600 余枚,且高危险性放射源(I类、II类)比重较高,占本市在用放射源总数的 30% 以上。北京市是全国最大的放射源生产基地,全国辐照装置、伽玛刀、伽马探伤等使用的 I 类极高危、II 类高危放射源,大部分由北京生产并发往全国各地。此外,北京还是全国三分之二的放射性物质生产基地及 80% 以上的放射性物质航空进出口港口。首都机场 2 个放射性货包周转库每年流通量有上万个货包、十几万枚(件)放射源,存在较大的运输安全隐患。

1.3 辐射安全监管任重道远

经过多年的努力,北京市辐射安全监管工作坚持“理性、协调、并进”的核安全观,加强监管体系和监管能力两个现代化建设,实施文化引领、制度规范和能力保障三大措施,构建行政审批、监督执法、技术支持和废源收贮相结合的“四位一体”监管模式^[2],加强全面监管,近年来未发生较大辐射安全事故。但在新时期,辐射安全种类日益复杂,不确定性也在加大,必须要清醒地认识到,辐射安全监管能力与水平必须与时俱进,以有效应对核技术应用快速发展的规模和速度所带来的风险挑战。

2 问题与短板

当前,北京市辐射安全监管机制总体运行较好,但在监管方式、监管能力以及监管力量等方面还存在一些不足,主要体现在以下几个方面。

2.1 精准监管不够,监督检查效力受限

监管方式上还因循传统思维,针对行业辐射安全特点研究不深,如对科研教学单位、核医学领域及探伤作业单位的监管水平和监管手段缺少针对性,对从业单位辐射安全防护分类指导不够细致到位,对以产生低放射性和极低放射性废物为主的科研教学单位的废物最优化收贮指导不够具体。执法人员不从事具体的辐射安全监督检查,从事监督检查的人员无行政执

法资格,监管工作缺乏有效手段,只有检查权、建议权和报告权,但没有责令停产停业整顿和罚款等行政处罚权,加大了监管工作的难度与效力。

2.2 能力建设不足,核安全文化尚未深入人心

辐射监测实验室的条件和设备设施较为陈旧,辐射事故应急保障、应急处置和应急培训等仍需加强,事故应急中中子剂量当量率现场快速监测、核技术利用单位废液中³²P、³⁵S等监测技术方法与手段也有待完善。在促进行业规范管理上,对行业自觉落实辐射安全主体责任,完善辐射安全管理体制、规章制度和应急预案等方面要求不够严格,核安全文化宣贯成果有待加强巩固转化。

2.3 监管力量弱化,队伍建设不稳定

2021 年机构改革后,北京市市级辐射安全监管人员编制部分上收,加之机构缺乏有效的激励机制,人员晋升平台与空间有限,年轻人纷纷加入“考公”“跳槽”热潮,造成人才流失,导致监管队伍存在断层断档的不稳定现象。各区监管人员多处于兼职状态,工作不具备连续性,不利于工作经验的积累,人员专业性有待加强。

3 对策与建议

新形势下,如何更好地发挥现有的监管力量与运行机制,顺势而为,不断推进辐射安全监管工作提质增效,需要我们把握好以下几方面工作。

3.1 把握好“位”与“为”的辩证关系

对于集体来说,“位”是指目标定位,“为”是指沿着目标定位谋划工作思路、工作路径和履行职能;对于个体而言,“为”是指在工作上做出贡献和有所作为,“位”则是指获得相应的职权和地位。个体要服从集体的“位”与“为”,正确认识个人“为”与“位”的辩证统一的关系,即要有“位”,首先必须有“为”;有“位”时,更需有“为”。

新形势下,面对新的风险和挑战,无论是辐射安全监管部门,还是具体监管人员,必须提高认识、更新观念,深刻认识辐射安全工作的风险点,正确把握“位”与“为”的辩证关系,找准定位

并把握辐射安全监管工作的重点和方向,以“时时放心不下”的责任感,切实把核与辐射安全监管责任记在心里、扛在肩上,同时担当作为、防范风险,真正把总体国家安全观落到实处。

3.2 在总体国家安全观视域下找准定位

(1)工作站位上,要站在总体国家安全观的高度,心怀“国之大者”,坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想、习近平生态文明思想为指导,牢固树立总体国家安全观,坚持底线思维,坚持高标准,以确保核与辐射安全为重点,加强组织领导,补短板促提升。

(2)工作路径上,要坚持目标引领、问题导向,以解决问题为出发点、以做精技术为着力点、以做强支撑为根本点、以做实业务为立足点、以做深研究为创新点、以服务管理为落脚点,不断提升工作的服务性、创新性、先进性和前瞻性,开创监管工作新局面。

(3)工作目标上,一是在辐射监测技术上,要秉承“严谨细实快”“数据真准全”的工作作风,对辐射安全做到说得清、说得准、说得明;二是在辐射安全监督管理上,要坚持依法严格管理、安全第一;三是在辐射事故应急保障上,要做到“召之即来、来之能战、战之能胜”。

3.3 在维护国家安全中担当作为

(1)强化使命担当。新时代要有新作为。一要站在总体国家安全观的高度,深刻认识核与辐射安全监管工作的重要性,勇于担当并主动作为,在监管中向前一步、主动对接、专人跟进,做好辐射类项目审批跟踪服务。二要让监管力度与温度并存,在监管过程中,根据监管对象不同给出对应的辐射安全管理建议,让辐射安全监管既有力度又有温度,携手管理对象合法合规开展生产。三要科学规范监管,要努力把监管工作模式从经验式监管向标准化、规范化监管转变,按行业类型规范现场检查程序,不断提升监管效能,用现代化、高质量的监管水平推进北京市核技术利用事业高质量发展。

(2)严格辐射安全监管。要着眼新形势、新要求,主动谋划,攻坚克难。一要坚持预防为主,防微杜渐。在源头上,要严格辐射安全许可

管理,筑牢安全防线;在日常,要加大对企业的监督检查力度,尤其是重点敏感时期,加强辐射安全隐患排查。二要坚持从严监管、依法监管。不断强化对辐射安全生产违法违规行为的惩处,特别是加大对未批先建、无辐射安全许可违规经营等违法违规行为的处罚,形成有效震慑,督促企业落实主体责任。三要坚持问题导向,精准监管。针对不同类型的设施、不同生产特点的单位 and 不同阶段的工作性质等实施不同的监管策略,切实提升监管效能。

(3)推进核安全文化建设。核安全文化要深入人心,需要政府主导、企业作为和公众参与。近年来公众对辐射安全的关切日增,涉核舆情不断涌现,核安全文化建设任重道远。一要压实企业主体责任,将“严”字贯穿建设项目全链条,督促企业积极作为,加强辐射安全生产工作,积极回应公众关切。二要做好科普宣传,可结合多媒体,深入社区、学校及公众活动场所,积极宣传辐射安全与防护等科普知识,正确引导社会广泛参与,增进全社会对辐射安全的了解和认识,营造人人有责、人人参与和全社会共同维护辐射安全的良好氛围。

3.4 在提升服务本领上努力拓为

(1)加强常规能力建设。坚持固本强基、提升能力。一要在业务发展和自身建设上,有新的更高标准、更高要求和更具体的举措,不断完善核技术利用单位核素流出物监测技术方法,规范医疗、科研教学单位放射性废物最优化监管等技术依据,完善不同类型建设项目审评方法。二要提升硬件建设,着力加强辐射环境监测和预警监测设备配置,加快完成实验室环境改造。三要全力围绕以建设全国一流、国际领先队伍为目标,不断做实业务、做精技术、做深研究、做强支撑,把队伍从辐射安全领域的“耳目”“哨兵”,打造成更高水平的“顶梁柱”“生命线”。

(2)提升辐射事故应急能力。干着眼前的事,要想着未来的事。北京的重大活动和重要会议多,辐射安全保障是其中的重要工作。一要强化应急队伍建设,有针对性地加强应急培训和应急演练,特别是针对北京辐射安全风险特征,

采取无脚本事件演练、桌面推演、多部门联合及京津冀区域联合等方式加强演练,努力发挥在辐射事故应急领域的牵头作用。二要提升应急监测手段,完善应急监测、应急响应与应急防护装备,提升机器人搭载快速监测设备及采样设备在事故场景中的应用能力。三要认真总结宝贵实践经验,采用座谈交流、定期多部门会商等形式开展经验反馈,不断提升应急工作的针对性、有效性及应急处置的能力与水平。

(3)加大人才培养力度。人才是工作开展的基石。“没有金刚钻,不揽瓷器活”,核与辐射安全监管工作专业性强,不仅需要专业的业务能力,还需要长时间积累形成的工作经验。要针对人才状况及工作需要,探索人员轮岗、专项培养、岗位练兵比武、名师带徒以及市区两级联合检查等多途径、多层次的培养方式,为人才展示搭建平台,建好人才蓄水池,备足发展原动力,提高工作人员职业荣誉感,朝着“专、精、特、深”的人才方向不断进步,培养具有专业技术权威的辐射安全监管领军人才。

4 结论

总之,随着经济社会的发展和科技的不断进步,核技术的研究将更加深入,核技术的应用领域也将愈加广泛,辐射安全监管工作任重道远。

在总体国家安全观视域下,坚持底线思维,加强辐射安全监管工作,是更好地统筹发展核安全、建设更高水平的平安中国的题中应有之义,是适应时代发展趋势、应对安全挑战的必然选择。在做好辐射安全监管工作中,我们既要立足于现在,又要着眼于未来,以在“位”必有“为”的责任感,进一步担当作为,全面履行好辐射安全监管职责。

参考文献

- [1] 佚名. 全面推进美丽中国建设, 加快推进人与自然和谐共生的现代化 [N]. 人民日报, 2023-7-22 (001).
- [2] 蒋云, 陈东兵, 宋福祥. 北京市辐射安全监管实践与思考 [J]. 核安全, 2010 (01): 38.

The “Position” and “Action” of the Radiation Safety Supervision from the Perspective of the Overall National Security Concept

Liang Yunping

(Beijing Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100089, China)

Abstract: This paper analyzes the current situation of radiation safety in Beijing and the existing problems and deficiencies in radiation safety supervision from the perspective of the overall national security concept. It is put forward that in the work of maintaining national security, we should find the right target and position, grasp the focus and direction of the work of radiation safety supervision, clarify the work path, and have a sense of responsibility for “action” in “position”, we should further perform our duties of radiation safety supervision, guard against risks and put the overall national security concept into practice.

Key words: general; national security; perspective; radiation safety; regulation

(责任编辑: 许龙飞)

林武辉,杜金秋,拓飞,等.基于海洋放射性核素时空演化体系的海洋核安全评估技术[J].核安全,2024,23(3):37-44.

Lin Wuhui, Du Jinqiu, Tuo Fei, et al. Assessment for Marine Nuclear Safety based on Spatiotemporal Evolving Systems of Marine Radioactivity [J].

Nuclear Safety, 2024, 23(3): 37-44.

基于海洋放射性核素时空演化体系的海洋核安全评估技术

林武辉^{1,5*}, 杜金秋², 拓飞³, 曹少飞⁴, 张翊邦⁵, 祁第¹, 陈立奇¹, 余克服⁵

(1. 集美大学港口与海岸工程学院 极地与海洋研究院, 厦门 361021; 2. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023; 3. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088; 4. 中国辐射防护研究院, 太原 030006; 5. 广西大学海洋学院, 南宁 530004)

摘要: 本文指出全面构建海洋中放射性核素本底基线的时空演化体系是海洋核安全评估的基石, 提出本底基线法、活度限值法和剂量限值法三种海洋核安全评估技术, 并应用于福岛核事故后污染最严重的核心海区——港口区, 定量剖析港口区的海洋核污染历史与现状, 有利于评估过去 12 年以来日本福岛核电站修复进程中相关修复措施的有效性。之后, 本文在利用海洋数字孪生技术的基础上, 针对上述三种海洋核安全评估技术对应提出从寻找人类核活动历史的可靠“档案馆”、健全海洋放射性核素的基准/标准限值和探索长期低剂量生物辐射效应与风险三个角度展望未来海洋核安全评估技术需求与发展方向, 以期为国内外新形势下我国海洋核安全评估与管理提供一定借鉴。

关键词: 海洋环境; 核安全; 放射性核素; 福岛核事故; 国家安全; 数字孪生

中图分类号: TL71 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0037-08

核安全是核能发展与核技术利用的生命线。自 1984 年成立国家核安全局以来, 我国已经形成法律、条例、部门规章、标准、导则等不同层次的核安全制度体系^[1], 以保护人类和环境免受电离辐射危害。核安全和深海安全是总体国家安全观的有机组成, 党的二十大报告中也明确指出“强化……核、太空、海洋等安全保障体系建设”。在建设海洋强国战略背景下, 海洋核安全也应该是国家安全保障体系的重要环节。

1 新形势下的海洋核安全需求

海洋占地球表面面积约 71%, 占地球总水量的约 97%, 是地球气候的重要调节器, 也为人类生存和发展提供了重要的资源和生态服务功能^[2]。然而, 20 世纪人类大气核试验产生 69% 的人工放射性核素 ¹³⁷Cs (780 PBq) 直接沉降进入海洋^[3], 部分沉降进入陆地环境中的人工放射性核素通过河流仍在持续不断输入海洋^[4,5]; 福岛核事故泄漏的放射性核素总量的 80% 最终进入太平洋^[6]; 过去 60 多年来, 英国和法国的

收稿日期: 2023-11-18 修回日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目, 项目编号: 42276044; 广西自然科学基金, 项目编号: 2024GXNSFAA010449; 崂山实验室科技创新项目, 项目编号: LSKJ202202904

作者简介: 林武辉 (1987—), 男, 教授, 博士, 主要研究海洋过程的同位素示踪、海洋放射性观测与核安全评估

* 通讯作者: 林武辉, E-mail: linwuhui8@163.com

乏燃料后处理厂也一直向北大西洋和北冰洋排放 ^{137}Cs 、 ^{129}I 、 ^{236}U 等人工放射性核素^[7-13]。

日本在2023年8月24日已经启动福岛核污水排海计划,预计持续30年^[14,15]。海洋数值模拟显示,福岛核污水将通过海洋环流逐步迁移扩散至全球海域,未来也将进入我国海域^[16,17]。此外,在复杂的国际形势下,我国周边海域美英等国日益频繁的核动力航母和核潜艇活动也有可能增加海洋核污染风险。

2023年修订通过的《中华人民共和国海洋环境保护法》中首次新增“加强海洋辐射环境监测”。因此,海洋核安全具有重要的研究意义和强烈的社会需求。

2 全面构建海洋中放射性核素本底基线的时空演化体系

天然放射性核素(如宇生放射性核素 ^{14}C 、原生放射性核素 ^{238}U 等)通过河流、大气沉降和地下水等自然过程,持续不断地进入海洋;核电站、乏燃料后处理厂、核医学等活动以及日本福岛核事故所产生的人工放射性核素也持续排入海洋^[18]。当今海洋存在几十种天然和人工放射性核素,不同核素活度水平从 10^4Bq/m^3 到 10^{-5}Bq/m^3 ^[19],相差9个数量级。

海洋中同一种放射性核素也存在一定的时空分布特征。比如,自20世纪60年代美苏停止大气核试验以来,我国海水中人工放射性核素 ^{90}Sr 随着时间总体呈现指数下降趋势^[4]。空间上海洋中人工放射性核素存在“双峰型”纬向分布特征,即南北半球 $40^\circ-60^\circ$ 的纬度带存在全球落下灰(Global fallout)活度高值^[20]。由于切尔诺贝利核事故和英法乏燃料后处理厂运行的影响,北欧海域中 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{129}I 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 等人工放射性核素均显著高于其他海域^[21-23]。海水中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的活度随深度增加,总体活度呈现下降趋势,而海水中 $^{239+240}\text{Pu}$ 却经常出现次表层峰值现象^[24]。

精准甄别海洋中人为新增放射性核素的种类与含量不仅是异常辐射信号判别与不同人类核活动溯源技术的前提,也是海洋核安全评估

的核心。过去十多年来,作者和团队已经围绕海洋中多种介质(如海水、沉积物、生物、悬浮颗粒物、大气等)的 ^{210}Po ^[25]、 ^{210}Pb ^[25]、 ^{234}Th ^[26]、 ^{238}U ^[27]、 ^{226}Ra ^[27]、 ^{228}Ra ^[28]、 ^{228}Th ^[28]、 ^{232}Th ^[27]、 ^{40}K ^[27]、 ^{90}Sr ^[4]、 ^{137}Cs ^[29]、 $^{239,240}\text{Pu}$ ^[29]、 ^{14}C ^[29]、 ^3H ^[15]等十多种天然和人工放射性核素,从放射性核素的源汇过程及其物理—海洋生物地球化学调控机制的角度长期开展海洋与核技术的多学科交叉研究,初步构建海洋放射性核素本底基线的时空演化体系。

针对海洋中放射性核素的时空演化历史数据,国际上IAEA与日本筑波大学已经建立Marine Radioactivity Information System (MARIS)^[30,31]与Historical Artificial Radionuclides in the Marine Environment (HAM-Global 2021)^[32-34]两个数据库。然而,MARIS和HAM数据库中关于我国辽阔海域放射性核素的历史资料数据却极度缺乏。

我国海洋放射性核素监测工作始于20世纪60年代的大规模大气核爆。在20世纪60~90年代期间,卫生部门李树庆、中国科学院海洋研究所李培泉和原国家海洋局第三海洋研究所蔡福龙等人开展了海洋中放射性核素研究^[35-37];唐森铭和商照荣重点对20世纪中后期我国海域放射性调查进行总结^[38]。

我国历次海洋污染基线调查积累了部分海洋放射性监测数据。滨海核电站建设和运行过程中也持续开展海洋放射性监测。虽然我国生态环境部门、自然资源部门、卫生系统、中国科学院与高校系统、地方政府部门和核电公司等不同机构基于业务管理和科研的需求已经积累了一些海洋放射性监测的历史数据,但数据零散分布于多个不同管辖部门,不仅缺乏统一的全国性海洋放射性核素监测数据库,而且缺乏基于时空演化视角的系统分析,不利于数据挖掘、解译、利用和管理。

总之,全面构建海洋放射性核素本底基线的时空演化体系是海洋核安全评估的基石。中国近海放射性核素本底基线的时空演化体系构建将有助于科学评价我国滨海核电和其他滨海

核设施的影响^[4]。开阔大洋放射性核素本底基线的时空演化体系构建可以用于评价其他国家人类核活动(如核电站事故、核试验、核材料的海洋倾倒、核潜艇与核动力航母活动等)的影响,并对我国海域的潜在影响进行预报与预警评估,也是我国维护国家安全和人民生命健康、深度参与全球海洋治理、构建海洋命运共同体的重要体现。因此,全面构建海洋中放射性核素本底基线的时空演化体系对于海洋核安全具有重要意义。

3 海洋核安全评估技术

活度与剂量是定量表征放射性核素的独特物理量,不同于元素和同位素的常见表征方式。在海洋核安全评估中,活度浓度和剂量率是重要的定量参数,对应常见单位为 Bq/m³(或者 Bq/kg)和 Gy/h(或者 Sv/h)。为此,本文总结提出本底基线法、活度限值法和剂量限值法开展海洋核安全评估。

3.1 本底基线法

自 20 世纪中叶以来,人类在核能发展与核技术利用的进程中已经产生大量的人工放射性核素^[20]。其释放进入地球环境中的长半衰期人工放射性核素(如 ^{239,240}Pu、¹³⁷Cs 等)甚至被视为定义“人类世”(继全新世后,人类活动作为重要地质营力所主导的地质新时代)的重要代用指标^[20,29]。全面构建海洋中放射性核素本底的时空演化体系,准确掌握海洋中人工放射性核素的历史本底基线水平,是进一步精准甄别人为新增放射性核素和开展海洋核安全评估的前提。

短半衰期的人工放射性核素(如 ¹³¹I、¹³⁴Cs、¹⁰⁶Ru、^{110m}Ag 等)通常不存在于天然环境本底之中,其定性或者定量的异常检出可以直接指示短期内人为新增的海洋核污染源(如核事故、核潜艇活动等)。中长半衰期的人工放射性核素(如 ⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、^{239,240}Pu、¹²⁹I 等)则需要考虑人类核活动的历史排放而残留的本底基线的时空演化特征后,借鉴人为新增信号和本底噪声处理技术,开展人为新增海洋核污染源的定量甄别。

此外,核素活度比值(如 ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs、⁹⁰Sr/¹³⁷Cs 等)和原子比值(如 ¹²⁹I/¹²⁷I、²⁴⁰Pu/²³⁹Pu 等)也常作为核素特征指纹,指示判别不同人类核活动源项。

3.2 活度限值法

不同放射性核素存在不同程度的放射毒性,比如极毒组的 ²³⁹Pu、高毒组的 ⁹⁰Sr、中毒组的 ¹³⁷Cs、低毒组的 ³H 等。在海洋核安全评估过程中,法律法规和标准规程等对海洋中不同毒性的放射性核素活度限值做出一些规定^[39,40]。比如,福岛核事故后日本政府规定海产品中 ¹³⁴⁺¹³⁷Cs 的活度限值为 100 Bq/kg^[12]。

我国的海水水质标准(GB3097—1997)和食品中放射性物质限制浓度标准(GB14882—94)分别规定了海水和海产品中部分放射性核素的活度限值。我国海洋沉积物尚没有相应放射性核素标准限值规定。鉴于部分地区经常采用海砂作为建筑材料,我们可以参考建筑材料放射性核素限量(GB6566—2010)的部分放射性核素的活度限值标准,评估海洋沉积物中的放射性核素。值得注意的是,国际上不同组织机构(国际原子能机构、世界卫生组织、国际粮农组织)和地区(中国、欧盟、美国、日本等)基于科学认识、国情现状和社会发展需求等综合因素,对相同介质中的同种放射性核素活度限值的规定经常存在一定差异^[19,40]。

3.3 剂量限值法

处于不稳定状态的放射性核素发生衰变并发射不同能量的 α 、 β 、 γ 粒子。活度可以衡量单位时间内放射性核素发射的粒子数,剂量则更精细刻画不同类型的粒子所产生的能量沉积和危害。比如,我国的电离辐射防护与辐射源安全基本标准(GB18871—2002)中规定公众的年有效剂量为 1 mSv。针对海洋生物,欧盟开发的 ERICA 软件推荐 10 μ Gy/h 的剂量率限值作为筛选阈值(screening level)^[41]。IAEA、ICRP、美国和加拿大等也推荐不同的剂量率限值(40~400 μ Gy/h)用以评估放射性核素对海洋生物的影响^[42]。截至目前,我国法规标准尚未涉及放射性核素对海洋生物的剂量限值

规定。

4 日本福岛核电站港口区的海洋核安全评估

日本福岛核事故已经泄漏大量人工放射性核素进入海洋^[6],福岛核污染水也已经启动排入太平洋^[14]。这些放射性核素可能通过海洋水文动力驱动下的“随波逐流”和海洋生物洄游驱动下的“搭乘便车”等过程进入我国海域^[12]。作为福岛核污水排海的利益攸关方,我国公众和政府始终高度关注由此引发的海洋核安全问题。

距离福岛第一核电站最近的港口区(图1a,1 km范围内)是日本福岛核事故后污染最严重的海域。港口区属于日本领海,其他国家无法进行采样而获取相关数据。港口区的海洋核污染历史与现状不仅是世界了解福岛核事故后海洋核污染的重要窗口,而且直接反映日本福岛核电站修复进程与修复措施的有效性。

本文聚焦福岛核事故后污染最严重的海区——港口区,系统汇总IAEA的MARIS数据库、日本东电公司(TEPCO)、日本经济产业省(METI)和日本原子能规制委员会(NRA)等多方的大量数据,全面构建福岛核事故前后海水中¹³⁷Cs的历史活度曲线(图1b),利用本底基线法、活度限值法和剂量限值法,联合开展海洋核安全评估。

本底基线法显示,福岛核事故后日本福岛附近海域的海水¹³⁷Cs活度从 1.3 Bq/m^3 骤升至 $1.9 \times 10^{12} \text{ Bq/m}^3$ (图1b中红色箭头)。截至2023年9月的最新数据,港口区海水中¹³⁷Cs活度为 $5.1 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$,仍然比2011~2015年期间我国海域的海水中¹³⁷Cs平均活度(1.05 Bq/m^3)高3个数量级。值得警惕的是,2016年以来福岛港口区海水中¹³⁷Cs活度并没有显著下降趋势,甚至出现多次周期性异常升高事件。

活度限值法显示,2016—2023年期间港口区海水中¹³⁷Cs平均活度(6943 Bq/m^3)高于我国海水水质标准(GB3097—1997)中海水¹³⁷Cs活度限

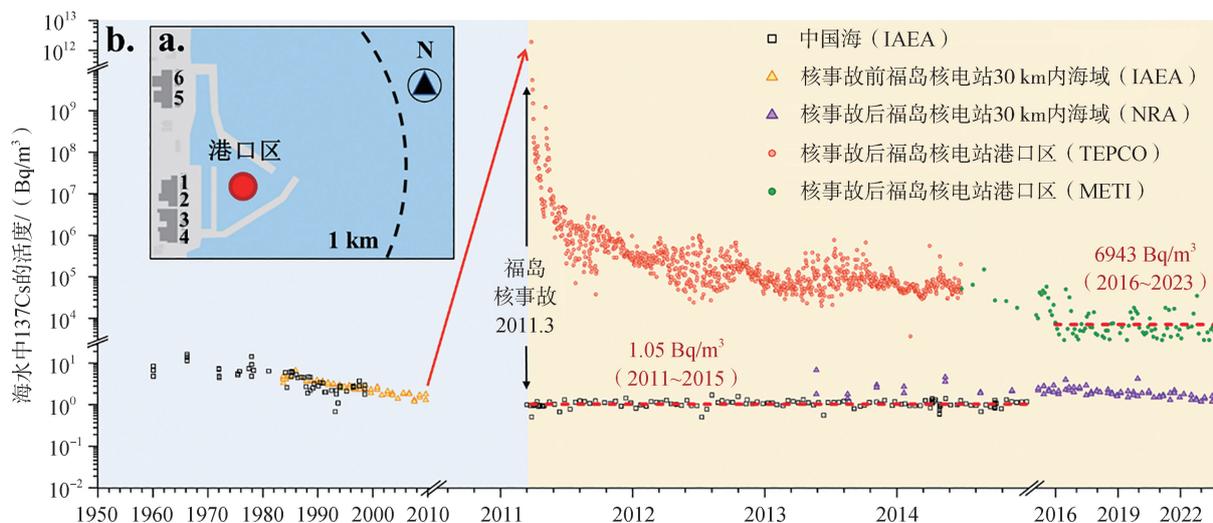


图1 中国海、日本福岛近海、福岛第一核电站港口区等海区的海水¹³⁷Cs活度历史曲线
中国海和日本福岛核事故前的福岛近海数据来自MARIS数据库^[44],核事故后的福岛近海数据来自NRA^[45],核事故后的港口区数据来自TEPCO和METI^[46,47]

Fig.1 Historical ¹³⁷Cs activity in seawater from the China seas, Fukushima offshore, and the port area nearby the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

The data of the China seas and the Fukushima offshore before the Fukushima Nuclear Accident (FNA) was obtained from the MARIS database^[44], the data of the Fukushima offshore after the FNA was provided by the NRA^[45], and the data of the port area after the FNA was derived from TEPCO and METI^[46,47]

值(700 Bq/m^3)。日本监测数据显示港口区的海洋鱼类通过生物富集吸收海水中高浓度的 ^{137}Cs , 进一步导致部分鱼类体内 ^{137}Cs ($1.8 \times 10^4 \text{ Bq/kg}$)显著超过日本规定的限值标准(100 Bq/kg)^[43]。

本文基于港口区的海水中 ^{137}Cs 活度数据, 利用欧盟开发的ERICA软件开展海洋鱼类的辐射剂量评估。福岛核事故后海水中 ^{137}Cs 峰值活度($1.9 \times 10^{12} \text{ Bq/m}^3$)可以导致游泳鱼类和底栖鱼类的辐射剂量率为 $2.9 \times 10^7 \mu\text{Gy/h}$ 和 $3.1 \times 10^9 \mu\text{Gy/h}$, 均大大超出欧盟推荐的剂量率筛选阈值($10 \mu\text{Gy/h}$)。2016—2023年期间港口区海水中 ^{137}Cs 平均活度(6943 Bq/m^3)对底栖鱼类产生的剂量率为 $11.2 \mu\text{Gy/h}$, 也高于欧盟推荐的剂量率筛选阈值($10 \mu\text{Gy/h}$)。因此, 三种海洋核安全评估技术获得的定量评估结果均显示, 港口区的海洋核污染仍然较为严重。

5 总结及展望

新形势下的海洋核安全需求极为迫切。本文指出全面构建海洋中放射性核素本底基线的时空演化体系是海洋核安全研究的基石, 提出本底基线法、活度限值法和剂量限值法的三种海洋核安全评估技术, 并应用于福岛核事故后污染最严重的核心海区——港口区, 定量剖析港口区的海洋核污染历史和现状。

然而, 面对海洋中核素种类众多、活度差异巨大、时空分布不均、迁移行为各异、生态影响复杂以及危害程度不一等现状难题, 海洋核安全的科学评估仍然存在较大挑战性。基于本底基线法、活度限值法和剂量限值法三种海洋核安全评估技术, 本文强调融合海洋数字孪生技术, 尝试从以下三个角度展望海洋核安全评估技术未来的发展方向(图2)。

寻找人类核活动历史的可靠“档案馆”。海洋放射性核素的基线存在复杂的时空演化特征。然而, 海洋放射性核素实际观测数据的时间和空间分辨率均十分欠缺, 特别是在我国广大海域。冰芯、树轮、黄土、沉积柱、珊瑚礁是记录不同时空尺度环境变化的天然档案馆。特

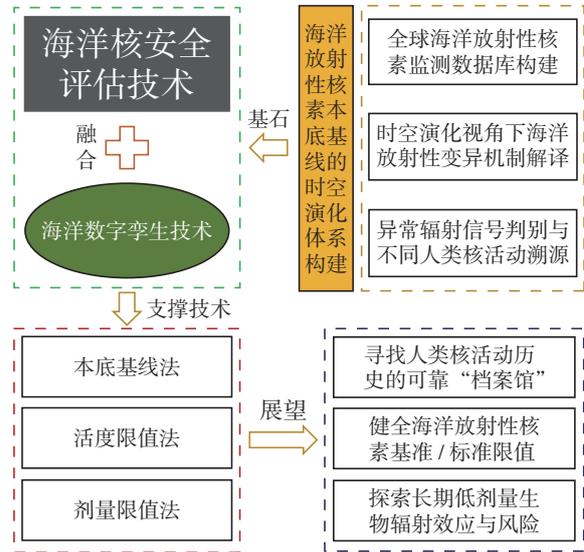


图2 海洋核安全评估的技术路线与展望

Fig.2 Technical route and prospect of marine nuclear safety assessment

别指出, 海洋中珊瑚礁具有年轮清晰、分辨率高、连续记录、固定生长等优点^[48], 是记录海洋放射性核素本底基线时空演化历史和追踪人类核活动历史的十分理想的档案馆^[29,49]。

健全海洋放射性核素基准 / 标准限值。活度限值是海洋核安全评估和管理的重要依据。出于人类健康的需求, 国际上更多关注饮用水和食品中放射性核素的活度限值^[40]。海洋为人类提供丰富的生物资源和重要的生态服务功能。出于海洋中非人类物种的保护与人类健康的综合需求, 未来我国需要加强海洋中非人类物种的放射性核素基准 / 标准限值研究和制定工作^[39]。

探索长期低剂量生物辐射效应与风险。国际上对于低剂量辐射效应和危害仍然存在争议^[50], 较为缺乏实验室内受控观测和流行病学现场调查等证据^[51], 直接影响人类和非人类物种的剂量限值规定和管理。此外, 海洋生物辐射剂量模型的构建和计算, 还涉及代表生物的筛选、海洋生物富集和海洋食物链 / 网的传递等过程。在巨大且复杂的海洋生态环境系统中, 这些过程又往往存在较大的物种差异性和海域特异性。因此, 在海洋核安全技术与管理需求背景下, 亟须开展适用于我国海域现状与发展

需求的长期低剂量海洋生物辐射效应与风险研究。

作为海洋大国,新时代中国明确提出加快建设海洋强国。海洋核安全是我国维护国家安全和人民生命健康、深度参与全球海洋治理以及构建海洋命运共同体的关键领域,亟须投入与应对海上核风险能力需求相匹配的研发力度,以保障新时期我国海洋核安全,进一步丰富和完善现代化核安全监管体系,践行全面推进美丽中国建设需求。

参考文献

- [1] 于大鹏, 梁晔, 徐晓娟, 等. 我国核与辐射安全现状研究与探讨[J]. 核安全, 2022, 21(04): 12-18.
- [2] Sverdrup K, Kudela R. Investigating oceanography, 4th edition [M]. New York: McGraw Hill, 2023.
- [3] Buesseler K O. Fukushima and ocean radioactivity [J]. Oceanography, 2014, 27(1): 92-105.
- [4] Lin W H, Mo M T, Yu K F, et al. Establishing historical ^{90}Sr activity in seawater of the China seas from 1963 to 2018 [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022 (176): 113476.
- [5] Smith J T, Wright S M, Cross M A, et al. Global analysis of the riverine transport of ^{90}Sr and ^{137}Cs [J]. Environmental science & technology, 2004, 38(3): 850-857.
- [6] Lin W H, Chen L Q, Yu W, et al. Radioactive source terms for the Fukushima nuclear accident [J]. Science China: Earth Sciences, 2016, 59(1): 214-222.
- [7] Casacuberta N, Smith J N. Nuclear reprocessing tracers illuminate flow features and connectivity between the arctic and subpolar north atlantic oceans [J]. Annual Review of Marine Science, 2022, 15(1): 203-221.
- [8] Song J M. Biogeochemical processes of biogenic elements in China marginal seas [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [9] 黄彦君, 沙向东, 祝兆文, 等. 压水堆核电厂流出物监测的关键核素研究 [J]. 核安全, 2020, 19(5): 27-34.
- [10] 王茂杰, 郝丽娜, 徐晋, 等. 核电厂流出物监督性监测实践 [J]. 核安全, 2021, 20(03): 12-16.
- [11] Machida M, Iwata A, Yamada S, et al. Estimation of temporal variation of tritium inventory discharged from the port of Fukushima dai-ichi nuclear powerplant: analysis of the temporal variation and comparison with released tritium inventories from Japan and world major nuclear facilities [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2023, 60(3): 258-276.
- [12] 林武辉, 余克服, 杜金秋, 等. 日本福岛核废水排海情景下海洋生态环境影响与应对 [J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4500-4509.
- [13] Wang F F, Men W, Yu T, et al. Intrusion of Fukushima-derived radiocesium into the East China Sea and the Northeast South China Sea in 2011-2015 [J]. Chemosphere, 2022: 133546.
- [14] Smith J, Marks N, Irwin T. The risks of radioactive wastewater release [J]. Science, 2023, 382(6666): 31-33.
- [15] 林武辉, 张翊邦, 余克服, 等. 2023年日本福岛核污水站在历史的十字路口 [J]. 环球财经, 2023, 267(2/3): 46-50.
- [16] Zhao C, Wang G, Zhang M, et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima daiichi nuclear plant [J]. Marine Pollution Bulletin, 2021(169): 112515.
- [17] Liu Y, Guo X-Q, Li S-W, et al. Discharge of treated Fukushima nuclear accident contaminated water: macroscopic and microscopic simulations [J]. National science review, 2022, 9(1): 209.
- [18] Hu Q-H, Weng J-Q, Wang J-S. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101(6): 426-437.
- [19] 林武辉, 陈立奇, 何建华, 等. 日本福岛核事故后的海洋放射性监测进展 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 269-276.
- [20] Waters C N, Syvitski J P M, Galuszka A, et al. Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the anthropocene epoch? [J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 2015, 71(3): 46-57.
- [21] Zaleska T, Suplińska M. Anthropogenic radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in the southern baltic sea ecosystem [J]. Oceanologia, 2013, 55(3): 485-517.
- [22] IAEA. Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS): Radionuclide levels in oceans and seas [M]. Vienna: IAEA, 2005.
- [23] He P, Aldahan A, Possnert G, et al. A summary of global ^{129}I in marine waters [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013(294): 537-541.
- [24] Wu J W, Sun J, Xiao X Y. An overview of current knowledge concerning the inventory and sources of plutonium in the China seas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020(150): 110599.
- [25] Lin W H, Ma H, Chen L Q, et al. Decay/ingrowth uncertainty correction of $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ in seawater [J]. Journal of

- Environmental Radioactivity, 2014 (137): 22–30.
- [26] Lin W H, Chen L Q, Zeng S, et al. Residual β activity of particulate ^{234}Th as a novel proxy for tracking sediment resuspension in the ocean [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 27069.
- [27] Lin W H, Feng Y, Yu K F, et al. Long-lived radionuclides in marine sediments from the Beibu Gulf, South China Sea: Spatial distribution, controlling factors, and proxy for transport pathway [J]. Marine Geology, 2020, 424: 106157.
- [28] Lin W H, Yu K F, Wang Y, et al. Assessing the feasibility of the $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$ dating method for young corals (<10 a) by gamma spectrometry [J]. Quaternary Geochronology, 2021, 61: 101125.
- [29] 林武辉, 张帆, 余克服, 等. 人工放射性核素在珊瑚岛礁系统中的富集与评估 [J]. 地球科学进展, 2023, 38 (3): 286–295.
- [30] Povinec P P, Aarkrog A, Buesseler K O, et al. ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239, 240}\text{Pu}$ concentration surface water time series in the Pacific and Indian Oceans—WOMARS results [J]. Journal of environmental radioactivity, 2005, 81 (1): 63–87.
- [31] Povinec P P, Hirose K, Honda T, et al. Spatial distribution of ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs and ($^{239, 240}\text{Pu}$) in surface waters of the Pacific and Indian Oceans—GLOMARD database [J]. Journal of environmental radioactivity, 2004, 76 (1): 113–137.
- [32] Aoyama M, Hirose K. Artificial radionuclides database in the Pacific Ocean: HAM database [J]. The Scientific World Journal, 2004, 4: 200–215.
- [33] Inomata Y, Aoyama M, Hirose K. Analysis of 50-y record of surface ^{137}Cs concentrations in the global ocean using the HAM—global database [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2009, 11 (1): 116–125.
- [34] Inomata Y, Aoyama M. Evaluating the transport of surface seawater from 1956 to 2021 using ^{137}Cs deposited in the global ocean as a chemical tracer [J]. Earth Syst. Sci. Data, 2023, 15 (5): 1969–2007.
- [35] 李培泉. 海洋放射性及其污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [36] 蔡福龙. 海洋放射生态学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [37] 李树庆, 祝汉民, 吴复寿, 等. 中国近海放射性水平 [M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
- [38] 唐森铭, 商照荣. 中国近海海域环境放射性水平调查 [J]. 核安全, 2005, 4 (02): 21–30.
- [39] 杜金秋, 王震, 林武辉, 等. 放射性核素水环境质量标准研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2018, 13 (5): 27–36.
- [40] Bradley F J, Pratt R M. Regulations. Poschl M, Nollet L M L. Radionuclide concentrations in food and the environment [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 377–410.
- [41] Brown J, Alfonso B, Avila R, et al. The ERICA tool [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99 (9): 1371–1383.
- [42] 林武辉, 陈立奇, 余雯, 等. 海洋生物辐射剂量评价方法及应用 [C]. 福建平潭: 福建省海洋学会 2014 年学术年会暨福建省科协第十四届学术年会, 2014: 326–334.
- [43] TEPCO. Analysis of seafood [EB/OL]. (2023–6–5) [2023–6–13]. https://www.tepco.co.jp/decommission/data/analysis/pdf_csv/2023/2q/fish01_230605-j.pdf.
- [44] IAEA. Marine radioactivity information system (MARIS) [EB/OL]. (2014–12–28) [2023–11–13]. <https://maris.iaea.org/explore>.
- [45] NRA. Readings of seawater monitoring in off-shore sea area [EB/OL]. (2023–11–7) [2023–11–13]. <https://radioactivity.nra.go.jp/en/list/292/list-1.html>.
- [46] TEPCO. Analysis of radioactive substances around Fukushima daiichi nuclear power plant [EB/OL]. (2014–7–31) [2023–11–13]. <https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl1/smp/indexold-j.html>.
- [47] METI. Progress status reports [EB/OL]. (2023–10–26) [2023–11–13]. https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/progress_status.html.
- [48] 余克服. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应 [J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42 (8): 1160–1172.
- [49] 林武辉, 何建华, 余克服, 等. 海洋中 ^{90}Sr : 日本周边海域与南海的对比 [J]. 海洋学报, 2020, 42 (10): 47–58.
- [50] Sutou S. Low-dose radiation effects [J]. Current Opinion in Toxicology, 2022, 30: 100329.
- [51] Lowe D, Roy L, Tabocchini M A, et al. Radiation dose rate effects: what is new and what is needed? [J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2022, 61 (4): 507–543.

Assessment for Marine Nuclear Safety based on Spatiotemporal Evolving Systems of Marine Radioactivity

Lin Wuhui^{1,5}, Du Jinqiu², Tuo Fei³, Cao Shaofei⁴, Zhang Yibang⁵, Qi Di¹, Chen Liqi¹, Yu Kefu⁵

(1. Polar and Marine Research Institute, College of Harbor and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China; 4. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 5. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this study, we emphasized that the comprehensive establishment of spatiotemporal evolving system of marine radioactivity was the cornerstone of marine nuclear safety assessment. The background baseline method, activity limit method, and dose limit method were proposed to quantify the historical and current situation of marine nuclear pollution in the port area nearby Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) to reflect progress of decommissioning and to evaluate effectiveness of countermeasures in FDNPP. Finally, three priority areas including searching reliable archive of historical human nuclear activities, facilitating baseline/standard limits of marine radioactivity, and exploring the effects and risks of long-term low radiation dose on marine biotas are proposed in combination with marine digital twin technology to provide insights for the future assessment and management of marine nuclear safety in China in the new situation at home and abroad.

Key words: marine environment; nuclear safety; radionuclide; Fukushima nuclear accident; national security; digital twin

(责任编辑: 许龙飞)

谢荣荣,李峰,朱杰,等.我国核电运行与退役产生放射性废物回顾与发展[J].核安全,2024,23(3):45-50.

Xie Rongrong, Li Feng, Zhu Jie, et al. Review of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants Operation and Decommissioning in China [J].

Nuclear Safety, 2024, 23(3): 45-50.

我国核电运行与退役产生放射性废物回顾与发展

谢荣荣, 李峰, 朱杰, 王洪祖

(国防科工局核技术支持中心, 北京 100071)

摘要: 本文在统计分析国内现有核电放射性废物数据的基础上, 结合国外情况, 分析估算了近远期我国核电运行和退役产生的放射性废物总量、放射性水平及废物类型等, 提出了核电放射性废物管理的相关建议, 为核电放射性废物管理提供参考。

关键词: 核电; 放射性废物; 核电退役

中图分类号: TL941 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0045-06

根据国际原子能机构(IAEA)报告^[1], 全球核电发展趋势总体向上。截至2022年底, 主要核电国家中美国核电装机容量95.5 GW、法国61.4 GW、中国55.8 GW, 我国正在建设及处于计划、提议阶段的核电装机容量达249 GW, 约占全球总量的50%。随着核电持续高速发展, 我国核电运行产生的放射性废物不断积累, 截至2022年底, 已产生暂存及处置的低水平放射性废物量已接近1.7万立方米, 预计到2050年, 各类放射性废物累积量约达到24万立方米。

根据经验, 核电退役产生的放射性废物约为40年运行废物的4倍, 大量放射性废物对处置场所的选择和处置场容量的要求来说是巨大的挑战。如何妥善管理核电运行与退役产生的大量放射性废物, 有效保障核电安全、经济地完成退役, 成为我国要长期面临并亟待解决的关键问题。

本文结合我国核电发展情况及放射性废物处置进展, 分析预测了核电运行和退役产生

放射性废物总量的变化趋势, 就核电放射性废物管理提出建议, 为核电放射性废物管理提供参考。

1 核电运行放射性废物

1.1 核电运行情况

根据IAEA公布的全球核电发展数据, 截至2022年12月底, 全球33个国家共有422台在运核电机组, 装机容量378 GW。主要国家装机与在建核电容量情况如图1所示。

2022年, 我国共有运行核电机组55台, 装机容量57 GW(额定装机容量)。我国(不含台湾地区核电信息)正在建设的核电反应堆共20座, 总装机容量为22.9 GW; 处于计划和规划阶段的装机容量226.1 GW; 预计到2030年装机容量将达到106 GW, 2050年将达到186 GW。

1.2 我国核电运行废物量现状与趋势

核电运行产生的放射性废物大部分为低放废物, 中放废物主要为过滤器芯、堆芯测量仪表组件、控制棒组件及其他堆芯相关组件等。其

收稿日期: 2023-10-12 修回日期: 2023-11-01

作者简介: 谢荣荣(1993—), 女, 硕士, 现主要从事退役治理相关工作

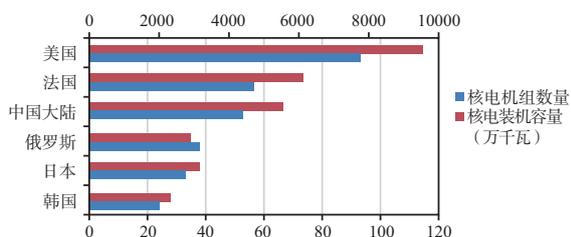


图1 主要国家核电装机容量情况
(数据源于IAEA,截至2022年底)

Fig.1 The installed capacity of nuclear power in major countries (data from IAEA, as of the end of 2022)

废物种类、数量与机组堆型、规模、放射性废物管理方法等因素密切相关。依据国外核电运行经验,正常运行阶段,年均产生放射性废物量为50~100立方米。由于各国核电站放射性废物管理水平不同,同样装机容量核电机组产生的放射性废物量也有一定差别。

根据我国核电放射性废物最小化要求,参考核安全导则中推荐的放射性废物产生量限

值^[2]与核电多年运行实践,在不考虑核电机组堆型等差异的基础上,单台百万千瓦级压水堆机组年均放射性废物产生量约50立方米(考虑废物减容、废液处理后体积)。

2022年,核电运行新产生放射性废物1255立方米,外运处置放射性废物2554立方米,暂存于核电厂的放射性废物14691立方米。目前,我国核电运行产生放射性废物大多数暂存于核电厂的放射性废物暂存库^[3]。

2020年至2025年,核电装机容量稳定增长,预计2025年核电放射性废物年产生量将达4000立方米以上,累积量约2.8万立方米。2025年以后我国核电废物产生量将持续保持增长的趋势,2030年我国核电产生的放射性废物累积量将达到约5.5万立方米。2050年在所有核电机组全部投入运行后,预计年产生废物量可达9000立方米以上,放射性废物累计量将超过24万立方米。详见表1。

表1 我国核电产生的放射性废物量测算

Table 1 Estimation of the amount of radioactive waste generated by nuclear power in China

类别	2022年	2023年	2024年	2025年	2030年	2050年
现有装机容量(万千瓦)	5581	6581	7581	8581	10581	18581
新增装机容量(万千瓦)	706	1000	1000	1000	2000	8000
放射性废物年产生量(m ³)	1255	3290	3791	4291	5291	9291
放射性废物总量(m ³)	17245	20535	24326	28617	55069	240879

注:* 随着核电运行技术、废物处理与整备技术的发展,年产生量会逐步降低,本文暂按50立方米/GW·a测算;

* 由于2025—2050年投运核电站数量具有一定不确定性,经2023—2025年高速发展期后(每年1000万千瓦以上),2025—2050年间按每年新增装机容量400万千瓦估算。

2 核电退役放射性废物

2.1 核电退役情况

截至2020年7月,全球共有189台民用核电机组永久关闭,完成退役的核电机组仅19台,其中,美国13台,德国5台,日本1台。目前在运的核电机组中^[4],有90余台机组役龄超过40年,超过一半机组役龄超过30年,全球在运核电机组运行情况如图2所示。

在不考虑延寿的情况下,预计未来15年到20年将迎来第一轮退役高潮,到2030年,全球预计将有200余台核电机组关闭^[5]。

按照设计寿期,预计2050年前后,我国将有7台机组面临退役或退役准备阶段,包括秦山核电站一号机组、大亚湾核电站、岭澳核电站一期、岭澳核电站二期。2021年9月,国家核安全局批准秦山核电站1号机组运行许可证获准延续,有效期至2041年7月30日。根据电站运行情况及技术进步,其他6台机组有可能会

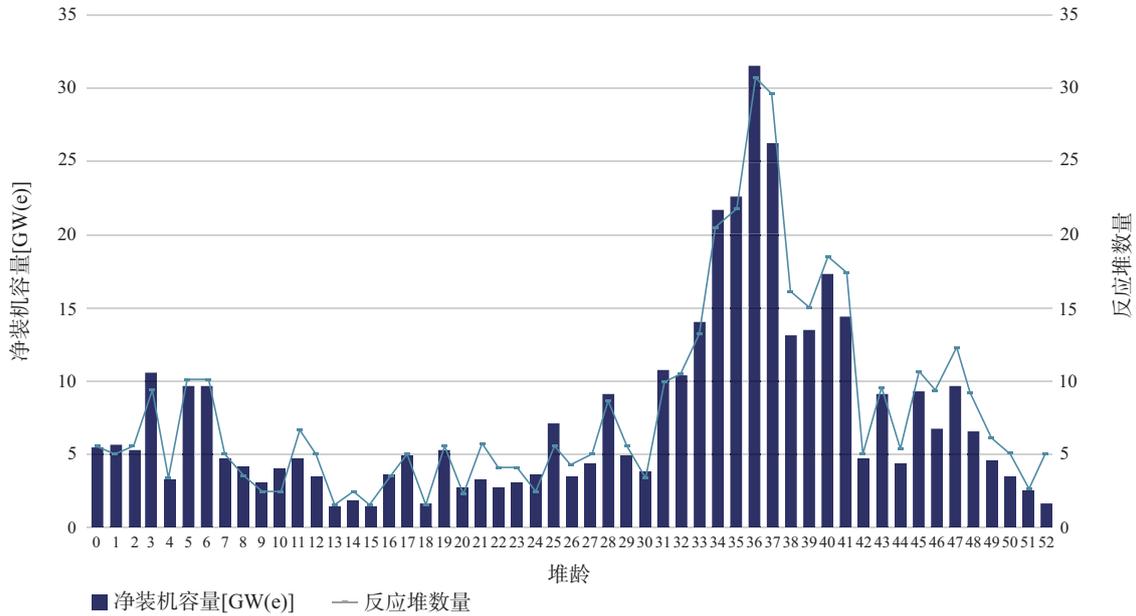


图2 全球在运核电机组运行情况分布
(数据源于IAEA,截至2020年底)

Fig.2 Age distribution of nuclear power plants in operation in the world (data from IAEA, as of the end of 2020)

提出延期申请,延寿后将陆续于2050年开展退役工作。

2.2 核电退役废物量趋势

将退役过程中产生的放射性废物进行分类,并根据废物所含放射性核素种类、活度浓度、物理特性等,以及后续整备、贮存、运输或处置的要求,选择安全、二次废物量少、经济的处理方式^[6]。由于核电站退役期间产生的废物量巨大,且大部分属于极低放废物和低放废物,如钢、铝以及混凝土等大量建筑材料^[7],更加需要基于废物最小化的理念,优化废物分拣、处理、整备技术,尽可能减少放射性废物总量,同时提高钢、铝以及混凝土等大量建筑材料的回收率^[8-9]。

退役产生的放射性废物种类和数量与核设施类型、规模、退役策略和技术路线等诸多因素相关。以德国 Biblis-A 核电站 120 万千瓦压水堆退役为例,所拆卸的各种废物/物料,包括主部件、系统部件、设备和建筑物物料等具体情况见表 2。

表2 德国 Biblis-A 核电站 120 万千瓦压水堆退役拆卸物料量

Table 2 Decommissioning and dismantling materials for the 1.2 million kilowatt pressurized water reactor in German Biblis-A nuclear power plant

		单位:t
	部件或设备	退役拆卸物料量
主部件	反应堆压力容器	594
	堆内部构件	164
	支撑和分隔物	212
	蒸汽发生器	1120
	循环冷却剂管道	128
	反应堆冷却剂管道	150
系统部件	稳压器	162
	容器和热交换器	955
	辅助设备	302
	管道	2071
	泵	75
	其他部件	360
设备	隔热材料	285
	通风系统、电缆、马达、电器设备等	852

		续表
部件或设备		退役拆卸物料量
工器具	钢件结构、架、台、吊车、升降机、紧固器、电缆架等	1177
屏蔽体	生物屏蔽体	1161
防护物	安全壳、衬覆层、闸门	2563
建筑物 (核部分)	混凝土和钢筋混凝土	143151
总计		15.5 万

从表 2 可知,混凝土和钢筋混凝土物料占退役废物 / 物料数量的绝大部分。

核电退役中绝大部分废物 / 物料经过分类、分拣、去污等处理,可实现再循环再利用或作为工业垃圾处理处置。根据国外核电退役实践经验^[10],具体放射性废物产生量见表 3。

表 3 反应堆退役产生低、中水平放射性固体废物量
Table 3 Low and medium level radioactive solid waste generated from reactor decommissioning

类型	美国	德国	瑞典
功率 /MW	1000 PWR	1200 PWR	900 PWR
退役废物量 /m ³	15200	6900	6700

每台核电机组在退役过程中产生的放射性废物量与其退役策略、法规标准、运行情况、退役技术和放射性废物管理水平等密切相关。因此,需要根据各国核电站退役具体情况,对核电退役产生放射性废物量进行计算和分析。

我国核电起步较晚,逐步从国外引进到自主化设计、建造,堆型以百万千瓦级压水堆核电机组为主。目前,我国尚无核电退役,缺少核电退役产生放射性废物量的具体数据。

根据美国 NRC 发布的 NUREG-1307 文件,分析结果大致归纳于表 4。

从表 4 可见,退役产生废物约为 40 年运行废物的 4 倍。以美国现行模式进行推算,百万千瓦机组退役时产生放射性废物总量约为 8000 立方米。可见,核电运行阶段年均放

射性废物产生量较小,大量放射性废物集中产生于核电退役阶段。核电延寿后,运行期废物量有所增加,但退役废物量变化较小。按照国外核电机组退役经验,核电机组退役前,先就地安全贮存 10 年,在 20 年内完成全部退役工作^[11]。

表 4 运行废物和退役废物对比
Table 4 Comparison table of operating and decommissioning waste

退役废物处置费 /40 年运行废物处置费	Richland 费率 Barnwell 费率	2.53 倍 4.15 倍
退役废物总容积 /40 年运行废物总容积		4.72 倍
退役废物总重量 /40 年运行废物总重量		3.57 倍
退役废物总放射性 /40 年运行废物总放射性		64.4 倍

由此推算,2050 年后,秦山核电站一号机组将进入实质性退役阶段,随后其他核电机组陆续开展退役。我国核电运行与退役产生的放射性废物量将大幅增加,到 2100 年,放射性废物总量预计将超过百万立方米,放射性废物的安全处置面临巨大挑战。

3 我国放射性废物处置现状与设计容量

目前,中国大陆已建成西北、飞凤山、北龙及龙和四座固体废物近地表处置场,均已投入运行。广东阳江低水平放射性废物处置场正在开展建设。广西防城港、辽宁徐大堡和山东海阳低水平放射性废物处置场已经核准。

表 5 我国放射性废物处置现状
Table 5 Current situation of radioactive waste disposal in China

序号	处置场	规划设计容量 / 立方米	已建成设计容量 / 立方米	已处置废物体积 / 立方米
1	西北低、中放固体废物处置场	200000	120000	30000
2	广东北龙低、中放固体废物处置场	80000	8800	暂存约 3000

续表

序号	处置场	规划设计容量 / 立方米	已建成设计容量 / 立方米	已处置废物体积 / 立方米
3	飞凤山低、中放固体废物处置场	180000	110000	40000
4	龙和近地表固体废物处置场	1000000	40000	680
合计		1460000	278800	70680

注:数据截至 2022 年底。

在已运行的处置场中,北龙处置场主要接收大亚湾核电、岭澳核电的放射性废物,由于该处置场未开展最终处置工作,目前仅作为临时贮存使用;西北和飞凤山处置场主要接收核工业遗留废物;龙和处置场计划接收全国范围没有或未建成区域处置场省份的低放废物。

广东阳江、广西防城港、辽宁徐大堡和山东海阳处置场计划接收本省内核电产生的放射性废物。已建成的极低放废物填埋场多由核设施退役单位管理运行,主要接收本单位的极低放废物。西北地区建设有金塔极低放废物填埋场,可接收全国极低放废物。

目前,核电运行产生的放射性废物主要在各核电厂内暂存。截至 2022 年底,西北处置场接收并处置了秦山核电站近 2000 立方米废物,广东北龙处置场已接收了约 3000 立方米废物。

根据核电发展规划及处置场建设情况,到 2050 年前,我国放射性废物处置场设计容量可基本满足核电运行阶段的放射性废物处置需求。2050 年后,核电机组陆续开展退役,需尽早评估核电运行与退役阶段产生放射性废物总量,持续采取废物最小化措施,提前规划、设计并建设放射性废物处置场,以满足放射性废物的处置需求,保障核电安全、经济地完成退役。

4 结论与建议

按照我国核电中长期发展规划的要求,在建的 3000 万千瓦核电机组陆续投入运行,将导致一段时间内放射性废物的产生量迅速增加,

预计至 2050 年将累积产生 24 万立方米以上的放射性固体废物。在核电退役过程中,将产生大量极低放废物和低放废物,其数量、活度浓度等会因退役策略、堆型、运行情况等具体情况有所不同。至 2100 年考虑退役及运行废物将达百万立方米以上。为更好地开展核电放射性废物管理工作,推动我国核能持续、安全发展,建议如下:

(1)完善处置相关法规、政策。开展放射性废物中放废物中等深度处置、跨地区处置、废物处置资金保障等政策制定,用以指导在“区域+集中”的原则下开展处置场建设及核电低中放废物处理与处置;开展建筑垃圾填埋场接受极低放废物技术、政策研究,并推动实施,指导极低放废物就近填埋处置。

(2)建立全国统一的放射性废物数据库。在机组运行过程中注重废物相关数据的收集、整理工作,并定期评估放射性废物总量,确保数据的准确性和时效性。

(3)加快建成中等深度处置库。开展中等深度处置库建设前期研究,统筹推进中等深度处置科研与工程项目,尽快建成并运行中等深度处置库。

(4)更好地落实“废物最小化”原则。加强废物处理处置技术研究,开展核电运行和退役产生的放射性废树脂、有机废液以及高水平放射性废物处理和处置等技术研究;开展再循环利用技术、政策研究,并推动实施。

(5)完善公众参与机制。妥善引导公众表达合理诉求,提高公众对放射性废物管理的科学认知,防止发生“邻避效应”。

参考文献

- [1] IAEA. 核电发展预测报告 [J]. 辐射防护通讯, 2022, 42(1): 4.
- [2] 安凯媛, 刘志辉, 鲍芳. 核设施退役放射性废物最小化 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2016.
- [3] 《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》第七次审议会议报告 [R]. 2020-9.
- [4] 李晨曦, 伍浩松. 世界核电厂运行实绩报告 [J]. 国外核新闻, 2021: 000-010.
- [5] 宋英明, 邹树梁, 周剑良, 等. 世界各国核电厂退役的现状、

- 经验做法及面临的困难和挑战 [J]. 核安全, 2015, 14(04): 36-41.
- [6] 李民权, 关玉蓉. 核电厂退役探讨——对我国核电厂退役的几点建议 [J]. 南华大学学报(社会科学版), 2011, 12(5): 1-4.
- [7] 李志华, 刘敏, 曹俊杰. 对我国运行核电厂退役准备的思考与建议 [J]. 核安全, 2020, 19(3): 6.
- [8] 岳维宏. 核设施运行及退役中的废物最小化技术 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45(3): 293-301.
- [9] 刘兆年, 谷海峰. 核电厂退役中低放废物量估算方法研究 [J]. 应用科技, 2017, 44(3): 4.
- [10] 《United States of America Seventh National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management》, 《乏燃料与放射性废物管理安全公约第七次美国国家报告》[R]. 2020-9.
- [11] Mcgrath R, Reid R. Waste Management for Decommissioning of Nuclear Power Plants: An EPRI Decommissioning Program Report- Waste Management for Decommissioning of Nuclear Power Plants. An EPRI Decommissioning Project Report. [R]. 2014.

Review of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants Operation and Decommissioning in China

Xie Rongrong, Li Feng, Zhu Jie, Wang Hongzu

(Nuclear Technology Support Centre of CAEA, Beijing 100071, China)

Abstract: In this paper, on the basis of statistical analysis of domestic data combined with the production of foreign nuclear power radioactive waste, estimates and analysis the total amount, radioactive level and waste type of radioactive waste generated during the operation and decommissioning of nuclear power in China, and puts forward relevant suggestions for the management of nuclear power radioactive waste, providing reference for the management of nuclear power radioactive waste.

Key words: nuclear power; radioactive waste management; nuclear power decommissioning

(责任编辑: 梁 晔)

刘坤,廖云华,顾东辉,等.核技术利用领域“互联网+监管”实践总结与探索[J].核安全,2024,23(3):51-54.

Liu Kun, Liao Yunhua, Gu Donghui, et al. Practice Summary and Exploration of “Internet + Supervision” in the Field of Nuclear Technology Utilization [J]. Nuclear Safety, 2024, 23 (3):51-54.

核技术利用领域“互联网+监管”实践总结与探索

刘坤*, 廖云华, 顾东辉, 余谦

(生态环境部华东核与辐射安全监督站, 上海 200233)

摘要: 新冠肺炎疫情防控期间, 华东监督站对华东地区五十余家核技术利用单位、21种核技术利用项目进行了远程视频监督检查, 1家核技术利用单位开展了远程执法笔录, 探索完善“互联网+监管”模式。远程视频检查具有不受时间限制、检查形式灵活等优势, 可以作为核与辐射安全监管现代化的一种有效手段。现阶段, 远程监督检查存在定位尚不清晰、硬件条件不充分、远程监督检查自主性受限等问题。本文建议在总结经验的基础上, 研究制定“互联网+监管”相关规章制度、程序, 规范“互联网+监管”; 利用现阶段条件开展部分“互联网+监管”监督检查; 在辐照装置使用单位开展信息化试点, 并适时推广。

关键词: 核技术利用; 互联网+监管; 远程视频检查

中图分类号: TL929 **文章标志码:** C **文章编号:** 1672-5360(2024)03-0051-04

为确保在常态化疫情防控中坚定不移推进生态环境保护工作, 华东核与辐射安全监督站按照《关于统筹做好疫情防控和经济社会发展生态环保工作的指导意见》(环综合〔2020〕13号)精神, 制定了《关于印送生态环境部华东核与辐射安全监督站新冠肺炎疫情期间监督执法正面清单的函》(环华东核函〔2020〕25号), 积极探索核技术利用项目“互联网+监管”^[1], 利用微信、腾讯会议、钉钉会议、核视通、WeLink等远程视频系统对华东地区五十余家核技术利用单位、21种核技术利用项目进行了远程视频监督检查, 对1家核技术利用单位进行了远程执法笔录, 同时充分利用国家核技术利用辐射安全管理系统开展放射性同位素及射线装置销售台账、单位信息核查等工作^[2], 将互联网这个“最大变量”变成推进核与辐射安全监管现代化

的“最大增量”。

1 远程检查开展情况

1.1 远程检查视频系统

在五十余家单位的检查中, 检查组分别用钉钉、腾讯会议、微信视频、WeLink视频会议等远程视频系统, 在无线网络、4G流量状态下对核技术利用单位进行了检查和执法笔录工作。检查组对比发现, 腾讯视频、微信视频可以随时连线, 更为适合飞行检查。

1.2 远程监督检查效果

(1) 管理制度、监测报告等纸质文件检查

与现场检查相比, 检查组能够提前收集被监管单位的管理制度、个人剂量监测、工作场所及周边辐射监测、仪表校验报告、辐射安全与防护设施的自查记录等电子文档数据, 开展更加

收稿日期: 2023-10-16 修回日期: 2023-12-04

作者简介: 刘坤(1986—), 男, 理学硕士, 从事核与辐射安全监管工作

* 通讯作者: 刘坤, E-mail: liu.kun@ero.mee.gov.cn

深入细致的检查。

(2) 辐射安全与防护设施检查

针对放射性同位素销售与射线装置销售单位;数字减影血管造影 X 射线装置;Ⅲ类非医用射线装置;放射性药物生产、销售、使用场所;甲级、乙级、丙级非密封放射性物质工作场所;自屏蔽式 γ 辐照器;城市放射性废物库;固定式Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ类源使用等核技术利用项目的辐射安全与防护设施,检查组可以采用远程视频,按照《三级执法程序》中的技术程序进行逐项检查。

《三级执法程序》中的技术程序的具体检查内容分为重点项与非重点项。 γ 辐照装置等 12 类存在全封闭屏蔽场所的核技术利用项目部分检查内容难以直接采用远程视频检查。检查程序中的重点项目和非重点项目难以开展远程检查的情况见表 1。

(3) 远程执法笔录

进行远程执法笔录时,检查组可以使用具备录像功能的远程视频会议系统。所有需要在笔录上签字的询问人员、记录人员、被询问人员、询问参加人员都需加入远程视频会议。出示执法证件等执法步骤与现场执法笔录过程相同。最后签字时,询问人员、记录人员、监管方参加人员电子签名后,发送至被检查单位,由被询问人员和被监管单位参加人员签字并按手印。一方面即刻扫描传回华东监督站,另一方面将按有被监管单位参加人员手印的执法笔录通过邮寄的方式寄回华东监督站,能够基本搜集到相关证据。

表 1 无法视频检查的项目数在总项目数中的占比情况
Table 1 Proportion of the number of items that cannot be inspected by video in the total number of items

单位类型	刻度用 γ/n 源场所	Ⅱ类非医用 X 射线装置	γ 射线 远距离治疗装置	加速器生产 调试场所
非重点项	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
重点项	7.14%	11.76%	14.29%	15.38%

续表

单位类型	医用治疗 X 射线机	加速器生产同位素场所	科研用 低能加速器	γ 辐照装置
非重点项	0.00%	16.67%	40.00%	42.86%
重点项	15.38%	15.79%	17.86%	19.44%

单位类型	电子辐照 加速器	质子重离子加速器治疗场所	医用电子直线加速器	非医用中高能加速器
非重点项	20.00%	0.00%	0.00%	27.27%
重点项	22.73%	26.09%	26.67%	35.48%

1.3 远程监督检查优势

(1) 使监督检查摆脱空间限制

一是监督员可以在本埠检查辖区内所有单位,既可以减少差旅费等行政经费成本,又可以减少检查路途中的时间成本。

二是可以更加便捷地邀请专家给予远程支持,邀请其他省、市生态环境监管部门一起参加监督检查,增进监督检查经验交流,共同提升监管水平。

三是可以组织同类型核技术利用单位观摩监督检查,开展经验反馈。

(2) 使监督检查可以摆脱时间限制

远程监督检查可以在任何时间直接视频连线值班长,即时查看中控室内的值班情况、重要安全联锁信号、日常自检查记录等情况,观察到核技术利用单位实时、真实的辐射安全管理状态。

(3) 监督检查形式更加灵活

远程检查可以选择在核技术利用单位进行月度、半年检查时,进行“旁观式”监督,减少检查对于核技术利用单位的“非计划停机”影响,减少核技术利用单位的迎检成本。

2 远程监督检查存在的问题

2.1 定位尚不清晰

一是法律法规、监督检查管理程序都未对

远程视频检查进行认可。根据环综合〔2020〕13号精神,远程监督检查等非现场监管方式是在疫情防控常态化下的特殊手段,仅适用于疫情防控期间。

二是远程监督检查、执法笔录取证时,双方通过签字—扫描—打印—签字的方式进行。双方都不持有监督检查意见、执法笔录现场签字原件。监督检查、执法笔录的法律效力存在隐患。

2.2 受网络、拍摄设备等硬件条件影响

一是受限于网络。核技术利用相关场所的网络信号是能否开展远程视频检查的先决条件。检查组难以对没有网络信号的屏蔽体内的相关安全与防护设施开展检查。

二是受限于视频拍摄设备。视频拍摄设备的分辨率、远近变焦距倍数、手持设备的防抖动功能等,都影响着视频画面的清晰度。

2.3 检查自主性受限

(1) 检查视角受限

远程视频检查需要监督员发布检查要求,被检查单位根据要求对相关安全与防护设施的测试过程进行拍摄。存在以下问题:

一是监督员仅能够观察到正在检查的安全与防护设施,无法对场所的安全状态进行全方位把握。

二是拍摄权掌握在被检查单位人员手中,无法避免选择性拍摄。

(2) 检查精细程度受限

在远程检查中,辐射安全和防护设施的测试由被检查单位的辐射工作人员进行。某些需要进行灵敏度测试的设施(如辐照装置里的碰撞报警等),测试强度、测试方式等完全由被检查单位掌握,测试结果存疑。

3 “互联网+监管”探索建议

3.1 研究建立“互联网+监管”相关规章制度、程序

本文建议通过法规、标准、管理程序等将“互联网+监管”检查明确为常态化监督检查的一种辅助方式;制定“互联网+监管”技术程序,

进一步规范“互联网+监管”的检查流程、检查内容、调查取证等,使“互联网+监管”成为合法、有效、可行的检查手段^[3]。

3.2 利用现阶段条件试行部分“互联网+监管”监督检查

(1) 可以替代不涉及现场检查单位的例行检查

对于医用 I 类源设备销售、安装、调试及维修单位、放射性同位素销售单位等没有固定辐射工作场所、不需要现场安全联锁测试检查的核技术利用单位,可以通过提前检查文件资料,召开视频会议等形式的远程检查替代现场检查。

(2) 开展飞行检查或日常巡视抽查

监督员有针对性地收集核技术利用单位值班表和微信等联系方式,利用远程视频可以随时开展飞行检查,例如对于 γ 辐照装置、I 类射线装置等 24 小时运行的单位,通过即时视频连线的方式可实现全天候的巡视抽查。

(3) 在相关单位开展信息化系统建设试点,并适时推广

在央企的辐照装置子公司开展信息化建设试点。央企核技术利用子公司,特别是伽玛辐照站,点多面广,分布在全国各地。按照“管行业必须管安全,管业务必须管安全,管生产经营必须管安全”的要求,央企有在各子公司建设信息化安全系统的需求。同时,随着各辐照装置使用单位的经营规模扩大,信息化系统也是提质增效的必然手段。本文建议,在系统建成后,可以开展部分远程检查替代现场检查,减少企业迎检成本;将信息化系统为建成单位所带来的管理效益作为示范,促进全行业推广,推动形成各级生态环境监管部门肯定、核技术利用行业主管部门支持、核技术利用单位点赞的信息化监管系统。

参考文献

- [1] 李干杰. 承前启后锐意进取努力实现核与辐射安全监管体系和监管能力现代化——在 2015 年度核与辐射安全监管年终工作总结会议上的讲话 [J]. 核安全, 2016, 15 (1): 1-10.

[2] 周林, 卞玉芳, 曹亚丽, 等. 国家核技术利用辐射安全管理
系统数据接口的功能与设计 [J]. 核安全, 2014, 45 (02):
11-13+15+10.

[3] 程芳, 窦义芳, 王玉超. 辐射环境政府信息服务体系的建构
研究 [J]. 核安全, 2020, 76 (05): 5-10.

Practice Summary and Exploration of “Internet + Supervision” in the Field of Nuclear Technology Utilization

Liu Kun*, Liao Yunhua, Gu Donghui, Yu Qian

(Eastern Regional Office of the Nuclear and Radiation Safety Inspection, MEE, Shanghai 200233, China)

Abstract: Remote video inspection on 21 nuclear technology utilization projects of more than 50 nuclear technology utilization units in East China and a remote law enforcement records have been conducted by Eastern Office of the National Nuclear Safety Administration to improve the “Internet + supervision” mode. Remote video inspection has the advantages of no time limit and flexible inspection form, which can be used as an effective means for the modernization of nuclear and radiation safety supervision. At present, there are some problems in remote supervision, such as unclear positioning, inadequate hardware conditions, and limited autonomy of remote supervision. It is suggested to formulate relevant procedures of “Internet + supervision” on the basis of summing up experience, standardize “Internet + supervision”, carry out some inspection of “Internet + supervision” under current conditions, carry out informatization pilot projects in irradiation device users.

Key words: nuclear technology utilization; internet + supervision; remote video inspection

(责任编辑: 许龙飞)

郭超,依岩,骆文,等. 基于知识图谱的核电厂安全审评辅助决策系统设计与工程小样实现[J]. 核安全,2024,23(3):55-62

Guo Chao, Yi Yan, Luo Wen, et al. Design and Engineering Sample Implementation of Nuclear Power Plant Safety Review Decision-Making Aided System based on Knowledge Graph [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 55-62.

基于知识图谱的核电厂安全审评辅助决策系统设计与工程小样实现

郭超¹, 依岩^{1,*}, 骆文², 梁侃慧², 李春¹

(1. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082; 2. 上海核星核电科技有限公司, 上海 201103)

摘要: 为了响应国家核安全监管体系和监管能力现代化的倡导, 进一步提升核电厂安全审评的质量和效率, 生态环境部核与辐射安全中心开展了核电厂安全审评优化技术研究。围绕核安全审评业务流程, 构建了整体优化业务架构和数据架构, 设计了核电厂安全审评辅助决策系统; 通过对核电厂严重事故审评专业性研究, 建立严重事故审评知识图谱并嵌入系统实现了工程小样开发。该系统可利用自然语言处理模型对审评相关报告进行解读, 并基于所嵌入知识图谱对相应领域审评相关报告进行辅助分析。研究成果可为核电厂安全审评工作的开展提供技术支持。

关键词: 核安全审评; 严重事故; 知识图谱; 辅助决策系统

中图分类号: TP 311 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0055-08

人工智能(AI)技术的发展已经在很多行业产生了十分积极的影响,在司法审判领域、医疗诊断领域、交通运输领域等均相继开发和应用了智能辅助系统^[1-6],助力了行业发展。近年来,国家核安全监管部门大力倡导核安全监管体系和监管能力现代化。国内核安全监管逐步建立了一系列信息化业务系统,如国家核技术利用辐射安全管理系统、核电厂经验反馈信息网络平台、进口民用核安全设备安全检验管理系统、核电厂安全重要物项修改审评系统等;在智能化建设方面也在开展基于用机器学习、知识图谱等技术的核安全审评初步探索和尝试,尚未形成典型应用。

核安全审评的重要任务之一是对核电厂安

全分析报告的审查^[7-9],在安全分析报告审查过程中,审评技术人员依据核安全相关法规标准及技术文件等,识别、判断和提出核电厂安全分析报告中关于对现有安全要求的符合性问题,形成审评问题单并交予被审评方响应。经过几十年的发展和经验积淀,包括核安全相关法规标准等在内的审评依据越来越明确,审评流程也逐渐成熟完善。相比于审评依据和审评流程在客观层面所体现出的明确要求,在参照其开展具体审评工作时,由于审评人员的个体差异、专业技术能力等方面的不同,会导致所提出的审评问题或意见等存在着主观性差异;另外,技术文件审查需要花费较长时间用于文件阅读和判断,审评工作的效率比较依赖于审评人员的

收稿日期: 2023-09-13 修回日期: 2023-11-13

作者简介: 郭超(1986—),男,高级工程师,硕士,从事核安全、反应堆安全研究

*通讯作者: 依岩, E-mail: yiyang@chinansc.cn

个人能力和经验,通常专家级的审评人员能更高效地从文件中识别安全问题。

鉴于核安全审评的业务特性,本文提出了一种基于知识图谱的核电厂安全审评辅助决策系统,通过对典型审评业务的专业特性研究,建立了典型业务的 AI 知识图谱;围绕核安全审评业务流程,构建了整体优化业务架构和数据架构,实现了对核安全审评的辅助支持,为现有核安全审评工作的优化提供了新技术手段。

1 系统设计

1.1 总体设计思路

从核安全审评业务开展的实际需求出发,具体通过在审评相关报告的阅读、关键术语或特定描述的认识,与法规标准、历史审评资料的匹配和对比等各个方面进行系统模型功能的开发,系统需要利用自然语言处理技术实现待审评报告的文本解析,并能基于知识图谱技术对具有审评内容相关性的核安全法规标准、历史审评相关报告和历史审评问题等的具体内容进行智能匹配和内容呈现,通过对历史审评经验进行充分挖掘和利用,实现对安全审评过程的辅助支持。

1.2 架构设计

本文设计开发的核电厂安全审评辅助决策系统总体技术架构如图 1 所示。

(1) 用户层:架构分别设计了管理员用户和普通用户,不同用户通过登录可以实现与用户类型相应的系统应用和相关数据库资源的使用。

(2) 应用系统层:应用系统层将实际应用分成了六个应用模块,应用系统层通过业务支持层相关整合机制的建立,实现应用系统层若干应用模块的有效整合。

(3) 业务支持层:业务支持层是整体架构设计的核心部分。通过相关面向服务的设计,为整体应用系统提供技术支持,基于知识图谱和智能模型搭建相关功能模块。

(4) 数据资源层:数据资源层是系统数据资源的保障。对于历史审评问题单、审评相关报告、法规标准/政策文件等非结构性资源,通过

基础平台进行有效的管理维护,可供用户有效地查询和使用。

(5) 基础平台层:基础平台层是搭建系统数据库和系统运维的基础。

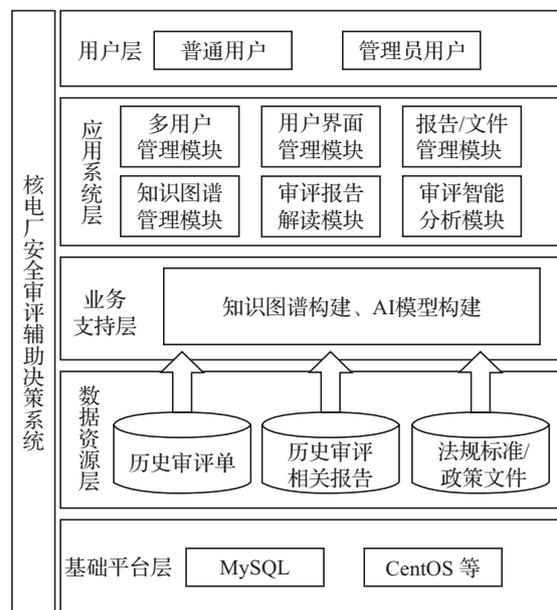


图 1 系统架构

Fig.1 System architecture diagram

1.3 系统功能

系统的功能设计围绕核电厂安全分析报告审评流程,主要包括以下几个子功能模块,如图 2 所示。

(1) 多用户管理、多任务管理模块,是各审评任务的调度和管理模块,是基于 Django 框架开发的 Web 服务器,也是整个系统数据流和指令流的管理调度中心;

(2) 用户界面管理模块,基于 html 和 JavaScript 的整个系统的人机界面;

(3) 报告/文件管理模块,管理审评相关报告、法规标准以及历史审评问题单等;

(4) 历史数据管理模块,使用基于 SQL 语言开发的关系型数据库,主要用于储存和管理用户相关历史数据;

(5) 知识图谱管理模块,使用 Neo4j 搭建系统 NoSQL 数据库,管理系统中审评相关的知识图谱;

(6) 审评报告解读模块,使用基于百度飞桨人工智能开放平台中的自然语言处理技术解读审评相关报告;

(7) 审评智能分析模块,综合知识图谱数据、使用基于百度飞桨人工智能开放平台中的自然语言处理技术解读审评相关报告。

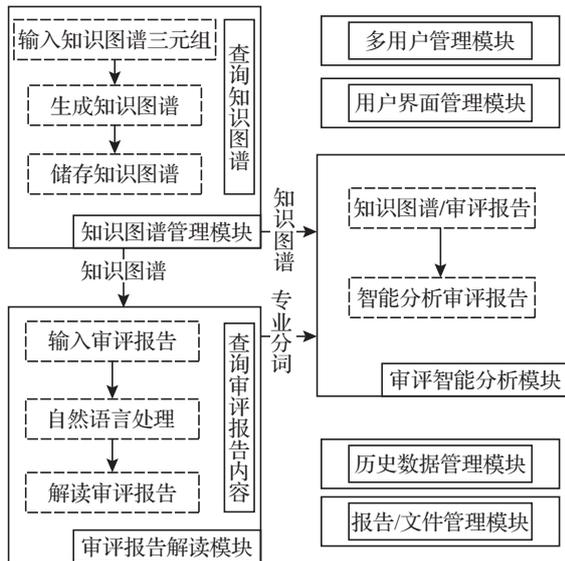


图2 系统功能框架

Fig.2 System function diagram

系统中多用户管理模块、历史数据管理模块、报告/文件管理模块、用户界面管理模块为相对独立的模块,各自完成独立的功能。而知识图谱管理模块、审评报告解读模块和审评智能分析模块则需要分工合作,一起完成智能辅助审评报告的功能。其中,知识图谱管理模块对核电厂安全审评相关的专业词条、法规标准、历史审评问题单和历史审评相关报告进行专业处理,形成专业领域的知识图谱,而审评报告解读模块则根据以上专业领域的知识图谱对审评相关报告内容进行分词,提取专业词条,最终审评智能分析模块综合知识图谱和提取的专业词条为审评工作提供相关辅助信息。

2 知识图谱构建

本文主要围绕核电厂严重事故^[10]这一核安全审评典型工作场景构建知识图谱。通过审评技术人员对核电厂严重事故的理解,对已有的

国内核电项目严重事故相关安全分析报告、严重事故相关的历史问题审评单、相关法规标准/政策文件等进行梳理与比较,人工提取不同的专业词条作为各类实体,分析出专业词条间的关联逻辑作为实体间的关系,产生大量的三元组,最终构建起要素完备、内容丰富的严重事故审评知识图谱。考虑到目前国内在运的核电机组大量采用二代加技术,也有众多在建项目采用三代核电技术^[11-12],机组的系统设计和相应的严重事故缓解措施并不完全相同,为了兼顾知识图谱的普适性,在抽取严重事故专业知识的过程中,研究人员对相关知识做了有机融合。

严重事故审评知识图谱的构建流程和层次结构如下:为保证知识图谱中严重事故要素的完备性,第一层参考典型核电厂安全分析报告严重事故篇章相关目录,把章节题目对应的关键要素作为实体,建立严重事故分析与其要素的关系。知识图谱的第二层则提取每个严重事故要素的重点知识作为实体,建立该技术要素与重点知识之间的关系,关系类型包括原则、方法、结论、说明、目标、步骤、假设、导则等,详见表1。

表1 严重事故审评知识图谱第一、二层架构

Table 1 First and second layer architecture of the knowledge graph for severe accident review

严重事故分析技术要素(第一层)	关系	重点知识(第二层)
严重事故序列选取	原则	严重事故序列选取原则
	方法	严重事故序列选取方法
	结论	严重事故序列清单
	说明	严重事故序列选取原则适用性
严重事故现象描述	说明	严重事故分类
	说明	堆芯熔化石类严重事故主要过程
	说明	严重事故主要现象及威胁
严重事故缓解措施	目标	严重事故缓解措施目标
	技术要素	严重事故缓解措施有效性分析
	导则	严重事故处理导则

续表

严重事故分析技术要素(第一层)	关系	重点知识(第二层)
严重事故下设备可用性分析	方法	严重事故下设备可用性分析方法
	步骤	严重事故下设备可用性分析步骤
	结论	严重事故下设备可用性分析结论
严重事故下可达性分析	说明	就地操作列表梳理
	说明	辐射防护分析
	说明	设备可操作性
	说明	可达性评价
严重事故下安全壳内环境条件	包含	严重事故下安全壳热工环境计算
	包含	严重事故下安全壳内辐照环境计算
严重事故管理导则	技术要素	SAMG 的编制
	技术要素	SAMG 的实施
	技术要素	SAMG 的更新
严重事故源项及放射性后果	包含	源项分析
	包含	辐射防护设计
严重事故预防措施	目的	预防策略的目的
事故工况分析	方法	事故序列分析方法
	步骤	事故序列分析步骤
	工具	事故序列分析工具
	假设	事故序列分析假设
	进程	事故序列进程描述
	结论	事故序列分析结论

知识图谱的第三层是融合各核电厂安全分析报告严重事故篇章的具体内容,针对每个重点知识提取其相关的专业词条开展图谱搭建,建立重点知识与词条、重点知识与重点知识、词条与词条之间的关系。关系类型及示例见表 2。

表 2 严重事故审评知识图谱关系类型及示例
Table 2 Types and examples of knowledge graph relationships for severe accident review

示例关系	词条 A	词条 B
技术要素	严重事故分析	严重事故序列选取
缩略词	蒸汽发生器传热管破裂	SGTR
简称	氢气燃烧	氢燃
包含	严重事故序列选取原则	严重事故序列选取定性原则
包络	SBO	LOFW
原则	严重事故序列选取	严重事故序列选取原则
导则	防止高压熔堆	SAG2
基准	控制安全壳氢气风险	安全壳氢气浓度不高于 10%
功能	非能动安全壳冷却	安全壳长期排热
方法	严重事故分析	典型严重事故序列分析
方案	消氢措施分析	消氢措施分析方案
工具	安全壳过滤排气分析	安全壳过滤排气分析工具
假设	非能动安全壳冷却分析	非能动安全壳冷却分析假设
范围	SAMG 的编制	SAMG 应对范围
目标	严重事故缓解措施	严重事故缓解措施目标
步骤	ROAAM	分析包络状态下各关键参数概率分布
结论	严重事故下安全壳热工环境计算	包络的安全壳热工环境计算
提供	严重事故下设备可用性分析结论	严重事故下设备可用性论证报告
说明	SACRG1	SACRG1 入口条件
分析	消氢措施	消氢措施分析
参考	工程判断	工程实践经验
对应	最不利氢气源特性	事故序列包络性
应用	严重事故下设备可用性分析	严重事故缓解措施有效性分析
特性	蒸汽爆炸	蒸汽爆炸的不确定性
机制	安全壳快速升压	DCH

续表

示例关系	词条 A	词条 B
始发事件	功率工况大破口且安注系统失效	LBLOCA
现象	压力容器内进程	堆芯裸露
进程	安全壳过滤排气分析	安全壳升温升压主要进程
措施	预防安全壳旁路	稳压器安全阀卸压功能延伸
缓解措施	堆芯熔融物与混凝土相互作用	熔融物堆内及堆外滞留
主要设备	安全壳消氢系统	非能动氢气复合器
法规标准	严重事故下设备可用性分析方法	HAD102-17-3.15.5
内容标准	严重事故序列选取	19.6.1.1 事故序列选取
历史问题单	FQ-FLQ1-19.2-41	多机组厂址事故缓解措施

知识图谱中除了包含严重事故分析重点知识与专业词条的关系网络外,还包括另外两类实体,分别是国家核安全相关法规标准/政策性文件要求,以及相关的历史问题审评单,图谱中根据实际情况对各类实体进行了匹配关联。图3为严重事故审评知识图谱示例,其以重点知识“严重事故序列选取方法”为例,展示了事故序列选取包含三种方法,分别是“概率论”“确定论”和“工程判断”,其中“概率论”方法包含“应用一级概率安全分析报告结果”,“确定论”方法包含“事故缓解手段”“事故进程”及“事故后果程度”,“工程判断”方法包含“工程实践经验”和“参考过往同类电厂分析报告”。系统目前已甄别导入严重事故审评知识图谱中的各类专业词条共计1819条,其中专业知识词条1164条,法规标准相关词条334条,历史审评问题相关词条321条。

3 系统的实现

3.1 多用户管理、多任务管理模块

使用Web应用框架如Django(开源软件,版本号3.2.5)自带的用户/分组权限分级管理

结构,实现用户权限的分级管理,使得管理员和普通用户这些不同级别的用户具有不同的权限,承担不同级别的任务。比如系统管理员将被赋予系统与用户管理相关的全部权限,从而自主开展相关的用户管理工作。用户权限区分为管理员权限和普通用户权限。针对用户/组、反应堆和电厂型号、人工智能模型、知识图谱等管理,以及历史/新增问题单、审评文件、审评报告等数据具有不同的管理和使用权限。

3.2 用户界面管理模块

采用业界流行、轻量高效的前端组件化方案Vue.js(开源软件,版本号3.0)来开发用户界面管理模块的界面。用户界面管理模块使用Vue3.0前端框架统一开发前端的用户界面,统一管理而后端的通信协议、数据交换、错误处理,尽量复用前端代码,减少代码冗余度,提高开发效率,图4为系统界面首页。

3.3 报告/文件管理模块

本系统后端用class Report对报告/文件建模,包括报告名称、目录、首页、版本、审评状态、报告文件和提交时间等信息,并使用Django REST Framework(开源软件,版本号3.12.4)框架为前端提供遵循RESTful风格的Web API,以实现报告/文件的增删改查功能。

后端使用Django的FileField将报告文件存储在服务器的文件目录,兼顾效率和空间,而在审评相关报告提交的时候,对报告PDF文件进行处理,自动生成报告的目录和首页。其中首页使用Python的fitz(开源软件,版本号1.19.1)模块生成PDF首页的快照,而目录则使用Python的pdfminer(开源软件,版本号1.3.4)模块,打开PDF文件,搜索其目录结构,生成自定义的目录结构,以支持知识图谱中专业词条的相关性查找功能,以备在后面人工智能程序智能解读的时候起作用。

3.4 历史数据管理模块

后端用class Law对法规标准建模,包括法规名称、生效日期、版本、法规文件及目录;其中目录包含法规的目录结构及相关信息,跟知识图谱相关词条结合,体现在知识图谱智能分析

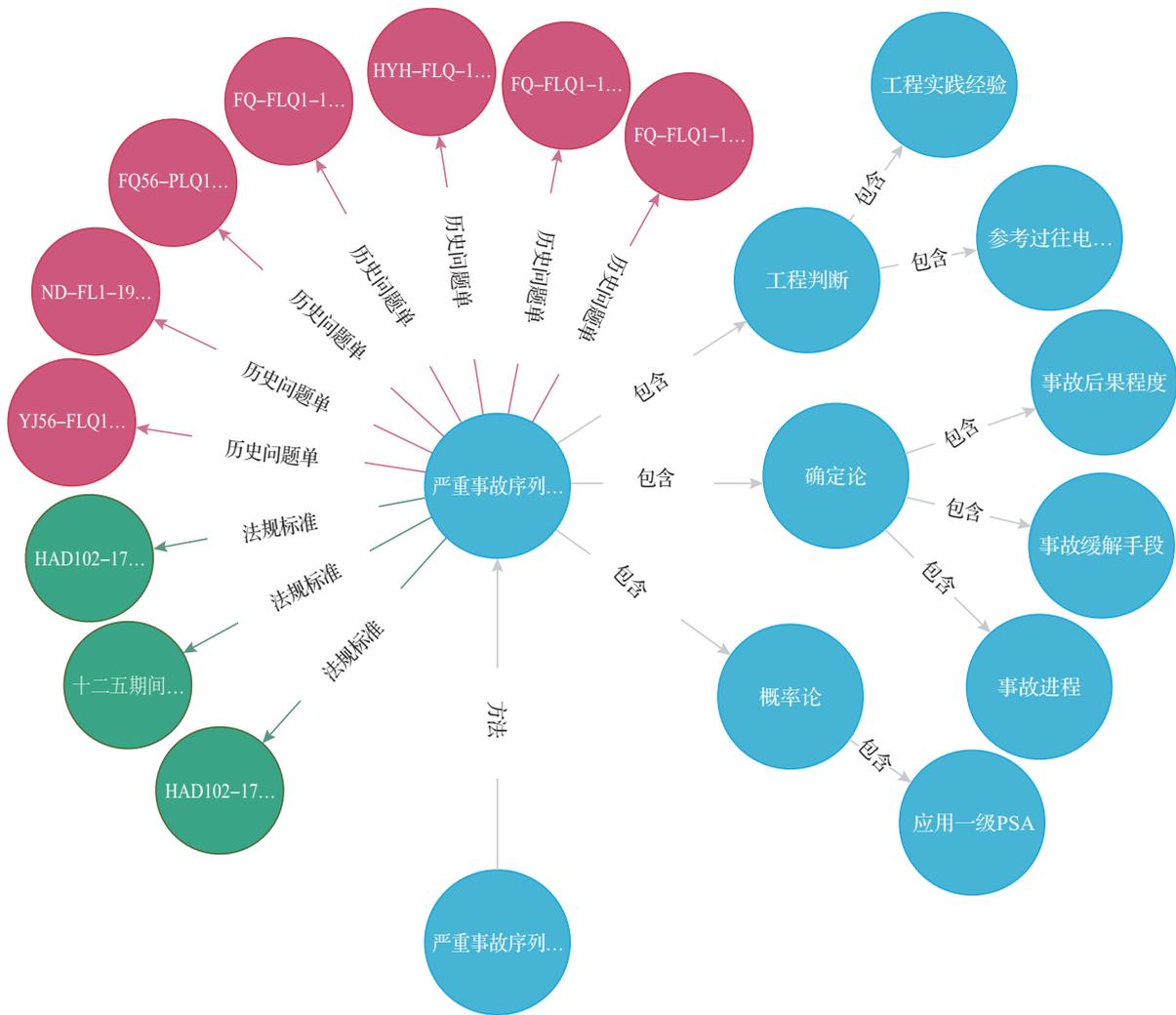


图3 Neo4j 图数据库存储数据示例
 Fig.3 Data example in Neo4j graph database



图4 系统界面首页
 Fig.4 System interface homepage

之中。用 class Question 对历史审评单建模,包括编号、依据、描述、问题和提交时间等信息;历史审评单支持根据模板批量导入功能,并且支

持知识图谱中专业词条的相关性查找功能。用 class HistoryReport 对历史审评相关报告建模,包括报告名称、目录、首页、版本、报告文件、反应堆型号、审评状态和提交时间等信息,将历史审评相关报告管理起来,其中反应堆型号相同的为同类型相关报告。用 class HistoryData 对核电厂历史数据建模,直接存储前端发送过来的 Excel 格式的数据文件。用 Django REST Framework 框架为前端提供遵循 RESTful 风格的 Web API 以实现对以上历史数据的管理,包括增删改查等一系列操作。

3.5 知识图谱管理模块

采用 Neo4j(Neo4j, Inc., 版本号 community-

4.3.2) 搭建系统的 NoSQL 图形数据库, 用来存储核电厂安全审评相关的知识图谱。知识图谱包括核电厂安全审评相关专业词条, 专业词条相关的法规标准, 以及专业词条相关的历史审评问题单。使用人工创建知识图谱, 建立专业词条的节点、关系和属性, 提供系统查询的功能。后台 Python 程序安装 py2neo 模块以访问 neo4j 数据库, 对审评相关报告进行分词以后, 在 Neo4j 数据库中查询匹配, 以判断其是否为核电厂安全审评相关专业词条, 如在 Neo4j 数据库中查询获得其相关信息, 则判定为核电厂安全审评相关专业词条。如果是核电厂安全审评相关专业词条, 则可获取其相关信息: 关系、属性, 以组成子知识图谱, 在前端显示。图 5 为知识图谱管理界面。

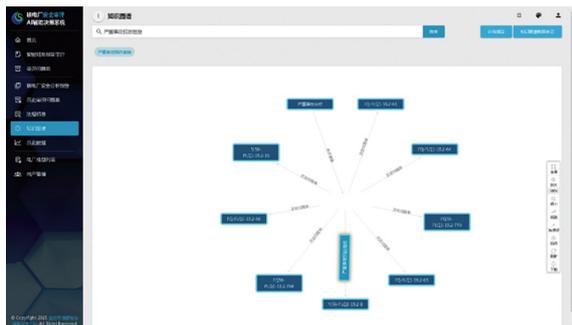


图 5 知识图谱管理界面

Fig.5 Knowledge graph management interface

3.6 审评相关报告解读模块

采用基于百度飞桨(百度, 版本号 2.1.1) 人工智能开放平台中的自然语言处理技术解读审评报告。导入预训练的通用词条, 作为审评报告解读模块解读审评报告的基础模型。使用核电厂安全审评相关的专业词汇, 对预训练完成的通用知识图谱进行微调, 以适应核电厂安全审评专业领域。所采用的 ERNIE-CTM(ERNIE for Chinese Text Mining) 模型, 适用于中文文本挖掘任务的预训练。

系统后端提供 Web API, 对前端发送过来的句子(目录)进行分词, 再将专业词条进行相关处理, 根据目录获取相关章节结构, 并且在知识图谱中查询获取其相关信息, 包括其相关法规

标准, 其章节结构信息, 在历史问题单数据库中查询获取其相关信息。同时, 系统还在前端界面提供了人工智能模型训练功能, 通过 Action Train 对模型进行训练。

3.7 审评智能分析模块

审评智能分析模块对审评报告内容分词后的词条, 在知识图谱中查找, 以确定是否为核电厂安全审评的专业词条, 如果确定是专业词条, 则进行智能分析, 将专业词条与核电厂安全审评相关的法律法规, 以及历史审评问题及回答单等内容相结合进行综合处理, 对审评工作提供相关辅助信息。

智能分析的内容包括: 是否存在相关历史审评问题单、内容及数量; 在知识图谱树形结构中的位置、周围专业词条、相关关系, 以及相关属性; 其相关法规标准的章节位置; 历史审评相关报告。将相关专业词条的信息综合以后, 返回给前端。图 6 为智能辅助报告审评界面, 图中上部左侧为待审评报告, 使用鼠标对报告中关注内容进行文字拾取后, 右侧为系统分析后反馈的前述审评辅助信息, 界面下方可根据分析反馈信息便捷建立新的审评问题单。



图 6 智能辅助报告审评界面

Fig.6 Intelligent assisted report review interface

4 结论

(1) 本文设计的核电厂安全审评辅助决策系统, 可利用自然语言处理模型对审评相关报告进行解读, 并基于知识图谱对相应领域审评报告进行智能分析, 能够实现知识图谱信息提示、历史审评相似内容推荐、法规标准匹配等辅助分析功能。

(2) 基于审评历史资料所构建的严重事故审评知识图谱,可嵌入本系统形成工程小样,用于支持核电厂严重事故审评。

(3) 本系统具有通用性,可通过嵌入多专业知识图谱,为相应领域核安全审评提供技术支持。

参考文献

- [1] 葛翔. 司法实践中人工智能运用的现实与前瞻——以上海法院行政案件智能辅助办案系统为参照 [J]. 华东政法大学学报, 2018, 21 (5): 67-76.
- [2] 霍泽宇. 人工智能在我国审判实践中的应用研究 [D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2021.
- [3] 尹梓名, 董钊, 孔祥勇. 基于国际头痛诊断标准的原发性头痛辅助决策系统 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36 (2): 461-465.
- [4] 蔡秀军, 林辉, 乔凯, 等. 智能辅助决策支持系统在临床诊疗决策中的应用研究 [J]. 中国数字医学, 2019, 14 (3): 111-113.
- [5] 娄宝娟. 交通大数据辅助决策支持系统及在宁海的应用研究 [J]. 中国市政工程, 2016 (6): 1-3+92.
- [6] 文超, 冯永泰, 胡瑞, 等. 高速铁路智能调度辅助决策系统功能分析 [J]. 中国铁路, 2020 (7): 9-14.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 核动力厂、研究堆、核燃料循环设施安全许可程序规定 [EB/OL]. (2019-08-26) [2023-6-2]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202112/t20211214_964042.shtml.
- [8] 依岩, 种毅敏. 高温气冷堆概率安全分析 (PSA) 报告审评的思考 [J]. 核安全, 2011 (01): 31-35.
- [9] 张国翔, 张小方, 赵巍. 核电厂初步安全分析报告审评管理 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019 (33): 23.
- [10] 苏光辉, 田文喜, 张亚培, 等. 轻水堆核电厂严重事故现象学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [11] 陈耀东. 国产二代核电站严重事故对策 [C]. // 中国毒理学会放射毒理委员会第八次全国会议论文集, 长春: 吉林教育出版社, 2010: 169-172.
- [12] 沙平川, 况慧文, 杨赟. 国内三代核电机组严重事故管理的设想 [J]. 核动力工程, 2018, 39 (S1): 106-108.

Design and Engineering Sample Implementation of Nuclear Power Plant Safety Review Decision-Making Aided System based on Knowledge Graph

Guo Chao¹, Yi Yan^{1*}, Luo Wen², Liang Kanhui², Li Chun¹

(1. Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 100082, China; 2. Shanghai Nustar Nuclear Power Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: In response to the advocacy of nuclear safety regulatory authorities on the modernization of nuclear safety regulatory system and regulatory capacity, and to further the quality and efficiency of nuclear safety review, research on optimization technology for nuclear power plant safety review has been carried out by Nuclear and Radiation Safety Center. The overall optimized business architecture and data architecture have been constructed around the nuclear safety review business process, and the nuclear power plant safety review auxiliary decision-making system has been designed; By studying the professional characteristics of severe accident review in nuclear power plants, a knowledge graph of severe accident review was established and embedded in the system to achieve engineering samples. The system can use natural language processing models to interpret review related reports and assist in analyzing corresponding field review related reports based on the embedded knowledge graph. The research results can provide technical support for the safety review of nuclear power plants.

Key words: nuclear safety review; severe accident; knowledge graph; decision-making aided system

(责任编辑: 许龙飞)

于大鹏,宋培峰,王桂敏,等.核安全“软实力”在知识积累和文化遗产等方面的实践与理论研究[J].核安全,2024,23(3):63-69

Yu Dapeng, Song Peifeng, Wang Guimin, et al. The Research and Discussion on the “Soft Power” of Nuclear Safety in Terms of Knowledge Accumulation and Cultural Inheritance [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 63-69.

核安全“软实力”在知识积累和文化遗产等方面的实践与理论研究

于大鹏, 宋培峰, 王桂敏, 张 玥, 戴文博, 周 林*

(生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 本文对核安全“软实力”概念进行了介绍, 并对其发展方向和建设要点开展了相关研究。本文在知识积累和文化遗产等方面提出了建设思路和要点, 以期对“软实力”的顶层设计提供参考建议, 同时为“软实力”体系的建立提供思路, 进一步促进核安全行业综合实力的提高。

关键词: 核与辐射; 核安全; 软实力; 宣传

中图分类号: TL99 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0063-07

在“双碳”目标引领下,我国正由核大国向核强国转型迈进。新发展带来新挑战,习近平总书记在2023年全国生态环境保护大会上指示要“建成同我国核事业发展相适应的现代化核安全监管体系”,为我们在新时代新征程继续做好核安全监管工作提供了行动纲领和科学指南。长久以来,特别是福岛核事故以后,国家核安全局通过技术、设备和管理等多种手段加速提升核安全“硬实力”,并逐步深化核安全“软实力”建设,在保障核事业健康安全发展方面取得了良好业绩。但我们应该意识到,现阶段核安全“软实力”仍然存在发展不均衡、缺少制度保障等问题,本文将重点关注核安全“软实力”中知识积累和信息传播等方面的建设工作,并提出建设思路。

1 软实力的概述

1.1 软实力概念的凝练

核安全“软实力”的建设工作由来已久,其内涵也在建设和科技发展的过程中不断扩展。伴随互联网技术的飞速发展,核安全“软实力”建设的重要性愈加凸显。

2023年9月18日,由核与辐射安全中心印发并报送生态环境部(国家核安全局)的《生态环境研究报告》(第230期)《关于进一步加强核安全监管信息社会面传导的建议》(以下简称《建议》)中^[2],对核安全“软实力”的相关概念和内容、建设依据、大体思路进行了归纳总结。建议中指出,核电发展迎来重要机遇期,核电项目加快推进,核能产业正迎来前所未有的发展

收稿日期: 2023-11-22 修回日期: 2024-05-11

作者简介: 于大鹏(1991—),男,现主要从事核与辐射安全研究工作

* 通讯作者: 周林, E-mail: zhoulin_8662@163.com

机遇,同时也面临确保核安全、进一步提升安全性、公众对核安全关注度和敏感度持续增加的挑战。核安全事业受政治因素影响增强。

国际局势上,大国博弈、局部地区冲突等,使得核安全相关问题易被利用为干扰核电发展的工具,其影响力向政治领域传导,间接导致核安全监管和核行业面临各种压力^[3]。例如福岛核事故的发生,以及后续核污染水排海事件的发生,核安全问题已经不仅是国家层面和技术层面的问题,很多时候是国际层面和政治层面的问题。

国内形势上,在当前能源安全、气候变化的大环境下,涉核项目关注度越来越高,公众关切呈现政治化的特点^[5]。同时以短视频为代表的新媒体信息传播,形成了独立于专业媒体的自组织传播形态,出现了越来越多的圈层化、即时性和闭环传播^[4],其即时性和互动性容易导致信息过度发酵和情绪化。随着短视频已成为舆论信息传播的主流载体,信息传播的方式、速度和影响力都发生了显著变化,社会舆论场域的议程设置由政府、媒体到公众的单向模式转变为多元的双向模式。在突发事件之中,公众议程开始较大地反作用于政府和媒体。

我国急需强化核安全监管信息社会面传导,引导全社会形成“了解核安全”“重视核安全”“敬畏核安全”的局面。大力发展核安全“软实力”,一方面可以在具体单位内核安全小氛围之外形成全社会面的核安全大氛围,构成“舆论压力”,从而反作用于行业单位内部的核安全小环境,强化核安全意识,促进核安全文化培育,促进核安全水平提升。另一方面可以提升公众对核安全的科学认知,减轻公众误解对核安全监管和核行业造成的各种压力,加强涉核风险防范化解能力。这是大力发展“软实力”的内在原因。

《建议》指出,要强化核安全宣传平台建设、完善核安全宣传传导机制及信息报送、强化信息回应及宣传产品加工技术能力等,强化核安全监管信息社会面传导、扩大核安全主流声音。内容涉及国家核安全局微信、核与辐射安全中

心微信等新媒体、信息报送通报机制、系统内信息员、媒体发言专家、新媒体影像工作室等。

生态环境部副部长、党组成员,国家核安全局局长董保同对《建议》做出指示,核安全不仅包括不出核事故的“硬安全”,确保核安全的技术与管理能力,也包括科学决策支持、正确信息传播、健康氛围营造等“软实力”,要下大力气尽快补上“软实力”这个短板。董保同副部长在原报告的基础上,对“软实力”的定义和范围进行了明确,并做出了下一步工作安排,指示各司和相关单位开展进一步的研究部署。

2023年10月11日,2023年第三次核安全形势分析活动在京召开^[1],董保同副部长出席并讲话,再次强调在通过技术、设备和管理确保“硬安全”的同时,要着力提高各有关方面对核安全的科学认知,加快提升核安全科学决策支持、正确信息传播、健康氛围营造等核安全“软实力”水平。自此,核安全“软实力”建设工作受到各方重点关注,各项推进工作逐步深化细化。

1.2 研究和完善方向

本文认为,如同公共行政学等诸多学科的发展历程一样,核安全“软实力”的发展也将经历产生、发展、修正、整合的历史发展阶段。目前,其正处于发展阶段,由于社会不断进步、技术不断更新,诸多问题开始显现,人们越来越重视“软安全”问题,不断总结经验,开展制度研究,规划顶层设计,从而使“软安全”问题浮出水面,得到重视并获得长足发展。本文认为,目前最紧要的问题是做好“软安全”的初步研究探索,进行顶层规划,确定其重点建设范围及当前阶段所要解决的主要问题,并制定中长期的发展规划。

2 多平台建设支持知识积累

知识积累是提升核安全“软实力”的重要基础,其中,知识平台用于知识的积累和传承;监测分析平台为科学决策和技术研发提供数据支撑。

2.1 知识平台

知识平台主要用于信息、数据分类存储和集中调用,包括图书馆、档案馆、知识系统、软件

平台、数据平台。图书馆用于专业出版物的收集、整理、共享。档案馆用于档案资料的收集、整理、共享。知识系统用于培训资料、会议资料、研究报告、法规标准等资料性文件资源的收集、整理、共享。软件平台用于专业软件的普及、分享和教学。数据平台用于核电、核技术利用等行业数据的收集、整理、共享^[12-14]。

相关资源收集、整理后,可以进行科技成果转化,向行业内的单位分级别、分权限、有限性共享。一方面可以助力全行业科研能力的提升;另一方面可以获得资金收入,用以保障平台的运行,以及整个“软实力”体系的构建和升级。

2.1.1 图书馆和档案馆

图书馆用于收集行业出版物,包括图书、期刊、报纸、会议文集等,并将之转化为电子图书,经分类整理后,对外提供检索和借阅服务。其主要工作分三块:一是获取出版物,其来源包括社会捐赠、购买和数据库合作,其载体可以是纸质版,也可以是电子版。二是分类整理,分为纸质书库和电子书库,所获纸质版资料需要通过技术手段转化为电子版,通过既定的分类规则,分别上架或上传至纸质书库和电子书库。三是检索和借阅服务,分为线下和线上两种,分别对应纸质书库和电子书库。

档案馆用于收集国家核安全局及其派出机构、支持单位的纸质和电子档案,包括签报、合同、技术文件、审评文件等,其实体档案可以分布于各单位,也可以集中放置。纸质档案数字化后可以和其他电子数据集中存储于同一服务器中,由同一个档案管理系统统一管理。依据内容,档案可以分为涉密档案和非涉密档案,其中非涉密档案可以进一步分成不公开、可公开部分,对可公开部分可以设置外部访问权限。

图书馆和档案馆各有侧重,但是可以按照相似的原则进行公开访问和外部数据调用。本单位调用本单位数据可以设置较高的访问权限,外单位可以在一定范围内调用部分数据。图书馆和档案馆在提供信息存储和信息共享服务时,可以参考知网、万方等数据库收费模式,收取一定的费用,所收费用一部分用于场馆基

础设施建设和运行、出版物购买、其他数据库资源采购、管理人员绩效等直接支出,另一部分用于“软实力”体系中其他项目支出,从而弥补财政经费的缺口,获得持续稳定的运行经费来源。

图书馆和档案馆存在的主要问题是确定可以公开的内容和公开范围,服务付费模式的合法性和审计风险,档案集中管理的合规性。本文建议在国家核安全局派出单位或技术支持单位中进行试点,充分保障前期建设资金,提供政策保障,开展调研和制度研究,成熟后进行推广。

2.1.2 知识系统

知识系统是分类收集培训资料、会议资料、研究报告、法规标准等一切资料性文件资源的知识管理平台,其收纳的内容包罗万象,类似于一个大型网盘,可以单位或个人的名义上传内容,分别设置浏览和下载权限,供行业从业人员学习和研究。

国家核安全局知识管理系统就是此类平台,但是其使用范围和分类规则需要进一步改进。目前此系统的使用率依然偏低,需要进一步推广。系统中已有的内容和表现形式非常具有参考价值,但是其内容更新缓慢,没有在行业内形成使用习惯。

2.1.3 软件平台

软件平台主要提供软件资源的下载、共享、教学服务。软件类型分为通用软件,如办公软件、视频制作软件、系统软件等;专业软件,如热工水力分析、反应堆功率分析、概率分析等专业相关软件;自研软件,如单位自行研发的、用于特定场景的软件。软件平台提供软件的下载服务、软件使用的教学视频和资料、使用规则和场景介绍、精通相关软件的单位和技术人员信息等,其目的在于打破专业壁垒,促进技术共享,为研究提供新思路,从而促进人才培养,增强全行业综合实力。

2.1.4 数据平台

数据平台的功能主要是集中管理和展示全行业数据,包括监管数据、行业基础数据等,其数据来源于各信息系统、行业协会、集团单位等。“核与辐射安全监管数据管理平台”“核与

辐射安全监管一张图”等大数据应用初步具备此平台的部分功能,但由于大量数据散落在行业各集团与企事业单位,或存在于纸质文件中未做结构化处理,因此目前集中管理数据的广度和深度还难以满足各类用户的使用需要。本文建议继续建立健全信息系统,同时打通与各核电集团及行业内重要单位的数据共享对接渠道,在“核与辐射安全监管数据管理平台”的基础上推动形成基本全面覆盖全行业数据的数据仓库。对数据进行分级分类,完善数据安全保障措施,明确数据访问权限,例如可分为全范围公开数据、特定范围公开数据、仅对监管单位公开数据等,并采用付费公开的方式进行有限制的公开。所得收入一部分支付给数据提供单位,一部分用于系统运维,从而推动形成数据共享的激励机制和数据质量提升的良好运行机制。

其主要问题在于大量数据存在于纸质文件中,结构化处理过程费时费力;各有关单位已有的结构化数据标准不一致,增加了统一采集、管理的技术难度,需要尽快建立各业务领域的数据标准。

2.2 监测分析平台

监测分析平台由数个独立的监测系统构成,包括核与辐射应急系统、辐射环境监测系统、高风险移动放射源在线监控系统等,其主要功能一是收集监测数据,为数据平台提供数据接口,为数据分析提供基础;二是开展初步数据分析工作,定期出具分析报告。

目前,我国核与辐射安全相关的监测系统众多,部分数据采集需求及监测功能重叠,且各系统完全独立,展示风格各异,难以为高层决策提供高质量支持和服务。本文建议打造核与辐射监测分析系统目录,打通各监测系统数据共享渠道,统一数据获取渠道;汇总各系统信息和入口,制定数据展示标准,统一数据展现形式;实现重点监测数据的集成、融合与集中展示,打造监测大数据应用。

3 多媒介宣传促进文化传承

在互联网技术飞速发展的大背景下,信息

传播方式发生巨大改变。信息传播的速度和差错率均大幅提升,如何确保信息正确、快速、广泛地传播,促进文化传承,是提高核安全“软实力”的重点研究和建设方向。

常用的传播手段有新媒体、传统媒体、宣教基地(展厅、教育基地、公众开放设施等),也是目前官方的主要宣传手段。这三个主要手段各有优缺点,各有侧重,其中新媒体主要用于日常新闻信息、紧急信息、业务信息等浅层信息的发布,受众面为公众;传统媒体主要用于专题信息、专业技术探讨、深度解读等深层次信息的发布,受众面为行业从业人员;宣教基地主要用于对从业人员培训教育和特定公众科普教育,其受众范围精准可控。

3.1 新媒体

新媒体是利用网络渠道进行信息传播的宣传手段,其优势在于时效性强、没有信息量和发布时间的限制。其载体和平台包括网站、微信公众号、微博、头条号、学习强国号等。在生态环境部(国家核安全局)层面,目前拥有的工作基础包括国家核安全局网站、国家核安全局微信公众号、学习强国号等。

在宣传能力上,已经可以满足官方信息的对外发布工作,但是,其传播方式是单方面的、自上而下的。在自下而上的信息传播方面,目前所采用的手段一是部长信箱、信访等面对公众的通道,二是研究报告、红头函件等针对行业单位的官方渠道。这些都是非即时手段,手续烦琐,流程较长。从舆论研究成果来看,微博和知乎依然是我国热点事件线上讨论的主阵地。本文建议在充分调研各部委优秀经验的基础上,如国务院国有资产监督管理委员会的“国资小新”,考虑进入微博、知乎等实时讨论网络平台。其优势是可以实时掌握公众的舆论动态,并在第一时间进行回应和舆论引导。但是其存在诸多问题,例如账号管理员以什么样的口径进行回应、可以拥有多大的信息发布权限、信息发布的流程和责任如何划分。如果管理过于严格,信息审核流程烦琐,则无法在第一时间回复网友留言,无法达到及时互动的效果,也就失去

了开通账号的意义；如果管理松散，给予账号管理员极大的信息发布权限，则可能存在巨大的舆论风险，也没有管理员愿意承担这种风险。

本文建议，在现有的工作基础上，针对已有的信息发布平台进行改造。一是结构系统的改造，包括网站版式改造、微信公众号栏目改造等。二是内容和专题的改造，主动设置议程，紧抓社会热点问题，打造自己的热点专栏和宣传品牌。三是打造新媒体矩阵，集合全行业宣传资源，由国家核安全局牵头，打造以网站和微信公众号为载体的新媒体宣传矩阵，定期举办会议和培训，针对热点事件集中发力、集中回应，形成宣传合力。

3.2 传统媒体

传统媒体主要指以期刊、报纸、图书、研究报告为主要载体的传统宣传手段。其主要专注于对事件、政策的深入报道和解读，对专业技术的深入剖析，讲究的是深度，而不是时效性，依靠时间和信息量的积累而逐渐形成自己的信息传播体系。目前，在国家核安全局直接管理的传统媒体中，仅有《核安全》杂志，其作为学术期刊关注于专业技术研究，并刊发少量的政策法规类文章。国家核安全局没有自己的报纸，相关业务在《中国环境报》的专版中有所体现。此外，在核与辐射行业内，有数本学术期刊，如《核动力工程》《原子能科学技术》《核技术》等，集中于中核集团、核学会等单位，中广核集团仅有以内部资料性出版物的形式出版的《大亚湾核电》等出版物^[6-8]。各刊物之间的出版内容各有侧重，部分内容体裁的文章仅有1~2本刊物可以收录。如政策研究、核安全文化、监督审评等类型的文章基本仅能刊发在《核安全》杂志上，其他刊物少有刊发^[9-11]。

各期刊之间少有交流，这种情况在近年有所改善，基本每年会进行一次集中会议交流，但是交流和协作依然不多。其主要原因在于各期刊分属不同的单位和集团，没有一个具有足够影响力的机构或组织主导，目前主要是各编辑部间自发性的交流合作。

本文建议，一是充分发挥《核安全》杂志作

为国家核安全局直接管理的传统媒体作用，对其提供政策扶持，将其做大做强。二是参考上一节所述新媒体矩阵的构建方式，打造核与辐射领域的传统媒体矩阵，形成宣传合力。可以寻找一个具有足够影响力的机构作为牵头单位，打破单位间的壁垒，在期刊发行、供稿、编委资源、编辑力量、主题宣传等方面进行深度合作。其难点在于如何平衡各方利益，牵头单位是否有能力突破单位间的壁垒，如何保证经费来源的可持续性。

3.3 宣教基地

宣教基地主要指用于宣传、教育、科普的实体设施，包括展厅、教育基地、公众开放设施等，是长期面向公众开展科普展览、科技培训等科普活动的重要阵地。随着核电公众沟通工作的逐步深入，我国核电厂设置了科普场馆，不少辐射环境监测站也设置了专门的科普展厅。在生态环境部（国家核安全局）层面，建设有核与辐射安全监管展厅，展厅位于国家核与辐射安全监管技术研发基地，总面积608平方米。该展厅是我国首个以核与辐射安全监管为主题的展厅，它的建成是推动核与辐射安全知识普及、弘扬科学精神、传承科学思想的重要举措，是形成开源、开放、协调、共享科普工作格局的重要手段，也是让公众更深入、更全面地了解核安全，认知核安全，为中国从核大国向强国跨越营造良好发展环境的一项重要工作。

通过近两年的运营，展厅在提升核与辐射安全监管公众科普方面取得一定成效，但依然存在着展现手段和方法较为传统单一、参与体验性有待加强、片面追求科技知识传播、文化内涵和美学意识还较为欠缺等不足。因此，2024年核与辐射安全监管展厅已升级为核与辐射安全监管历程馆。在国家核安全局成立40年之际，面向社会公众、行业领导及专家，展示40年来核与辐射安全工作取得的成就和风采，总结工作经验和价值，传承核安全精神，讲好核安全故事。

本文建议，汇聚我国所有核与辐射相关的展厅、教育基地、公众开放设施等资源，组成一

套完整的科普教育参观培训体系,针对不同类型的参观人员(如核电一线工作人员、核安全监管人员、高校师生等),开发不同的参观培训流程,做成一个精品宣传教育品牌。

4 完善配套和保障

4.1 配套制度

核安全“软实力”的配套制度尚不成熟,需要进一步研究制定。其编写思路可以按照业务工作、队伍建设、经费保障等方面分别开展。

在业务工作方面,为解决部分业务工作基础薄弱,部分业务版面小而散的现状,大力扶持和发展“软实力”,补齐短板,需要由上级主管部门出台一系列政策进行支持。

在队伍建设方面,部分业务在本单位处于弱势和边缘地位,从业人员在职称和职级晋升方面受到限制,在工资绩效方面也和其他部门有所差距。为进一步加强队伍建设工作,提高人员队伍的稳定性,通过政策制度保障从业人员的福利待遇和晋升途径是十分必要的。

在经费保障方面,在“过紧日子”的大背景下,要明确财政经费、其他经费的来源以及对“软实力”的保障范围和保障力度。

4.2 队伍建设

核安全“软实力”体系的队伍建设范围包括生态环境部主管业务司、各派出单位,以及各省厅、各集团和相关单位中的相关业务板块从业人员。

相关人员分散在各单位中,已经具有开展业务工作的基础和能 力,不需要大规模招聘或抽调。目前的重点工作是尽快形成核安全“软实力”队伍体系,明确相关单位和人员,促进人员流动和交流,构建上下联动的人员借调、挂职和晋升体系。

4.3 经费保障

在“过紧日子”的大背景下,财政经费无法全面保障整个核安全“软实力”体系的运作。为保障整个体系的运作,进一步提升核安全“软实力”,我们需要从以下几个方面保障经费的充足。

一是财政经费重点保障。对体系中的全部业务进行梳理,筛选出社会效益显著但是缺乏经济效益、很难获得额外经费来源的项目,财政经费重点保障,对项目支出全覆盖。

二是做好科技成果转化。对业务工作开展过程中产生的科技成果进行转化,将知识平台中可以公开的书籍、档案、数据、报告和其他成果在有限范围内进行有偿公开,业内单位可以按照一定的规则交纳使用费,从而获得检索、浏览或下载相关内容的权限。所得收入一部分支付给数据提供者或提供单位,另一部分用于“软实力”体系的运作。

三是收入集中统筹。将整个核安全“软实力”体系作为一个整体,对各业务收入进行统筹使用。将各业务板块对外收费部分进行统一管理,制定收费项目清单,由指定的工作团队统一对外进行业务洽谈、合同签订、费用收取等工作。所得收入统一管理,统筹使用。

5 总结

核安全“软实力”是保障我国核与辐射安全的重要理念,目前部分业务已经具备相对成熟的工作基础,但是依然存在发展不均衡、经费没保障的问题。大部分业务工作分散在不同单位中,交流合作不充分,缺少成体系的管理制度和 工作模式。本文在归纳总结各业务特点的基础上,提出核安全“软实力”中部分工作的建设思路,并从配套制度和保障措施等方面提出了具体建议。

参考文献

- [1] 生态环境部核设施安全监管司. 国家核安全局开展 2023 年第三次核安全形势分析活动 [EB/OL]. (2023-10-13) [2023-11-16]. https://nnsa.mee.gov.cn/tpxw/202310/t20231013_1043074.html.
- [2] 宋培峰, 黄轲, 南旭龙, 等. 关于进一步加强核安全监管信息社会面传导的建议 [R]. 北京: 生态环境部核与辐射安全中心, 2023.
- [3] 于大鹏, 梁晔, 徐晓娟, 等. 我国核与辐射安全现状研究与探讨 [J]. 核安全, 2022, 21 (04): 12-18.
- [4] 许友龙, 刘莞, 郑丽馨, 等. 近五年核电厂人因相关运行事

- 件统计分析与建议[J].核安全, 2023, 22(01): 49-54.
- [5] 曾建国, 叶彤, 刘镇江. 国外核安全研究现状、热点和趋势——基于 CiteSpace 的可视化分析[J].核安全, 2023, 22(05): 51-61.
- [6] 柴建设, 王晓峰, 许龙飞, 等. 创刊十五载 助力核安全——《核安全》杂志十五年发展综述[J].核安全, 2018, 17(06): 6-10.
- [7] 张天祝. 立足新时代 坚持新理念 再创新辉煌——庆祝《核安全》创刊 15 周年[J].核安全, 2018, 17(06): 3-5.
- [8] 汤搏. 正确的指导思想才能引导正确的行动——《核安全》杂志创刊十五周年有感[J].核安全, 2018, 17(06): 1-2.
- [9] 李金蓉, 邓先红, 张乐, 等. 基于 SOM 神经网络应急柴油发电机故障诊断研究[J].核科学与工程, 2022, 42(05): 1152-1157.
- [10] 邹象, 段军, 吴彦农, 等. 风险指引型核动力厂建造异常重要性判定方法的应用研究[J].核科学与工程, 2023, 43(02): 438-444.
- [11] 姚亦珺, 于大鹏, 王佳明. 模块式小型堆乏燃料水池冷却系统设计[J].核安全, 2023, 22(02): 66-73.
- [12] 杨安义, 晋宏博, 于大鹏. 中美核设施工业控制系统网络安全监管研究[J].自动化仪表, 2022, 43(03): 1-6+10.
- [13] 徐玉虎, 王玉珍, 焦南杰. 科研院所可量化安全管理评价体系的建立及应用[J].核安全, 2023, 22(02): 59-65.
- [14] 李静文, 孙国民, 周文, 等. 蒙特卡罗仿真计算前处理平台的开发与初步验证[J].核安全, 2023, 22(01): 81-88.

The Research and Discussion on the “Soft Power” of Nuclear Safety in Terms of Knowledge Accumulation and Cultural Inheritance

Yu Dapeng, Song Peifeng, Wang Guimin, Zhang Yue, Dai Wenbo, Zhou Lin*

(Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 100082, China)

Abstract: This article introduces the concept of “soft power” in nuclear safety and conducts relevant research on its development direction and construction essentials. The article proposes construction ideas and key points in terms of knowledge accumulation and cultural inheritance, aiming to provide reference suggestions for the top-level design of “soft power” as well as offering insights for the establishment of the “soft power” system, further promoting the comprehensive strength enhancement of the nuclear safety industry.

Key words: nuclear and radiation; nuclear safety; soft power; dissemination

(责任编辑: 梁 晔)

张浩,王健建,赵文军,等.双碳目标下高温气冷堆替代中小型火电的思考[J].核安全,2024,23(3):70-74.

Zhang Hao, Wang Jianjian, Zhao Wenjun, et al. The Consideration of Replacing Small and Medium-sized Thermal Power Plants with High Temperature Gas Cooled Reactor under the Goal of Emission Peak and Carbon Neutrality [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3):70-74.

双碳目标下高温气冷堆替代中小型火电的思考

张 浩, 王健建, 赵文军, 武婷婷

(华能山东石岛湾核电有限公司, 威海 264312)

摘要: 碳达峰碳中和是我国一项重要的国家战略决策,“双碳”目标的提出给能源行业带来了深刻的变革,我国能源结构将进一步优化,电力行业必须实现低碳转型,新能源取代火电已成为必然。本文分析了新形势下火电企业面临的巨大挑战、发电规模受到限制、经营成本不断上升,尤其是中小型火电机组,面临着淘汰和关停的局面,而高温气冷堆具有固有安全性、发电效率高、用途广泛的显著特点,使其替代中小型火电成为可能。本文通过厂址适应性、技术可行性、经济可行性三方面,分析了高温气冷堆替代中小型火电的可行性,并从相关法律法规适用性、内陆厂址所带来的问题、开展公众沟通等方面提出建议。

关键词: 碳达峰碳中和; 中小型火电; 高温气冷堆; 替代

中图分类号: TL413 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0070-05

化石能源是人类长久以来赖以生存的基础能源,但是其却会带来一个全球高度关注的问题,即气候变化问题,因此加快开发利用新能源进行能源低碳转型迫在眉睫^[1]。在 2020 年 9 月 22 日的第 75 届联合国大会上,中国宣布“将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”^[2-5]。碳达峰碳中和的“双碳”目标也在 2021 年全国两会上被首次写入政府工作报告。火力发电是电力行业二氧化碳排放的主要来源,双碳目标的实质就是零碳能源代替排碳能源^[6],在“双碳”目标实现的过程中,清洁能源逐步有序替代化石能源,加快火力发电行业的转型与发展已成为必然趋势。

1 火电企业当前面临的挑战

1.1 发展规模受限

根据中电联《2023 年度全国电力供需形势分析预测报告》统计,截至 2022 年底,全口径非化石能源发电量占总发电量的比重为 36.2%,同比提高 1.7 个百分点。全口径煤电发电量占全口径总发电量的比重为 58.4%,同比降低 1.7 个百分点^[7]。以上数据表明,我国目前电力供应最主要的来源仍然是煤电,但非化石能源发电量逐步上升,同时报告指出非化石能源装机容量在总装机容量中的比重同比提高了约 2.6%,电力能源向绿色低碳转型的趋势依然明显^[8]。虽然未来很长一段时间,火力发电仍将占据重要地位和很大比重,但在目前“双碳”目标下,火

收稿日期: 2023-11-24 修回日期: 2024-01-24

作者简介: 张浩 (1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 现主要从事高温气冷堆运行工作

电的定位已从主体地位逐步变为基础性兜底电源,火电企业新建规模被严格限制,火电企业发展规模已在定位层面受到政策限制。另外,研究表明^[9-10]小型燃煤机组的碳排放量明显高于大机组,机组低负荷下的碳排放量明显高于机组高负荷下的碳排放量。“双碳”目标下,中小型火电机组面临较大的淘汰压力。

1.2 经营成本上升

面对更为严格的排放指标标准,发电企业不可避免地要进行节能减排设施布置,提高发电效率,降低污染物排放。大型火电机组中这些设施布置比较完善,改造难度也不大,但是对中小火电机组来说就要考虑技术、用地等其他成本,这将直接提高火电企业的环保成本,给火电企业经营带来困难。疫情影响也使得煤炭价格持续走高,导致发电成本更高,经营压力剧增。同时部分地区煤电产能过剩,部分火电机组持续中低负荷运行,运行效率大幅降低^[11],随着碳市场的深度发展,这种情况意味着相同的碳排放成本下火电机组出力有所减少,无形中增加了运营成本。在市场竞争下,低效火电机组终将被淘汰。

这些挑战,对火电企业来说是很严峻的,关停和退役是大多数中小型火电企业必须面对的局面,同时目前政策及监管方面的变化,使得审批火电企业扩建工程更加严苛,出现了较多条件优越的空置火电厂址,这为能源替代提供了可能。电力需求的不断上升,碳排放的严格限制,更是推动了清洁能源对火电的替代。但是风电、水电、光伏等新能源电力系统存在能量密度低、出力的不确定性和随机性^[12-13],而核电作为稳定高效的清洁能源,更符合当前能源替代的趋势。高温气冷堆是我国拥有自主知识产权的先进反应堆,其经过基础研究和实验堆建设运行经验的积累,最终成功建设了示范工程(以下简称HTR-PM),2023年HTR-PM顺利商运,其第四代核能系统特点使得替代中小型火电成为可能。

2 高温气冷堆技术特点

2.1 固有安全性

固有安全性是指在任何情况下,不采取人

为和能动设施的干预,依靠自然规律(即非能动设计)达到保证反应堆安全的目的。高温气冷堆的固有安全性体现在阻止放射性释放的多重屏障、反应性瞬变、余热载出。高温气冷堆采用包覆燃料颗粒、一回路压力边界等多重屏障设计,阻止放射性物质向环境释放。其具有较大的负反应性温度系数,发生控制棒全部误提出、反应堆进水等较大正反应性瞬变事故时,完全可以依靠自身的负反馈实现自动停堆。高温气冷堆堆芯直径较小,平均功率密度也较低,同时设置非能动的余热排出系统,在所有运行和事故工况下,反应堆余热完全依靠热传导、热辐射和自然对流非能动地载出,即使出现一回路冷却剂失冷失压事故,也能保证燃料元件的最高温度远低于设计允许温度,不会发生堆芯熔化。

2.2 发电效率高

表1 HTR-PM主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of HTR-PM

参数名称	单位	数值
电站电功率	MWe	211
电站总热功率	MWt	500
堆芯入口氦气温度	℃	250
堆芯出口氦气温度	℃	750
蒸汽发生器出口蒸汽压力	MPa	13.9
蒸汽发生器出口蒸汽温度	℃	571

高温气冷堆示范工程主要技术参数见表1^[14]。目前采用传统的蒸汽循环方式,蒸汽发生器作为一次侧和二次侧之间的换热装置,使得一次侧的氦气将热量传给二次侧的水,在二次侧产生过热蒸汽,进入汽轮机,其蒸汽温度与火电机组相当。由于蒸汽初期参数高,因此高温气冷堆的发电效率大大高于大型压水堆核电站。高温气冷堆的设计思路中还有一种循环方式为氦气透平方式,氦气冷却剂直接推动汽轮机发电机组发电,该种循环方式的发电效率将会更高。

2.3 用途广泛

目前所有类型的反应堆中,高温气冷堆是提供核热可达到950℃的唯一堆型^[15],其

可以提供高温工艺热和高温工业蒸汽用于各种领域,如温度范围为 800℃~1000℃的高温电解和煤气化、温度范围为 500℃~900℃的天然气蒸汽重整和生物质加氢气化、温度范围为 350℃~800℃的电和蒸汽联产、温度范围为 300℃~600℃的油页岩和油砂工艺、温度范围为 250℃~550℃的炼油、温度范围为 80℃~200℃的乙醇提纯、海水淡化和集中供热^[16]。目前制氢主要有蒸汽重整、高温电解和热化学循环分解水制氢三种方法,其中热化学分解水反应制氢的工作温度为 750℃~900℃,效率最高,而高温气冷堆的“高温”使其成为最适合核能制氢的堆型。

3 高温气冷堆替代中小型火电可行性分析

3.1 厂址适应性

与火电厂选址相比,核电厂选址一般来说更远离人口中心和负荷中心,这是因为核电在安全方面有自己的特殊性要求,重点体现在应急计划区的“三区”要求。高温气冷堆具有固有安全性,被称为“不会熔化的反应堆”,即在任何情况下都不会对周围的公众造成危害,技术上不需要场外应急。本文以高温气冷堆示范工程为例,根据国家核安全局印发的《高温气冷堆核电站示范工程安全审评原则》,选取典型设计基准事故、应急基准释放类及事故序列释放类源项进行应急计划区测算。结果表明,烟羽应急计划区、食入应急计划区均可以限定在非居住区范围之内,实现“三区合一”^[17]。因此从技术上来说,高温气冷堆可以适应大部分面临关停或退役的中小型火电厂址。

3.2 技术可行性

高温气冷堆的出口蒸汽参数与火电机组相当^[14],二回路设计也与火电机组几乎没有差别,可通过调整蒸汽发生器出口蒸汽参数适应原有火电机组汽轮机运行。一回路设施涉核,需单独配置,但原有火电机组的二回路设施可以通过技术分析,最大限度地直接使用或改造后使用。同时高温气冷堆采用模块化建设,针对不

同装机容量的火电厂址,可通过调整模块数量来因地制宜地匹配原有火电机组容量。

3.3 经济可行性

与传统核电站相比,高温气冷堆的核岛系统简单且采用模块化标准设计,较多现场施工可以在工厂中完成,简化了现场施工流程,大幅缩短了现场施工的时间,降低了建设成本^[18]。通过多模块组合运行,当出现单一模块故障停运后,并不影响其他模块的运行,其余模块可正常发电,相比原有火电厂而言,对电网冲击更小,稳定性更好,保证了项目经济利益持续最大化。替代工作的实际开展可直接利用原有火电厂址,除根据原火电机组容量大小匹配建设相当数量的反应堆及一回路设施外,原火电机组的大部分二回路设施可直接利用,减少固定资产浪费。原火电机组中的工作人员可根据其与高温气冷堆项目需求的契合程度和核安全专业培训情况进行岗位安置,提高了人力资源的利用率。最大程度地综合利用火电机组的原有资源,降低了项目的成本。

4 高温气冷堆替代中小型火电需关注的问题

高温气冷堆替代中小型火电项目,要对比核电厂与火电厂之间的不同之处,充分考虑核电的特殊性。需要重点关注以下几点。

4.1 相关法律法规

目前我国核电相关法律法规大都参照大型压水堆核电站制定,未能充分考虑其他堆型的特有安全技术,因此针对高温气冷堆等新堆型的法规标准体系并不健全。火电厂址距离居住区较近,周边人口相对密集,而高温气冷堆可以排除大规模放射性物质释放的事故后果,且有足够的应急响应行动时间,从技术和安全性上来说,高温气冷堆是可以适应火电厂址的。但若沿用压水堆核电站的法规和标准,则会限制高温气冷堆的技术优势,从政策上对高温堆替代中小型火电产生阻碍。应充分考虑高温气冷堆技术的特殊性,尽快出台或明确高温气冷堆在厂址选择方面的法律法规。

4.2 内陆厂址带来的问题

火电厂址较多分布在内陆,必须考虑高温气冷堆在内陆所带来的影响。内陆核电的受纳水体为地表水和地下水,扩散条件明显弱于海水,液态放射性流出物的排放对当地的影响比滨海地区更敏感。高温气冷堆主要放射性液态流出物为氚,因此若高温气冷堆替代内陆火电机组,必须将液态流出物中的氚管理放在重要位置。虽然多项研究表明^[19-21],内陆核电厂液态流出物排放造成的影响是可接受的,满足国家标准,但仍应按照合理可行尽量低的原则开展相应行动。可以借鉴或实施以下方案实现对液态流出物的控制:氚的浓缩、调节河道或水库稀释能力、排河或排海等异地排放方案、液转气排放方案、重水堆的氚处理实践等^[22]。

4.3 公众沟通

核安全一直是公众极为关心的重要问题,虽然核电的风险是客观存在的,但却由公众的主观因素来决定该风险是否可接受。核电风险的评判是一个深层次的、极具专业性的工作,限于公众对该方面认知的不足,导致其风险判断结果与以专家论证为基础的风险判断结果不一致,更是与客观风险偏差极大。尤其是福岛核事故发生后,很多公众几乎谈核色变。鉴于火电机组的位置分布,高温气冷堆替代火电机组的公众可接受性将会是更大的挑战。本文认为应大力推进核与辐射相关知识的宣传普及,让公众了解核电,增强公众对于核电开发风险的认识。核科普尽量通俗易懂,避免出现公众受到错误信息影响的可能性。本文认为要充分取得项目所在地的政府支持,确保核电宣传上的正确舆论导向,保证信息公开,增加核电厂选址的透明度,提高核电开发和建设过程中的公众参与度,建立畅通和有效的公众沟通渠道,减少公众信息不对称现象的发生,让公众从内心消除对核电不必要的担忧,确保社会稳定。

5 结语

高温气冷堆替代中小型火电是响应“双碳”目标的新思路、新理念,若真正付诸实践,将会

是核能利用的重大突破。在厂址符合要求的情况下,不仅可最大限度地利用火电厂址资源,而且比火电机组更稳定,成本投入更低,充分实现国有资产保值增值。作为一个新课题,开展高温气冷堆替代火电机组技术,要充分发挥高温气冷堆的技术优势,推动适合高温气冷堆的法律法规尽早落地,对内陆中小火电厂址进行充分调研,与监管单位积极沟通,主动探索高温气冷堆代替火电技术的政策,助力节能减排,实现“双碳”目标。

参考文献

- [1] 汪宁渤, 马明, 强同波, 等. 高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策 [J]. 中国电力, 2018, 51 (1): 29-35+50.
- [2] 赵晟楠. 能源替代效应与经济发展问题研究 [J]. 山西能源学院学报, 2021, 34 (6): 48-50.
- [3] 黄晶. 中国 2060 年实现碳中和目标亟需强化科技支撑 [J]. 可持续发展经济导刊, 2020 (10): 15-16.
- [4] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状 [J]. 发电技术, 2021, 42 (2): 207-217.
- [5] 田永, 李瑞强, 刘文静. COVID-19 疫情前后欧盟碳金融市场的配额拍卖价格及启示——基于碳达峰、碳中和背景 [J]. 价格月刊, 2021, (8): 1-9.
- [6] 龙宇. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 商讯, 2022 (21): 125-128.
- [7] 杨歌. 2022 年我国电力供需总体平衡 [N]. 机电商报, 2023-02-13.
- [8] 中国电力企业联合会. 中电联发布 2023 年度全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL]. (2023-01-19) [2023-10-28]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-317477>.
- [9] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析 [J]. 生态环境学报, 2014, 23 (7): 1164-1169.
- [10] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用 [J]. 热力发电, 2020, 49 (2): 88-92.
- [11] 池佳仁. 中国电力发展预测及煤电过剩产能分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [12] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (9): 171-191.
- [13] MELLO G, DIAS M F, ROBAINA M. Wind farms life cycle assessment review: CO2 emissions and climate change [J]. Energy Reports, 2020, 6 (S8): 214-219.

- [14] 张浩, 王建建. 模块式高温气冷堆的技术背景及展望 [J]. 中国核电, 2021, 14 (3): 419-422.
- [15] 居怀明, 徐元辉, 钟大辛. 高温气冷堆工艺热应用研究 [J]. 高技术通讯, 2000 (7): 107-110.
- [16] 周红波, 齐炜炜, 陈景. 模块式高温气冷堆的特点与发展 [J]. 中外能源, 2015, 20 (9): 35-40.
- [17] 王永福, 孙玉良. 高温气冷堆供热项目厂址选择法规标准适用性研究 [J]. 科技导报, 2017, 35 (13): 24-28.
- [18] 张浩, 王建建. 小型反应堆发展现状及推广分析 [J]. 中外能源, 2020, 25 (10): 26-30.
- [19] 郭欣伟, 谭炳卿, 赵静, 等. 内陆核电对地表水水质影响的初步分析 [J]. 水利科技与经济, 2013, 19 (4): 5-9.
- [20] 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.
- [21] 张璜, 赵祥峰, 仲卫东. 内陆核电厂放射性液态流出物对水环境影响的评价模式及案例应用分析 [J]. 环境工程, 2014, 32 (7): 160-164.
- [22] 杨永春. 北方某内陆核电厂液态流出物排放方案研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2020.

The Consideration of Replacing Small and Medium-sized Thermal Power Plants with High Temperature Gas Cooled Reactor under the Goal of Emission Peak and Carbon Neutrality

Zhang Hao, Wang Jianjian, Zhao Wenjun, Wu Tingting

(Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Weihai 264312, China)

Abstract: Emission peak and carbon neutrality is an important national strategic decision in China. Profound changes have taken place in the energy industry under the goal of emission peak and carbon neutrality. China's energy structure will be further optimized, power industry must realize low-carbon transformation, and the replacement of thermal power by new energy has become inevitable. The great challenges faced by thermal power enterprises under the new situation are analyzed. The scale of power generation is greatly limited and the operating cost is rising. In particular, small and medium-sized thermal power units are facing the situation of elimination and shutdown. High temperature gas cooled reactor has the remarkable characteristics of inherent safety, high power generation efficiency and wide application, which makes it possible to replace small and medium-sized thermal power units. The feasibility of high temperature gas cooled reactor replacing small and medium-sized thermal power units is analyzed from three aspects: site adaptability, technical feasibility and economic feasibility. It also puts forward suggestions on the applicability of relevant laws and regulations, problems caused by inland nuclear power plant sites, and public communication.

Key words: Emission Peak and Carbon Neutrality; small and medium-sized thermal power units; high temperature gas cooled reactor; replace

(责任编辑: 许龙飞)

凡小芬. 核安全管理体系在核电土建施工中的构建与实施探讨[J]. 核安全, 2024, 23(3):75-80.

Fan Xiaofen. Construction and Implementation of Nuclear Safety Management System in Civil Construction of Nuclear Power Plant [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3):75-80.

核安全管理体系在核电土建施工中的构建与实施探讨

凡小芬

(中国核工业第二二建设有限公司, 武汉 430050)

摘要: 本文主要通过对核安全及相关术语的介绍, 以核电土建施工领域核安全管理体系构建与实施为研究对象, 结合核安全管理体系构建与实施的现状以及核安全管理体系构建与实施的必要性, 梳理探讨了核电土建施工单位构建核安全管理体系的具体思路、实施模式等, 从而为其他核电土建施工单位开展核安全管理体系的建设工作提供参考与借鉴, 共同维护核安全基础屏障。

关键词: 核安全; 核安全文化; 纵深防御; 屏障

中图分类号: X946 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0075-06

核安全是国家安全的重要组成部分, 当前国家监管层面时刻在强调要深刻认识核安全的极端重要性, 把核安全摆在最高优先级, 构建严密的核安全责任体系, 确保绝对安全。对于核安全、核安全管理、安全管理、核安全管理体系等, 各层级人员的站位和认知的局限性, 以及思考问题的角度和方式的差异, 对以上概念的理解和运用可能大相径庭。

核电产业链的工程建安单位如核电土建施工单位主要承担核岛厂房、常规岛厂房、BOP厂房等多子项的土建施工任务, 对核安全内涵的理解程度, 以及在实际管理中如何贯彻运用, 对核安全来说至关重要。

1 核安全相关术语介绍

1.1 定义

核安全是指对核设施、核活动、核材料和放射性物质采取必要和充分的监控、保护、预防和

缓解等安全措施, 防止由于任何技术原因、人为原因或自然灾害造成事故, 并最大限度地减少事故情况下的放射性后果, 从而保护工作人员、公众和环境免受不当的辐射危害^[1]。

核安全文化是指各有关组织和个人达成共识并付诸实践的价值观、行为准则和特性的总和, 它以“核安全”为根本方针, 以维护公众健康和环境安全为最终目标^[1]。

1.2 核安全与质量、安全的关系

质量是安全的基础, 核电厂安全包含工业安全以及核安全, 核安全和质量相辅相成, 核安全是质量的结果, 质量是核安全的基础和保障, 核电工程建设期间的质量就是运行期间的核安全。

土建施工单位作为核电厂支持单位, 同样对核电厂安全有着重要影响, 其主要责任是保证产品(工程建造)的质量, 必须制定和有效地实施质量保证体系, 进而确保实现未来运营组

收稿日期: 2023-11-01 修回日期: 2023-11-24

作者简介: 凡小芬(1983—), 女, 高级工程师, 学士, 现主要从事质量管理工作

织的安全目标。

1.3 核安全与其他管理环节的关系

按照全生命周期管理理念,工程建设的每一个管理环节的工作质量都会最终影响工程质量,比如人员资质管理、机械设备管理、材料采购管理、信息技术管理等,都跟质量、安全以及核安全息息相关。

2 核安全管理体系构建与实施现状分析

2.1 核安全管理体系覆盖边界未统一

目前,针对核岛土建施工单位,较常规的做法是按照 HAF003 要求建立一套以质量保证为核心的管理体系并有效贯彻落实,最终保障核电厂的安全,但关于常规岛及 BOP 等其他子项的土建施工在不同堆型、不同合同要求下执行标准存在不统一的现象,有的项目根据合同等各方面要求执行 ISO 9000 标准,非核体系,有的是高标准、严要求执行核电体系标准,核安全管理体系覆盖的具体边界目前没有一个统一的明文规定,对后续整个核电土建施工行业统筹管控产生一定的影响。

2.2 核安全管理机构及职责归口不明确

目前,土建施工单位基本上为三级管控模式,总部、二级单位、项目级的核安全管理职责归口部门和主管领导未明确。涉及一些重要的核安全管理业务工作,总部级牵头部门与项目级牵头部门不一致,目前涉及核安全业务工作时,在实际工作中通常有 2 个牵头部门,有时是安全口,有时是质量口,这种情况一定程度上会导致核安全管理工作的开展缺乏系统性、前瞻性以及专业性。

2.3 核安全人员配置标准未明确

土建施工单位涉及核安全业务工作的牵头人员基本上是质量人员和人员,目前核电工程项目均设置独立的质保部门、安全部门,针对安全管理人员的配置标准,国家层面有明确的法律规定,但质保人员在国家层面无明确的配置标准,质保队伍建设及技能培养机制不健全,某种程度上对核安全管理水平的提升有一定阻碍。

2.4 核安全系统策划能力不够

土建施工单位各层级人员专业、能力、经验水平参差不齐,事前策划、系统策划能力不够,且目前人员普遍年轻化(图 1),对外部监管标准吸收消化不到位,对标准的理解与贯彻应用能力不足,管理工具未创新,新工具新技术应用不多,不能利用新的技术设备来保障核电工程质量、安全管理的有效实施与监管工作。

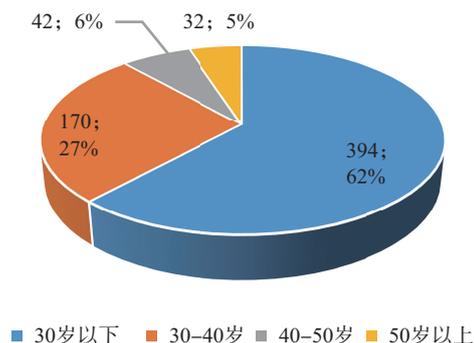


图 1 某阶段质量人员年龄占比分布情况

Fig.1 Age distribution of quality personnel at a certain stage

2.5 核安全要求落实与执行不到位

土建施工单位对核安全的认识不足,片面认为核安全对外就是运行单位的事,对内就是安全部门的事,且土建施工单位的上游监管单位较多,监管标准存在不统一,项目管理人员尤其是新员工较多,经验水平不足,对外部监管标准吸收消化不到位,对标准的认识和理解不一致,造成执行产生偏差;项目新进场作业人员技能水平不足,核安全意识差,且人员流动较大,具备核电建造经验的一线作业人员不足,对要求不了解;在落实与执行方面,偏离程序、方案要求的现象一直存在。

2.6 核安全绩效评价与改进机制不完善

核安全改进有效性不足,核安全考核机制不健全。现场质保监督检查发现的问题重复发生(图 2),责任单位对产生的问题进行原因分析,有针对性地制定了纠正和预防措施,但执行有偏差、整改不彻底,因人因失误、施工做法等原因产生的不符合项依然重复发生(图 3)。核安全考核机制不完善,问题发生后,奖惩力度不

够,蜻蜓点水式开展奖惩,没有从根本上起到真正的示范、震慑作用。

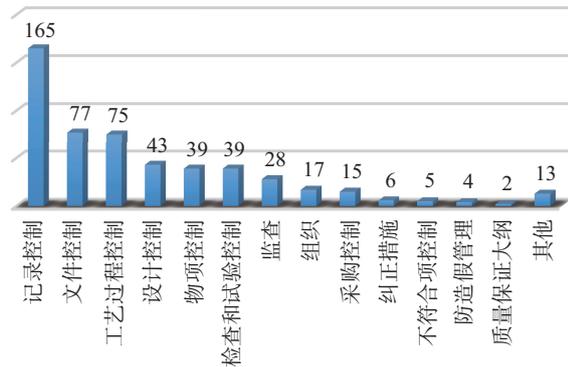


图2 某阶段外部质保监督检查问题分布情况

Fig.2 Distribution of external QA inspection problems at a certain stage

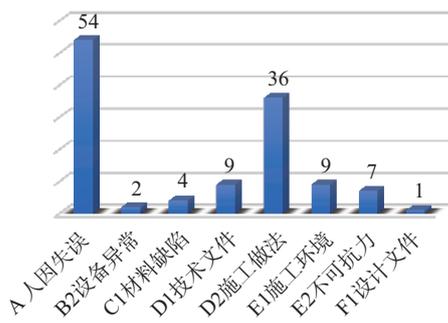


图3 某阶段不符合项问题产生原因分布情况

Fig.3 Distribution of causes of nonconformities in a phase

3 核安全管理体系构建和实施的必要性

3.1 构建核安全管理体系,是满足监管要求的现实需要

核安全监管形式日益严峻,为严格贯彻落实国家核安全法及核安全相关管理要求,结合公司核电多项目多堆型施工管理,核电施工单位必须建立一个架构统一、职责分工合理且明确、各项资源有效整合、业务流程与监督流程优化、纵横协同的管理体系并全面落实。

3.2 构建核安全管理体系,是推进核安全文化建设的内在需要

构建核安全管理体系是刀刃向内、自我革新、提升改进、追求卓越的工作体现,是核安全

文化建设的关键内容。本文建议构建一套系统且有效的管理体系,并将管理体系的各项要求内化于心、固化于制、实化于行、外化于形,在要求与落实中持续推进完善,持续提升核安全文化建设水平。

3.3 构建核安全管理体系并有效实施,是提高管理绩效的必要途径

本文建议通过整合建设,提高项目管理站位,系统策划制定项目管理方针和目标,明确职责分工,统筹调配资源,减少重复工作,提高工作的协调性,有效利用人力、物力、财力等。

3.4 构建核安全管理体系,是传承核安全知识经验的有效载体

土建施工单位承建了多个子项的施工任务,结合合同及上游相关要求,逐步形成了一整套契合自身实际本土化的施工单位管理理念、原则要求、方式方法和操作流程,核安全管理体系通过对上述实践经验的系统梳理与总结,能为核安全经验积累提供有效载体,为核安全管理的监督检查等理论巩固、转化和再创新构建一个良好的、可持续改进的平台。

4 核安全管理体系构建与实施探讨

4.1 优化管理机构,重塑管理流程

企业要组建精干专业的核安全管理团队,打破僵化的思维模式,统筹推动机构职能流程再优化、再塑造,结合行业趋势及内外部要求,组织开展对组织架构及管理流程的一个全面梳理,横向到边、纵向到底,全方位系统识别、分析、改进,建立新的团队管理模式,互融互信,共同提升;通过全流程、全方位的管控,构建核安全管理体系网格化、差异化长效管控新机制(图4)。

4.2 优化资源配置,明确职责分工

企业要重视最高管理者的作用,一方面确定并提供建立、实施、保持和持续改进核安全管理体系所需的资源,另一方面明确核安全管理体系覆盖边界,将核安全管理体系融入单位业务管理过程中,制定量化、可操作的流程,不架空流程,使流程真正落地,每个业务板块均实现可操作,排除责任边界不清晰的情况发生。

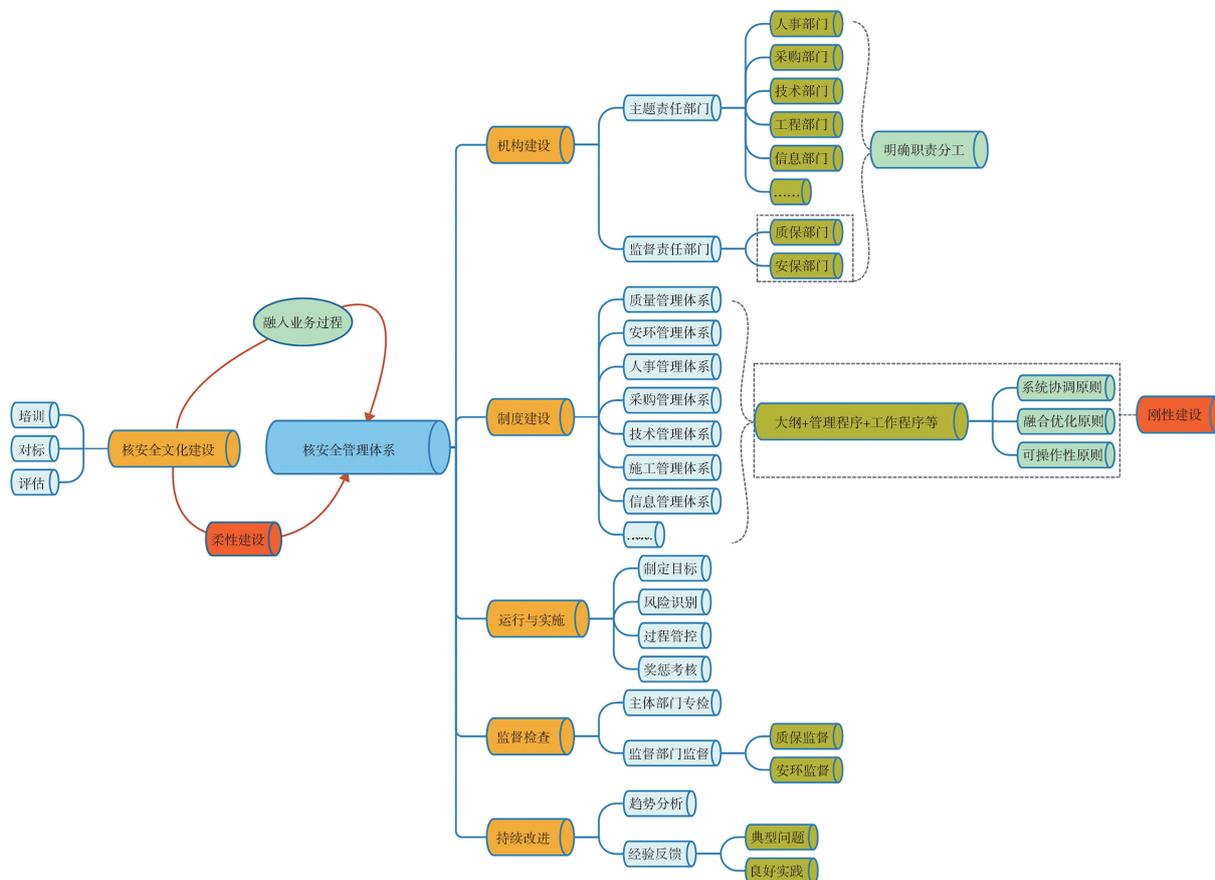


Fig.4 Nuclear safety management system

核安全需要形成合力,大力协同,全体员工共同为核安全这个目标而努力。

4.3 强调系统策划,完善体系建设

为全面落实核安全法及国家相关管理规定及要求,在核安全管理体系策划阶段,应基于风险与机遇,结合相关方要求,进行核安全风险识别与评价,加强核安全顶层设计,将核安全融入各个业务过程,全面策划体系内各子要素的协同融合,结合实际,对整套核安全管理体系文件进行全面系统梳理,程序要求与现场实际相脱离的,如是程序问题,则对程序进行优化完善;如是执行问题,则对程序执行不到位的出台相应考核办法。

4.4 强调过程精细管控,坚持问题导向作用

企业要加强核安全管控力度,持续推广核安全精细化举措,以施工现场为中心,以人员行为标准化和工程实体管控标准化为重点,落实

好工艺卡等各种技能载体、一线人员职责标准清单、过程巡检细则等举措,通过精细化的管理提高项目管理水平。企业要切实履行“法人”管项目职责,提高“法人”管项目监管力度,重点聚焦工程实体监管,项目层面持续推进验收标准手册、缺陷防治指南等文件的应用,提高工艺管控标准化水平。

企业要严格践行两个“零容忍”,前后方统筹谋划,完善对接反馈流程,建立主动反馈、快速反映、信息共享、机制完善的质量、安全问题应急处理机制。企业要坚持问题导向的作用,善于内部发现问题,准确分析问题,着力去解决问题,杜绝“被动”“消极”“隐藏”,以科学、系统、有效的方式积极面对和处理产生的各种质量、安全问题。

4.5 优化管理监督,动态把控核安全趋势

企业要进一步完善公司总部、二级单位及

所属单位/项目部的三级监督模式,加强多方协同监管。企业要加大公司总部对重点项目、重点单位核安全管理体系有效性监督检查力度,压实各单位的核安全监督职责,强化监督检查结果处理,将各类检查发现问题形成数据库,跟踪整改落实情况,建立监督发现问题联动机制,每年对重大工程专项监督全覆盖,针对问题拉条挂账,组织整改落实促提升。

企业要进一步优化完善工程建设核安全指标体系,深入开展核安全指标的内在逻辑关系研究,为核安全决策提供依据,促进核安全改进。企业要开展核安全历史数据研究,优化趋势分析指标参考基线,为实现工程建设核安全评价显性化和智能化打好基础。

4.6 持续培育核安全文化建设

深入推进核安全文化建设,有效落实对违规操作和弄虚作假行为的两个“零容忍”,公司“十四五规划”中明确“持续开展核安全文化建设,进一步完善核安全文化建设体系文件架构及内容,全面推进质量行为辨识和不良行为管控及分析工作,动态跟进核安全文化业绩并持续改进,全面提升员工法治观念和文化认同度”。结合以上要求,企业要将质量、安全、核安全三体系有机融合,通过体系有效地运行,提升全员质量意识和核安全意识,最终确保核电工程的质量和安

4.7 优化经验反馈体系,提升核安全整体水平

经验反馈是持续改进过程的输入,要进一步优化经验反馈体系,组织开展有针对性的经验反馈活动。在深刻剖析内部案例的同时,企

业要主动收集行业内典型问题和良好实践,分析研究和充分借鉴,使工程建设经验得到有效利用,同时结合公司品牌建设,加强质安融合、党建+融合、核民结对交流等活动,取长补短,互融互促,做好标准化经验总结、复制、成果保持及应用落地,推广行之有效的方式方法、管理工具,实现全链条“握裹式”的管理提升,最终提升核安全整体管理水平。

5 结论

随着我国新一轮核电建造启动,大量质量和安全意识基础薄弱的新人进入核电现场,存在安全意识培育周期长、新人施工随意性大等问题,一定程度上对核安全产生影响。核电土建施工单位可以根据已构建的核安全管理体系,参照国家理念,有效贯彻应用到实际工作中,协同业主单位共同维护好核电施工这道安全屏障。

参考文献

- [1] 环境保护部核与辐射安全中心.核安全综合知识[M].北京:中国原子能出版社,2018.
- [2] 柴建设.核安全文化理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [3] 汤搏.核安全领域中纵深防御概念的产生、发展和存在的问题[J].核安全,2016,15(03):1-7.
- [4] 汤搏.核安全的若干基本问题和核电厂安全水平的确定[J].核安全,2006(02):1-7.
- [5] 万斌斌.在建核电厂中美核安全监管对比研究[J].核安全,2018,17(05):1-6.

Construction and Implementation of Nuclear Safety Management System in Civil Construction of Nuclear Power Plant

Fan Xiaofen

(China Nuclear Industry No.22 Construction Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: This paper mainly introduces nuclear safety and related terms, takes the construction and implementation of nuclear safety management system in the field of nuclear power civil construction as the research object, and combines the current situation of the construction and implementation of nuclear safety management system as well as the necessity of the construction and implementation of nuclear safety management system to sort out and discuss the specific ideas and implementation modes of nuclear power civil construction units to build nuclear safety management system. This will provide reference and reference for other nuclear power civil construction units to carry out the construction of nuclear safety management system, and jointly maintain the basic barrier of nuclear safety.

Key words: nuclear safety; nuclear safety culture; defense in depth ; protective screen

(责任编辑: 许龙飞)

张蔚华, 粟俊杰, 王兴彪, 等. 浅探核能利用生态补偿[J]. 核安全, 2024, 23(3): 81-87.

Zhang Weihua, Su Junjie, Wang Xingbiao, et al. Explore the Ecological Compensation of Nuclear Energy Utilization [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 81-87.

浅探核能利用生态补偿

张蔚华, 粟俊杰, 王兴彪, 徐兴嘉, 张卫华*

(生态环境部东北核与辐射安全监督站, 大连 116001)

摘要: 为推动核能利用事业的发展, 维护公众环境权益, 促进生态文明建设, 通过对目前核能利用领域生态补偿可行性进行分析, 开展相关探索研究, 提出意见建议, 对构建生态保护者和获益者良性互动关系、推动经济社会可持续发展具有一定现实意义。

关键词: 核能利用领域、生态补偿、可行性分析

中图分类号: TL941 **文章标志码:** C **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0081-07

生态补偿是指采取财政转移支付或市场交易等方式, 对生态保护者因履行生态保护责任所增加的支出和付出的成本, 予以适当补偿的激励性制度安排^[1], 是我国落实生态文明战略, 保护和改善生态环境, 提升生态保护效益的重要战略举措。

截至 2024 年 4 月, 我国大陆运行核电机组 56 台、在建核电机组 27 台。2023 年, 我国核能生产电量为 4334 亿千瓦时^[2], 占我国年电力生产量的 4.86%。核能发电已成为我国电力生产、清洁能源利用、国家能源安全保障的关键途径。目前, 实施的生态补偿主要集中在森林、流域、矿产、耕地等生态保护领域^[3], 作为生态保护组成部分的核能利用领域并未实施相关举措。本文所指的核能利用领域主要为核动力厂, 通过对其生态补偿的探索研究, 引导核能利用领域生态获益者履行补偿义务, 激励生态保护者保护生态环境, 对构建生态保护者和获益者良性互动关系、推动经济社会可持续发展具有重要

现实意义。

1 常规环境领域生态补偿

1.1 实施现状

党的十九届四中全会提出全面落实生态补偿制度。中央财经委第五次会议上, 习近平总书记明确指出要全面建立生态补偿制度。经过多年探索实践, 生态补偿在政策法规、生态重点领域、机制建立等方面取得了丰硕成果, 符合生态文明建设要求的新进展、新突破。

立法方面, 修订后的《环境保护法》明确提出生态补偿制度;《森林法》《草原法》《水污染防治法》《黄河保护法》《青藏高原生态保护法》《海洋环境保护法》《长江保护法》等专门法对生态补偿做出了专项要求;国务院第 26 次常务会议通过《生态保护补偿条例》;海南省公布实施《海南省生态补偿条例》;江苏省南京市、苏州市、无锡市等地也制定了相应的生态补偿办法和条例。

收稿日期: 2024-04-07 修回日期: 2024-05-06

作者简介: 张蔚华 (1989—), 男, 硕士, 现主要从事核与辐射安全监督工作

* 通讯作者: 张卫华 (1978—), E-mail: zhangweihua@ero.mee.gov.cn

实施方面,有关地方积极探索生态补偿措施的有效形式,部分地方以开展相关实践,如河南、山东两省签订黄河(豫鲁段)流域生态保护补偿协议;福建省印发实施福建省综合性生态补偿实施方案、福建省重点流域生态补偿办法;广东省发布实施广东省生态补偿办法、广东省生态公益林建设管理和效益补偿办法;云南、四川、贵州三省共同签署了赤水河流域横向生态补偿协议,以一定比例出资,共同设立横向生态补偿资金。

1.2 生态补偿本质

我国生态补偿的理论研究及政策探索始于20世纪90年代初,有学者^[3]将生态补偿过程分为补偿资金筹集和实体生态恢复两个阶段。从逻辑上看,补偿资金筹集是实体生态恢复的前提,实体生态恢复是补偿资金筹集的目标。因此,生态补偿的本质可以定义为因减损生态资源而受益的获益者向生态保护、减损者提供资金补偿,用以将减损的生态恢复到原有状态。

目前,由于补偿依据体系不健全、对象不确定、标准不科学、资金来源不明确、模式不创新等原因^[4],我国的生态补偿理论和实践多集中在补偿资金筹集,对资金的使用、审查,生态恢复等方面关注较少。

2 核能利用生态补偿意义与内涵

在核能利用领域实施生态补偿,能够有效协调社会经济发展和生态环境保护之间的矛盾^[5],不仅能促进生态文明建设,推动生态保护与发展共赢,也是巩固脱贫攻坚成果、加快乡村振兴的有效手段。

2.1 公平正义原则

改革开放初期,我国对环境资源利用以及经济发展带来的环境问题所采取的实践“支付”原则^[3]为“谁开发谁保护、谁污染谁负责”,这在社会生产力不高、经济增长方式落后的当时是适用的。但在新时代新阶段下,我国社会的主要矛盾已发生改变,核能利用领域现有对环境“支付”原则已无法满足生态文明战略、建设美丽中国的新要求,公平正义原则尚未充分落实。

一是核能利用领域现有“支付”原则是一种价格支付而非等价补偿。从经济学观点来看,生态资源是一种生产要素,在市场经济中生态资源获益者向政府、组织、个人购买使用生态资源,但这种购买并不充分等价,即获益者支付的价格远远低于其在生产过程中对生态资源损耗后的恢复成本。

二是现有“支付”原则是一次性支付而非长期补偿。根据我国法律规定核电厂设计寿期最长可达60年,退役后需长期监测核电厂厂址及周围环境的放射性,生态资源从占用到恢复是一个长期过程。在这个过程中,特别是核电厂退役期间,《2018世界核能产业现状报告》指出,核设施的退役所花费的时间通常比预期要长,在大多数情况下甚至超过了建造和运行时间之和,目前已经完成退役的反应堆中,最慢的花了42年,受损生态资源并未得到整个过程的补偿。

三是现有“支付”原则是资源性赎买而非发展权补偿。核电厂运行可能影响到域内人群以及厂址和区域的环境,选址条件苛刻,通常以核电厂反应堆为中心半径不小于5 km设立规划限制区,规划限制区内不宜有1万人以上的乡镇,不宜发展易燃、易爆等可能存在较高危险活动的工业设施。核电厂厂址的使用条件实际上限制了周围相当范围的发展,而现有“支付”原则不能对其发展权进行补偿。

2.2 核能利用事业的发展要求

核能作为一种安全、清洁、经济、高效的能源,在我国能源保障领域、如期实现“碳达峰、碳中和”目标中正发挥积极作用,“十四五”时期,我国核电积极安全有序发展,有望按6~8台/年推进建设^[6]。在迎来重大发展的同时,一些问题也应引起足够重视,由于核能利用的特殊性和敏感性,近年来出现^[7]舆情事件,如2016年,江苏连云港中法“核循环项目”引发群体事件;2013年,广东江门核燃料循环项目遭受当地公众强烈反对事件;2011年,江西彭泽发生抗议内陆核电建设等“邻避”事件。

核能利用事业的发展离不开社会公众的理解和支持,除开展相关科普宣传外,深化核能利

用生态补偿,为核电厂属地人群带来切实利益,也是促进核能利用事业发展、建设生态文明和美丽中国的重要途径。

3 核能利用生态补偿基础研究

3.1 核能利用生态补偿初步可行性研究

我国核能利用领域尚未实施生态补偿制度,但现有部分实践行动已带有生态补偿的性质,同时因核能利用领域所涉及的范围特定,其补偿对象、资金来源主体简单,具备很强的生态补偿政策实施基础。

一是核电厂营运单位按照政策法规已缴纳或提存专项资金。《核安全法》第四十八条明确规定:核设施营运单位应缴纳乏燃料处理处置费……预提核设施退役、放射性废物处置费……其具体实践表现为:(1)设立基金,根据《核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法》,对已投入商业运行5年以上的核电机组征收乏燃料处理处置费用,每销售电网1千瓦时电量征收0.026元,用于乏燃料运输、贮存、后处理等支出;(2)放射性废物处置费,在各核电厂营运单位的集团层面制定处置费用标准,按产生体积提存处置费用,各核电厂设置单独账号^[8];(3)核设施退役费用,以某集团为例,其根据《核电厂建设项目经济评价标准》,在集团层面实施会计核算制度,按照一定的比例逐年从项目的发电收益中提取,但对退役费暂未进行专户管理。

二是核电厂所在地政府直接或通过地方国资委下属公司间接实际持有核电企业股份。截至2022年,我国大陆共有运营及在建核电厂23家^[9],经股权穿透分析,其中18家核电厂部分股权由所在地政府实际持有,见表1。地方政府实际持有辖区核电厂股份,参与公司经营,一方面可以享受企业业绩带来的红利,另一方面可以保证政府对生态资源的优化配置,修复补偿受损生态环境。

三是现存核能利用领域获益者主体简单且具备支付能力。现有生态补偿制度实施的难点之一是生态环境获益者或者说是补偿资金来

源主体,难以确定和难以实施,比如,对于林业生态领域,“三北”防护林为我国免受风沙侵袭起到重要作用,按照生态环境获益者支付原则,补偿资金应由获益的人民群众支付,这显然是不现实的;对于流域生态领域,下游地方政府应对上游政府因保护水环境付出的成本而支付,但当下游区域由多个地市组成,甚至是不同省份地市组成时,支付主体的确认以及不同主体支付额度的核定就会成为一项困难的工作。

对于核能利用领域,上述问题阻力则小得多,一方面核电企业占用属地土地、海域、水源、发展权等自然资源后发电盈利,从市场经济角度为经济获益方;另一方面核电作为一种清洁能源为国家能源安全、降低碳排放、推动美丽中国建设做出了贡献,生态环境获益者为人民群众,而现有核电企业通过股权穿透分析可知:截至2022年,我国大陆23家运营及在建核电厂的较大股东(股权占比>20%)为中国核工业集团有限公司、中国广核集团有限公司、国家电力投资集团有限公司、中国大唐集团有限公司、中国华电集团有限公司、国家能源投资集团有限责任公司以及浙江、广东等省国资委。核能利用领域生态环境获益者主体明确,且绝大多数主体为政府或国有企业背景,具有全民公益性。由其作为支付生态补偿的主体,即是由生态获益的人民群众支付,支付主体明确且简单,这也体现了我国经济所有制的优势。

对于支付能力,如以股权占比折算对应的发电量进一步分析,中国核工业集团有限公司、中国广核集团有限公司、国家电力投资集团有限公司三家企业可占2022年全国核能总发电量的80%以上。上述三家企业2022年年度报告显示^[10-12]:截至当年年底,中国核工业集团有限公司营业收入2627亿元,利润总额254亿元,控股7家上市公司,其中以核能利用为主业的中国核电总市值1291亿元,中国核建总市值253.64亿元;中国广核集团有限公司营业收入828.22亿元,利润总额152.43亿元,总市值1291亿元;国家电力投资集团有限公司营业

表 1 地方政府持股核电厂情况统计 (2022 年)

Table.1 The local government shareholding statistics of nuclear power plant (2022)

序号	核电厂名称	营运单位	实控或参股为地方政府的股东(持股比例)	股权穿透
1	红沿河核电厂	辽宁红沿河核电有限公司	大连市国有资本管理运营有限公司(10%)	大连市国资委
2	海阳核电厂	山东核电有限公司	山东发展投资控股集团有限公司(10%) 烟台蓝天投资控股有限公司(10%)	山东省国资委 烟台市国资委
3	田湾核电厂	江苏核电有限公司	江苏省国信资产管理有限公司(20%)	江苏省人民政府
4	秦山核电厂	秦山核电有限公司	浙江浙能电力股份有限公司(28%)	浙江省国资委
5	秦山第二核电厂	核电秦山联营有点公司	浙江浙能电力股份有限公司(20%)	
6	秦山第三核电厂	秦山第三核电有点公司	浙江浙能电力股份有限公司(10%)	
7	方家山核电厂	秦山核电有限公司	浙江浙能电力股份有限公司(28%)	
8	三门核电厂	三门核电有限公司	浙江浙能电力股份有限公司(20%)	
9	浙江三澳核电厂	中广核苍南核电有点公司	浙江浙能电力股份有限公司(34%) 温州市核能发展有限公司(9%) 苍南县海西建设发展有限公司(9%)	温州市国资委 苍南县财政局
10	宁德核电厂	福建宁德核电有限公司	福建福能股份有限公司(10%)	福建省国资委
11	福清核电厂	福建福清核电有限公司	福建省投资开发集团有限责任公司(10%)	
12	陆丰核电	中广核陆丰核电有限公司	中国广核电力股份有限公司(100%)	广东省国资委通
13	太平岭核电厂	中广核惠州核电有限公司	中国广核集团有限公司(100%)	过实控广东恒健
14	岭澳核电厂	岭东核电有限公司	中广核核电投资有限公司(45%)、广东核 电投资有限公司(30%)、中国广核电力股 份有限公司(25%)	投资控股有限公 司入股中国广核 集团有限公司
15	大亚湾核电厂	广东核电合营有限公司	广东核电投资有限公司(75%)	
16	台山核电厂	台山核电合营有限公司	台山核电产业投资有限公司(47.5%)、中国 广核电力股份有限公司(12.5%)、广东核电 投资有限公司(10%)	
17	阳江核电厂	阳江核电有限公司	中国广核电力股份有限公司(34%)、广东 核电投资有限公司(25%)、中电核电(阳江) 有限公司(17%)、广东省能源集团(17%)、 中广核一期产业投资基金有限公司(7%)	
18	防城港核电厂	广西防城港核电有限公司	广西广投能源集团有限公司(39%)	广西人民政府

收入 504.89 亿元,利润总额 40.79 亿元,总市值 298.29 亿元。相关企业主体经济实力雄厚,同时作为国有企业,在一定程度上具备实施核能利用生态补偿的能力和条件。

四是核能利用领域生态补偿市场交易基础好。党的十九届五中全会提出要完善市场化、多元化生态补偿。近些年来,生态补偿在市场和多元化的机制建立方面取得了一定的成绩,如

中央发布《建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动计划》,安徽省出台《探索建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动方案》,但我国目前生态保护补偿主要采取财政转移支付的方式。这是由于我国的所有制结构和市场运行机制与外国不同,《物权法》第四十六条至第四十九条规定自然资源及野生动植物资源属于国家所有。我国生态环境资源产权集中,包括所有、使

用、收益、转让等权利均归国家所有。从而导致目前生态补偿形式多为上级政府向下级、同级政府横向的财政转移支付^[3]，同时，资金渠道单一，这在一定程度上导致生态补偿政策推行效率不高，给部分地方政府带来财政负担。

核能利用领域由于行业的特殊性，产业、资金、技术、安全的限制推高准入门槛高，现有主要企业均为上市公司，其融资渠道多、利用市场手段解决问题能力强、相关市场制度健全，因此具备较高的市场化、多元化基础。

3.2 “类生态补偿”措施不足

上节已指出核能利用领域现有部分实践行动已带有生态补偿的性质，但这些“类生态补偿”措施远远不足以满足生态补偿实际需求。

一是现有提存资金项目范围不足，未覆盖核电厂对生态环境减损的全过程和总领域。核电厂提存的三种资金项目仅针对运行期间产生的固体放射性废物及退役，而诸如温排水影响、放射性流出物排放、厂址土地及海域占用、规划限制区内发展的机会成本等方面并未得到补偿。

二是现有提存资金额度并未得到精确核算。一方面，除乏燃料处理处置费有明确的提存标准外，其余两种资金项目标准由各集团自行，缺乏指导政策法规文件。另一方面，三种资金项目提存偏低且并未充分考虑核能利用实际，如乏燃料处理处置费按照已投入商业运行五年以上压水堆核电机组的实际上网销售电量征收，并未考虑机组临停及额定功率不满发状态；放射性废物处置费为一次性费用非长期费用，而按照放射性固体废物处置要求，中低放废物处置至少需数百年有效包容和隔离、高放废物需永久处置；现有资金项目标准为静态，而非动态可调。

三是地方政府持股核电厂虽取得一定收益，但减损了生态补偿权益。按照公司法规定，股东持股需认缴出资。在实践中，部分地方政府会通过减额或减免土地出让金、让渡公共资源等方式冲抵出资，更由于地方政府的股东身份，当核电厂缴纳“类生态补偿”资金时，本

质上地方政府也在按持股比例缴纳。当核电厂退役时，地方政府也会因为股东身份在法律和实际上承担不符合生态环境公共利益代表人的额外责任。

四是各地方政府持股核电厂获益不均。由表1可知，一方面虽然目前18家核电厂部分股权由所在地政府持有，但广东省、浙江省因我国核电发展的历史先发优势使得其较其他地方政府更易投资获益，如广东省国资委通过实控广东恒健投资控股有限公司入股中国广核集团有限公司，因此，对于凡是中广核集团为股东的核电厂，广东省政府均可获益；另一方面持股核电厂的地方政府行政级别绝大多数为省级，而核电厂所在的地（市）级、县级政府因行政级别、自有资金有限等原因无法或只能少量入股，而不能获得收益。

3.3 补偿与赔偿

不同于常规环境领域存在的生态损害赔偿，核能利用领域特别规定了核损害赔偿义务，厘清生态补偿与核损害赔偿之间关系是核能利用领域实施生态补偿制度的必要理论准备。

一是依据不同。核损害赔偿基于民事法律，生态补偿则需专门立法或专门政策办法^[13]。

二是目的不同。核损害赔偿的目的是弥补核与辐射损害，即是基于损害实施将发生的情形下的法律责任追究，而生态补偿是在法律允许生态环境损失的前提下，通过一定经济规律，调整生态环境受损者与获益者之间利益平衡的制度，是一种公平分摊。

三是对象不同^[13]。核损害赔偿的对象可以是受到核与辐射具体损害的自然人、法人和组织；由于我国自然资源的所有权制度规定，难以向个人分配，生态补偿的对象通常由政府作为公共利益的代表人接受。

另外，核损害赔偿与生态损害赔偿在责任性质上也存在较大差异。根据《核安全法》第九十条规定，核损害赔偿责任是无过错责任，即除战争、武装冲突、暴乱情况外，无论核电厂营运单位是否有过错，都要承担核损害赔偿责任，而生态损害赔偿是一种过错责任^[14]。

4 小结与建议

2024年2月23日,国务院第26次常务会议通过了《生态保护补偿条例》(以下简称《条例》),自2024年6月1日起施行。《条例》以综合性、基础性行政法规形式规定了我国生态保护补偿基本制度规则。结合上文1.1节,目前,我国生态补偿的实践领域主要集中在森林、草原、湿地、水流、荒漠、耕地、重点生态功能区等,实践的具体主体一般为省级或部分发达城市,实践的具体细化依据为地方法规、规章或办法方案。

虽然核能利用尚未纳入《条例》分类补偿范围,但随着习近平生态文明思想的全面贯彻落实,美丽中国建设的深化推进,能够预测其终究会成为生态保护补偿新的实施分类。

同时,核能利用领域因其特殊性和相对封闭性,结合现有“类生态补偿”措施,其具有一定的实施特点:

①对于核能利用领域的补偿来源,通过政策规范和市场调节手段,将由政府转移支付探索为政府向核能企业征收专项生态补偿资金为主、政府转移支付为辅的方式,将“输血式”拨款升级为“造血式”补偿,减轻政府负担,从而推动补偿永续供给。

②对于补偿运作,可通过加强规划,统筹生态补偿资金,充分利用政策和市场调节,用足用好碳排放交易、放射性流出物排放控制、“绿电”支付、设立补偿基金等方式手段,提高市场化运作水平,拓宽市场化融资渠道。

③对于补偿分配,可将筹集资金设立属地补偿和国家统筹两部分,属地补偿部分用于核电厂所在地的生态补偿,国家统筹部分则在全国层面用于核能利用的生态补偿。

④对于补偿监督,可以在国家及地方监督、民意机关下设相关机构,一方面对补偿标准、

资金筹集运作和使用开展监督,另一方面对实体生态恢复结果进行监督,并纳入绿色GDP考核。

参考文献

- [1] 国家发展改革委地区振兴司. 关于开展《生态保护补偿条例》(公开征求意见稿)公开征求意见情况的通告[S]. 2020-12.
- [2] 国家统计局. 核电生产电力量(亿千瓦时)[EB/OL]. [2023-6-28]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A070S&sj=2023>.
- [3] 钟绍峰. 生态补偿机制的比较研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [4] 徐素波. 生态补偿问题国内外研究进展综述[J]. 生态经济, 2022, 31(2): 150-157.
- [5] 董战峰. “绿水青山就是金山银山”理念实践模式与路径探析[J]. 中国环境管理, 2020(5): 11-17.
- [6] 江毅. 抓住核电发展良好战略机遇期合力推动我国核电事业可持续高质量发展[EB/OL]. [2023-6-13]. <http://www.heneng.net.cn/index.php/home/hd/infotwo/id/70879/sid/162.html>.
- [7] 张蔚华. 核安全公众沟通若干问题的探索[J]. 辐射防护, 2021, 41(3): 271-275.
- [8] 张蔚华, 张一民, 郭海峰, 等. 运行核电厂放射性固体废物管理实践与探讨[J]. 核安全, 2022, 21(1): 19-25.
- [9] 国家核安全局. 监管对象数据库[EB/OL]. [2022-12-31]. <http://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/jgdxsjk/hdc/yxhdjz/>.
- [10] 中国核工业集团有限公司. 中国核工业集团有限公司2022年度报告[R]. 2023-3.
- [11] 中国广核集团有限公司. 中国广核集团有限公司2022年度报告[R]. 2023-4.
- [12] 国家电力投资集团有限公司. 国家电力投资集团有限公司2022年度报告[R]. 2023-4.
- [13] 郭武, 张翰林. 论生态环境损害赔偿与生态补偿的适用甄别[J]. 云南民族大学学报, 2021, 38(5): 151-160.
- [14] 许安标, 刘华, 王毅韧. 中华人民共和国核安全法释义[M]. 北京: 中国民主法制出版社, 2017: 202-203.
- [15] 经济参考报. 央地生态保护补偿机制加速铺开[EB/OL]. [2021-06-07]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/202106/t20210607_578219.html.

Explore the Ecological Compensation of Nuclear Energy Utilization

Zhang Weihua, Su Junjie, Wang Xingbiao, Xu Xingjia, Zhang Weihua*

(Northeast China Regional Office of Nuclear and Radiation Safety Inspection, MEE, Dalian 116001, China)

Abstract: In order to promote the development of nuclear energy utilization, safeguard the public's environmental rights and interests, and promote the construction of ecological civilization, through the feasibility analysis of ecological compensation in the current field of nuclear energy utilization, relevant exploration and research are carried out, and opinions and suggestions are put forward, which has certain practical significance for building a benign interaction between ecological protectors and beneficiaries, and promoting sustainable economic and social development.

Key words: nuclear energy utilization field; ecological compensation; feasibility analysis

(责任编辑：徐晓娟)

顾海荣,陈军琦,李现锋,等. 企业集团层级核与辐射安全监督评估模式的创新实践[J]. 核安全,2024,23(3):88-93.

Gu Hairong, Chen Junqi, Li Xianfeng, et al. Innovative Practice of Nuclear and Radiation Safety Inspection and Assessment Model at Enterprise Group Level [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 88-93.

企业集团层级核与辐射安全监督评估模式的创新实践

顾海荣, 陈军琦, 李现锋, 张志飞, 陈朝晖, 胡小民

(中广核核电运营有限公司, 深圳 518031)

摘要: 本文通过介绍国内大型核电企业集团在集团层级的核与辐射安全监督评估模式的创新实践, 与核电同行共同探讨在核电厂作为运行许可证持有者并承担全面责任的核安全法律框架下, 控股企业集团如何对下属核电厂实施核与辐射安全监管。本文以某大型核电集团为例, 重点介绍集团层级核与辐射安全监督评估相关的组织架构、管理体系、团队组成、监督评估的实施、问题的跟踪闭环、改进支持和结果应用等问题。

关键词: 核电企业集团; 核与辐射安全; 监督; 评估

中图分类号: TL48 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0088-06

我国的核能利用虽然起步较晚,但是一直保持着较好的安全业绩和良好的发展势头。40年来,我国的核与辐射安全监管工作始终以国际最高标准为引领。监管能力基本达到了国际先进水平,有力保障了中国从核大国向核强国转型。

在中国核安全观引领下,核与辐射安全监管部门结合我国核能发展的趋势和现状,进一步完善核与辐射安全监管架构,构建了以法律法规、行政监管、行业自律、技术保障、人才支撑、文化引领、社会参与和国际合作等为主体的核安全治理体系。核安全高于一切,确保安全万无一失的发展理念已逐步成为共识。核电行业主管部门、核与辐射安全监管部门、社会公众以及核电企业集团和核电厂自身都对核与辐射安全的监管提出了更高的要求。

目前,我国共有运行核电机组 55 台。在

中国从核电大国向核电强国发展的历程中,核与辐射安全监管体系发挥了保驾护航的重要作用,也是核电安全发展和可持续发展的重要基础。国家监管体系和核电企业自律监管体系经过重大改进,逐步形成了核与辐射安全监管的纵深防御系统,共同构成了中国特色的核与辐射安全完整的体系保障。

某核电集团是一家以核电为特色的大型企业集团。该集团已有 27 台核电商运机组、6 个商运核电基地和 3 个在建核电基地,拥有近 300 堆年的核电厂运维历史,在核电安全管理、工程建设和生产运维等领域有着丰富的经验;在核电多基地安全管理方面,建立了企业集团层级核与辐射安全监督评估模式;企业集团核与辐射安全自律监管能力走在行业同行前列。下面重点探讨该核电企业集团层级核与辐射安全监督评估相关的实践。

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2023-10-30

作者简介: 顾海荣 (1977—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电厂核与辐射安全监督评估工作

1 集团层级核与辐射安全监督评估相关的组织架构

我国核安全法规规定：核电厂营运单位对核电厂的安全运行负有全面的责任^[1]。因此，各核电厂作为运行许可证的持有者负有法规规定的核安全责任。对核动力厂控股的企业集团(以下简称企业集团)应当在其职责范围内采取有效措施使其满足《核动力厂管理体系安全规定》的适用要求：应当按照相关规定的要求，在核动力厂营运单位人员配置、核安全管理和财务保障等方面，建立和实施有效的监督和考核制度，以确保营运单位能够履行核安全的全面责任^[2,3]。该核电集团层级的核安全监督管理组织架构的设置，满足最新的核安全法规要求，并重点考虑核电企业集团的核安全自律、集团品牌形象、公众对核安全的信任度、核电行业的可持续发展以及集团在核安全政策方面的导向等重要因素。

集团公司围绕六大在运核电基地和三大在建核电基地的安全生产和工程建设的目标任务，构建“三层三线”组织管理体系，即集团公司决策层、管理层、协调层，业务管理线、安全监督线、安全评估线，实现对电厂安全的有效管控、监督和支持，确保总部决策的有效执行、标准化落实和集约优势的发挥。

同时，为发挥核安全独立监督的安全屏障作用和贯彻核安全高于一切的理念，安全监督线、评估线与业务管理线完全独立，并保持安全监督评估线向集团公司决策层和管理层独立报告的通道畅通。独立性是核与辐射安全监管客观、专业的重要保障。

该核电集团层级建立了核电独立安全监督评估中心(以下简称“核安监中心”)。该中心专注于核与辐射安全监督评估的体系建设和能力建设，并定期组织开展监督评估工作。核安监中心是集团层级的监督评估独立机构，对集团公司领导负责，主要职能包括建立集团核与辐射安全监督评估制度和监督评估标准，采取统一标准对核电厂安全生产相关领域进行全面评

估，给出评估结果和相关建议，为集团领导提供决策参考，帮助集团公司的核电业务部门和各核电厂认识安全现状，梳理核与辐射安全管理的改进方向。

集团层级核安全监管相关的组织架构与国家核安全监管部门、国际原子能机构(IAEA)和世界核电运营者协会(WANO)等外部组织相结合，形成多道屏障、纵深防御的核电安全保障体系。

2 核与辐射安全监督评估的管理体系

为了确保集团公司核与辐射安全监督评估相关工作的规范有序开展，集团层级建立监督评估的完整体系，包括集团制度程序、管理程序、评估标准和评估导则等共计31份体系文件，管理体系结构如图1所示。评估标准结合各核电厂管理水平及最新的法规标准及时升版。

集团制度中明确核与辐射安全监督评估是集团核安全管理的重要抓手，是强制性的核安全监督管理措施。核安监中心组织评估团队以评估标准为依据，以核电厂事实为基础，坚持独立、客观、专业的工作原则，负责组织、实施核与辐射安全的监督评估。一方面帮助核电厂识别正面项和负面项，提出改进建议；另一方面梳理出共性问题，提出改进集团公司核与辐射安全管理导向的意见和建议，促进持续提升整体核安全管理水平和核电安全生产业绩。

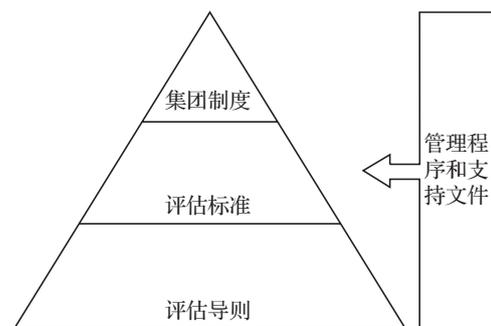


图1 集团层级监督评估管理体系结构

Fig.1 Group-level Inspection and evaluation system

核与辐射安全监督评估划分为十大领域，各个领域根据覆盖的专业范围建立集团层级的

评估标准。评估标准以核电同行先进的管理和技术经验为基准,以确保核与辐射安全为核心,遵循以下四项基本原则:严格遵守国家的相关法律、法规;紧密结合集团管理期望并体现集团核安全管理导向;全面维持集团公司在运核电厂的良好实践;充分采纳国际同行(IAEA、WANO等)的良好实践。

集团层级的核与辐射安全监督评估覆盖了核电厂安全生产相关的所有重要领域,包括核安全、运行、维修、大修与备件、技术支持、设备可靠性与经验反馈、辐射防护、消防、化学环境、工业安全与核安保等领域,将每个领域分解成若干个评估项目,每个项目包含若干个安全目标,共有 51 个评估项目和 154 个安全目标,针对每一个安全目标,制定了若干个包括结果导向和过程导向的评估标准。评估标准的结构如图 2 所示。

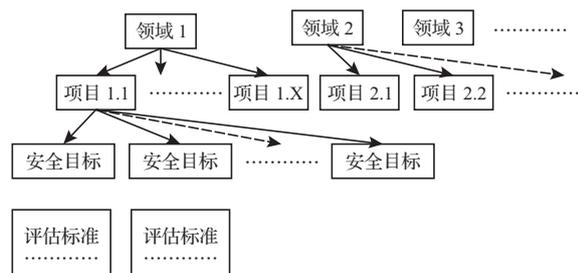


图 2 监督评估标准结构

Fig.2 Structure of evaluation standard

在进行核与辐射安全监督评估时,评估团队针对各评估项目中所设定的核安全管理目标,对照评估标准进行检查,对每一个安全目标和项目给出定性和定量评价。

3 核与辐射安全监督评估团队组成

参考国内外核电同行评估的实践,评估团队一般采用兼职团队、专职团队、专职与兼职相结合三种模式。兼职团队的优点是资源需求最小,弊端是团队组织松散、监督评估结果的一致性和可比性较弱;专职团队的优点是专家队伍固定、团队协调性强、监督评估效率高、结果的可比性强,弊端则是专家资源需求较大,且由于

缺少兼职的专家参与,不利于团队的梯度建设和专家储备;专职和兼职相结合的方案可以将上述两种方案的优势得以保留并可以弱化相关弊端。

该核电集团层级的核与辐射安全监督评估团队的组建选择第三种方案,即专职专家与兼职专家相结合的方案:日常期间建立并维持一支最小编制的专职专家团队,同时建立监督评估的同行专家库,并对同行专家进行培训和授权。核与辐射安全监督评估的体系维护、专项支持,以及评估期间的主要工作由专职专家完成,评估团队的组成也以专职专家为主,必要时从专家库中选择兼职专家参与。

专家选聘条件包括:具有良好的个人素养、丰富的核电厂管理和技术背景,在各自的业务领域具有较高的权威性、求真务实和敢于直言的精神。目前,该核电集团建立了覆盖核电厂安全生产所有重要领域的专职专家团队,团队的 13 位专职专家均是长期在核电厂一线从事技术和管理工作的骨干人员,共拥有 323 堆年的运行核电厂工作经验。

4 核与辐射安全监督评估的组织实施过程

集团公司层面对各个电厂开展多层次、多领域的安全监督检查活动,其中由核安监中心组织实施的全面安全监督评估每 18 个月一次,定期开展。核安监中心根据年度计划和 5 年监督评估计划,对集团下属的在运核电厂开展全面的核与辐射安全监督评估,监督评估相关程序明确了评估准备、现场评估的组织、评估团队的配置运作、现场评估的方法和评估结果的分析方法等内容。监督评估方式包括对生产活动的观察、过程文件的查阅及各个层面的访谈,以及大修观察、模拟机观察和演练演习观察等。

监督评估团队通过全面深入的样本采集,对照评估标准和安全目标,对评估事实进行分析和分类,通过对事实的归纳提炼,全面客观地评估核电厂的核与辐射安全状态,发现安全管理上的深层次问题。

监督评估活动一般需要3个月的时间,分为评估准备、驻厂评估和报告编写3个阶段,其中驻厂评估时间为两周,报告编写时间约为一个月。评估团队在准备阶段查阅核电厂所有生产活动的相关资料 and 文件,关注最近一个评估周期内所有的生产信息。

核电厂在大修期间开展的维修活动和运行操作占年度总量的80%以上,部分操作或厂房区域只有在机组大修期间才能观察到,例如启停堆操作、装卸料操作、反应堆厂房的状态和反应堆厂房相关活动等。因此,在评估准备阶段,评估团根据被评估电厂的大修计划,安排大修现场观察。大修观察可以确保监督评估对核安全重要事项的全面覆盖,使得监督评估能够真实、全面地反映核电厂在大修和日常运行期间的安全管理现状。

驻厂评估期间,评估人员根据准备阶段发现的问题以及评估标准的要求,通过现场检查、查阅文件和记录、访谈核电厂人员等多种方法,收集相关事实。驻厂评估期间管理访谈的比重较大,评估重点聚焦于安全管理相关的深层次问题。同时,访谈的另一个重要目的是保证评估专家真实全面地了解相关事实。评估专家通过了解事实背后的根本原因,以及与核电厂对口人的交流,共同探讨原因和改进的方向。

5 核与辐射安全问题的跟踪闭环

集团层级的核与辐射安全监督评估的内容包括对上一次评估改进建议的落实情况进行评价,对照评估标准监督评估核电厂安全生产重点关注项,以及集团公司安全生产的管理关注事项。

在评估准备阶段,评估专家分析上次监督评估中提出的改进建议的重要负面项,确定需要在监督评估中重点评价的绩效偏差和管理偏差,通过现场观察、人员访谈、文件检查等,评价相关绩效偏差和管理偏差的改进情况,分析上次评估发现的安全绩效风险或管理偏差是否得到有效改进。

监督评估过程综合评价每项改进建议有关的绩效偏差及管理偏差的改进情况,主要根据核电厂采取的改进措施是否有针对性、评估周期内相关业绩情况和上次提出的风险点是否消除三个维度,对改进绩效进行评级。评级有关闭改进建议、需要继续推进、需要加大力度或调整措施、改进绩效不满意四个级别,分别以绿、黄、橙、红四个颜色表示,并给出所占百分比,以反映核电厂改进的情况。

6 集团层级对核电厂的支持改进

国家核安全法规规定,核电厂是核安全的责任主体。各核电厂根据监督评估提出的改进建议制定并落实纠正措施。集团公司各部门对核电厂改进提供支持。

集团公司核能管理部统筹多个核电基地的改进建议和集团管理改进要求,组织资源和技术力量对核电厂制定的改进行动进行审查,支持核电厂改进安全管理水平,并统筹考虑良好绩效在核电各基地的推广应用。集团公司安全质量环保部建立相关的监督机制,监督推动核电厂落实各项改进行动。

集团核安监中心定期开展核电厂核与辐射安全监督评估,提出改进建议,并对核电厂提供支持,进一步解读评估发现的问题,以确保核电厂对改进建议和相关风险的全面认识,以及相关问题的改进闭环,帮助核电厂持续改进和提升核与辐射安全管理水平。(核与辐射安全支持改进流程如图3所示)

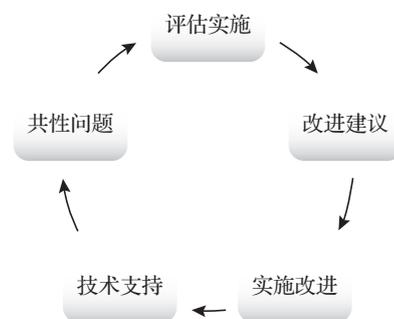


图3 核与辐射安全支持改进流程

Fig.3 Process of nuclear and radiation safety support

集团核安监中心对核电厂核与辐射安全的个性问题,在核电厂改进过程中结合核电厂的需求提供专项技术支持。核安监中心还定期结合多个核电基地以及国内外核电同行在核与辐射安全方面的问题开展核电厂共性问题分享和交流会。

7 核与辐射安全监督评估的结果应用

核与辐射安全监督评估的各领域围绕安全目标,对照每一条评估标准,识别出核电厂现状与评估标准的偏差程度,对安全目标和项目进行综合评价,通过技术和管理两个维度的分析,总结核电厂的良好绩效,提出改进建议,并编写领域评估报告。

评估团长和副团长根据评估准备、实施中发现的问题以及与核电厂管理层的访谈情况,编写监督评估总体报告,提出集团管理层和电厂管理层需要关注的问题。总体报告的对象主要是集团公司管理层和核电厂的管理层。总体报告简明扼要地描述核电厂核与辐射安全管理的总体状态,包括上次改进建议的落实情况、本次评估核电厂重点关注事项、本次评估新提出的改进建议等内容,还将结合各个核电基地的现状给集团管理层提出核安全管理的导向性建议。

集团层级的核与辐射安全监督评估实施以来,核安监中心提出了与核电厂安全管理相关的事实共计5万余项,提出改进建议约580项(见表1),在持续提升核电厂和企业集团核与辐射安全管理水平、维持集团对核电厂安全的有效监管方面起到了重要作用,保障了集团新的核电基地快速走向成熟。成熟核电基地安全业绩始终保持国际同行的较高水平。

表1 监督评估的改进建议和良好绩效分布情况
Table 1 Distribution of suggestions and good performance

领域	SM	OP	MA	TS	OT	RP	FP	ER	CE	HK
改进建议	62	86	79	62	24	73	61	28	55	54

续表

领域	SM	OP	MA	TS	OT	RP	FP	ER	CE	HK
良好绩效	14	13	13	25	0	26	19	2	18	5

注:代码对应的领域分别为,SM 核安全;OP 运行;MA 维修;TS 技术支持;OT 大修与备件;RP 辐射防护;FP 消防;ER 设备可靠性与经验反馈;CE 化学环境;HK 工业安全与核安保。

8 结语

《核动力厂管理体系安全规定》《核动力厂调试和运行安全规定》要求控股核动力厂的企业集团在核安全管理等方面,建立和实施有效的监督和考核制度,确保营运单位能够履行核安全的全面责任^[3]。建立和实施企业集团层级的核与辐射安全监督评估模式是国家核电安全监管框架的重要组成部分,在确保核电厂遵守法规和核安全监管机构的依法监管之间,加强了集团层级的监管屏障。

该核电集团层级核与辐射安全监督评估模式的创新实践可以作为一种参考方案。核电企业集团通过独立于管理线的监管组织和监管体系,建立高于法规要求的核与辐射安全监督评估标准,定期开展核电安全的监督评估,使集团掌握各核电厂全面真实的核与辐射安全状态,为核电企业集团安全管理水平的全面提升提供保障,同时加强企业集团层面的核与辐射安全监管能力,加大核安全保障方面的投入,体现核电企业集团的安全自律和积极履行社会责任的管理导向。

参考文献

- [1] 全国人大常委会办公厅. 中华人民共和国核安全法 [M]. 北京: 法律出版社, 2017.
- [2] 国家核安全局. 核动力厂调试和运行安全规定: HAF103 [S]. 北京: 国家核安全局, 2022.
- [3] 生态环境部. 核动力厂管理体系安全规定 [S]. 北京: 生态环境部, 2020.

Innovative Practice of Nuclear and Radiation Safety Inspection and Assessment Model at Enterprise Group Level

Gu Hairong, Chen Junqi, Li Xianfeng, Zhang Zhifei, Chen Zhaohui, Hu Xiaomin

(CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: This article introduces the innovative practice of nuclear and radiation safety independent inspection and assessment model at the headquarters of a large domestic nuclear power enterprise group. It's trying to discuss with nuclear power peers, under the nuclear legal framework in which the nuclear power plant is the licensee and fulfill obligations, how can enterprise groups establish a model to conduct nuclear and radiation safety inspection over from the nuclear power plants? It takes one large nuclear energy enterprise group as an example, focusing on the organization, management system, team recruiting, evaluation implementation, management closure, supporting loop, results application and other issues related to group-level nuclear and radiation safety inspection and assessment.

Keywords: nuclear power enterprise group; nuclear and radiation safety; inspection; assessment

(责任编辑：徐晓娟)

孙峰平. 核电厂严重事故日常管理经验总结与发展建议[J]. 核安全, 2024, 23(3):94-98.

Sun Fengping. Summary of Daily Management Experience and Development Suggestions for Serious Accidents in Nuclear Power Plants [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3):94-98.

核电厂严重事故日常管理经验总结与发展建议

孙峰平

(国电投莱阳核能有限公司, 烟台 265200)

摘要: 福岛核事故后, 核电厂高度重视严重事故的应对。核电厂为维持和提升应对严重事故的能力, 加强了设备、人员和文件的管理措施, 并落实到相应的管理程序中。在严重事故日常管理中, 核电厂发现了燃油标号不满足要求、应急移动泵无定期试验项目、钥匙管理不规范和未开展移动设备充足性评价等典型问题, 并提供了相应的改进措施。本文针对严重事故管理导则电子化、移动设备接入系统试验、移动设备操作错配和严重事故管理导则框架更新等当前仍然存在的问题进行了探讨, 并给出了建议。

关键词: 严重事故; 日常管理; 严重事故管理导则; SAMG; 福岛; 移动设备

中图分类号: TL48 **文章标志码:** B **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0094-05

福岛核事故以后, 国家核安全局于 2012 年发布了《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求(试行)》(以下简称《通用技术要求》), 以规范各核电厂共性的改进行动。根据《通用技术要求》, 核电厂增加了移动电源车、移动泵、防洪措施和移动补水接口等设备设施, 编制了适合核电厂配置的严重事故管理导则(SAMG)和 SAMG 下游操作单, 并制定了包括预维、试验、演练等管理措施, 用以提升核电厂应对严重事故能力, 提高核电厂核安全水平。

1 核电厂严重事故日常管理措施介绍

核电厂严重事故日常管理是指为保持和提升核电厂应对严重事故的能力所采取的管理措施。核电厂严重事故日常管理主要可以分为设备、人员和文件三类。

1.1 设备类管理措施

设备类的管理措施主要包括应急移动设备

的预维 / 试验、防水挡板的定期巡检、应急移动设备库的巡检^[1]等。

表 1 为某核电厂严重事故日常管理设备类管理措施。

表 1 设备类管理措施

Table 1 Management measures for equipment categories

序号	设备	项目
1	移动泵 (包括软管)	柴油机电气维护
		柴油机本体检查维护 / 局部解体
		柴油机单体定期试验 / 泵小循环试验
		泵局部解体 / 泵解体大修
		油务监督
2	移动电源车	柴油机电气维护 / 局部解体
		柴油机本体检查维护 / 局部解体
		柴油机发电机解体大修
		柴油机发电机定期试验
		油务监督

收稿日期: 2023-09-20 修回日期: 2023-11-15

作者简介: 孙峰平(1979—), 男, 高级工程师, 学士, 现主要从事核电厂核安全监督管理、质量保证相关工作

续表

序号	设备	项目
3	车头	启动试验 定期维护
4	防水挡板	定期巡检
5	福岛事故新增阀门	检查维护
6	应急移动设备库	定期巡检

针对上述设备定期试验和巡检发现的问题,核电厂一般以处理缺陷的方式,通过消缺流程进行处理。部分被纳入机组技术规格书管理的设备不可用一旦被识别,相应机组进入相应的运行限制条件(LCO),计时并跟踪设备功能恢复情况。

1.2 人员类管理措施

人员类的管理措施主要包括进行人员培训、演练^[2]、确保人员资格和人员数量等。表2为某核电厂严重事故日常管理人员类管理措施。

表2 人员类管理措施

Table 2 Management measures for personnel categories

序号	培训课程 / 演练类型	参加人员
1	移动设备的启动(司机)课程培训	应急移动设备司机
2	移动设备的启动(运行)课程培训	运行控制组移动设备操作人员
3	应急指挥部严重事故管理总体培训	应急总指挥、副总指挥、总指挥助理 A/B、技术秘书
4	运行控制组执照人员严重事故管理导则培训	运行控制组执照人员
5	技术支持组严重事故管理导则培训	技术支持组
6	堆芯损坏缓解课程培训	操纵人员
7	严重事故模拟机培训	操纵人员
8	严重事故演习(含应急移动设备)	技术支持组、运行控制组、应急指挥部

1.3 文件类管理措施

某核电厂编制了“严重事故管理”“应急移动设备调度”“事故处理专用设备管理”等程序,以规范严重事故管理;将 SAMG 和 SAMG 下游操作单配发到相应的岗位上,具体配发情况见表3。

表3 SAMG 配发情况

Table 3 Distribution of SAMG

序号	地点	严重事故管理导则配置数量 / 套	严重事故管理导则执行操作单数量 / 套
1	主控室	3	3
2	备用控制室	1	N/A
3	技术支持中心	2	N/A
4	应急指挥中心	1	N/A
5	模拟机房	3	3
6	备用控制室模拟机房	1	N/A

严重事故相关文件日常管理主要依据技术文件配发流程和定期审查流程进行源头管理。应急设施的管理部门每月对所管理设施内文件的版本和数量进行检查,并将检查结果备案至应急管理部门。应急管理部门定期进行独立检查,保证 SAMG 升版、配发和检查体系运作有效。

2 典型问题及改进措施

国内核电厂连续多年对严重事故日常工作开展了专项检查活动,并接受了 WANO 同行评估。通过专项检查和同行评估,核电厂发现了一些典型问题,主要如下。

2.1 移动设备车辆牵引头配置不足

检查发现,某核电厂除福岛核事故后新增的 6 kV 和 400 V 移动电源车自带车头外,包括 4 台移动泵车、1 台软管车、2 台 400 V 电源车在内的其他移动设备共用一台牵引头。事故时可能由于牵引头不足而无法及时将移动设备拖运到规定位置,从而影响严重事故缓解。

针对该问题,核电厂经过评估,将燃料运输车牵引头纳入应急牵引头进行管理,保证事故时有足够的牵引头可用。

2.2 燃油标号不满足最恶劣天气情况下柴油机启动要求

检查发现,某核电厂移动电源车使用的柴油标号为0号,而0号柴油的低温启动性能不能包络冬季情况下移动电源车正常启动要求,可能导致冬季工况下移动电源车不能正常启动,从而影响移动电源车功能的实现。

针对该问题,核电厂将移动电源车的柴油更换为-10号,以确保移动电源车在低温情况下可靠启动。

2.3 移动泵试验项目存在缺失

检查发现,某核电厂移动泵日常仅开展柴油机部分的空载试验,未设置泵的定期试验;泵维护后未设置品质再鉴定要求。这可能导致移动泵维护或维修后无法确定泵是否可用。

针对该问题,核电厂咨询生产厂家后采用自带水箱再循环试验进行品质再鉴定和定期试验,以确保泵的可用性。

2.4 钥匙管理存在不足

某核电厂检查发现移动设备配置有多把不同的钥匙用于开启移动设备车库卷帘门、开启牵引头车门、启动牵引头、开启移动设备车厢门和启动移动设备等。但是这些钥匙有的由值班司机持有,有的在值班保安处放置,有的在设备抢修组放置,任一钥匙没有带到现场都将影响移动设备应急功能的实现。

针对该问题,核电厂将移动设备车库卷帘门钥匙放置于车库外墙上的钥匙箱内,将启动移动设备的钥匙放置于相应车辆的车厢内,避免由于钥匙的原因影响设备应急功能。

2.5 未设置严重事故管理绩效指标

在 WANO 对某电厂进行同行评估时,专家提出其未设置严重事故管理绩效指标,无法发现严重事故日常管理中存在的薄弱环节。

针对该问题,该核电厂设置了包括设备预维执行率、人员培训完成率、定期试验合格率和演习完成率等维度指标,通过指标对严重事故

管理绩效进行监测,具体见表4。

表4 严重事故管理绩效指标
Table 4 Performance indicators for severe accident management

指标	统计项目	指标
设备维护执行率	6 kV 移动电源车	绿灯:预维执行率 $\geq 90\%$
	400 V 移动电源车	黄灯: $82\% \leq$ 预维执行率 $< 90\%$
	移动泵柴油机 移动泵	红灯:预维执行率 $< 82\%$
定期试验执行率	6 kV 移动电源车	绿灯:定期试验执行率 $\geq 92\%$
	6 kV 移动电源车(离线)	黄灯: $85\% \leq$ 维护执行率 $< 92\%$
	400 V 移动电源车(离线)	黄灯: $85\% \leq$ 维护执行率 $< 92\%$
	400 V 移动电源车(在线)	黄灯: $85\% \leq$ 维护执行率 $< 92\%$
严重事故相关培训完成率	移动泵(离线)	红灯:维护执行率 $< 85\%$
	移动泵车柴油机(空载)	红灯:维护执行率 $< 85\%$
严重事故培训完成率	严重事故培训	绿灯:培训完成率 $\geq 100\%$
	严重事故培训	红灯:维护执行率 $< 100\%$
演习完成率	严重事故演习	绿灯:演习完成率 $\geq 100\%$
	严重事故演习	红灯:维护执行率 $< 100\%$

2.6 移动设备的充足性

在 WANO 对某核电厂进行同行评估时,专家提出其虽然设置了多台电源车,但是依然不满足业内良好实践 N+1 的要求,未对当前移动设备配置充足性进行评价。

针对该问题,核电厂委托设计院,采用多机组严重事故组合对移动设备可用性要求进行分析评价。设计院分析认为该核电厂当前移动设备配置情况满足多机组严重事故分析准则。

3 问题探讨

3.1 严重事故管理导则电子化

部分核电厂进行了严重事故管理导则电子化^[3],即通过软件实现了 SAMG 执行步骤的标记、跳转等。电子化导则的优点是可以从网络系统中读取机组系统、设备参数,自动判断导则

的进入、退出条件,判断设备的可用性,直观显示机组关键参数,计算并显示当前机组处于计算辅助 CA 的区域,甚至部分核电厂实现了严重事故发展的预测。但是,电子化导则也面临一些问题,如:

(1) 电子化导则升版需要通过软件开发商才能进行,导致电子化导则升版落后于实际导则;

(2) 部分电子化导则建立在办公系统中,由于办公系统可靠性差,可能导致事故时电子化导则不能使用;

(3) 实现严重事故序列预测的电子化决策系统可能由于事故序列不全而不能准确地预测事故发展进程,从而不能可靠地提供决策依据。

因此,各核电厂在进行导则电子化时需明确目的,根据目的选择是否进行电子化,以及进行何种程度的电子化。

3.2 移动电源车接入系统试验

当前,国内核电厂都设置了离线的移动电源车带负荷试验,部分核电厂还设置了移动电源车在线试验(接入核电厂母线系统试验),而部分核电厂未设置移动电源车在线试验。未设置电源车接入试验,可能导致移动电源车带载能力和设计功能验证不充分。

因此,本文认为要综合考虑是否需要进行移动电源车在线试验。

3.3 移动设备操作错配

部分核电厂移动设备离线的定期试验由维修部门进行操作,而核电厂鉴于运行人员处于事故缓解现场且移动设备需接入系统,规定在事故时由运行人员对移动设备进行启动操作。由于运行人员日常未开展相关的启动操作演练,可能因技能不足而影响移动设备启动,从而影响移动设备应急功能的实现。

因此,本文建议由同一部门进行日常操作与事故时操作,或者增加对运行人员操作移动设备的技能培训。

3.4 严重事故管理导则框架更新

福岛核事故后,美国电力研究协会(EPRI)发布了新版本的严重事故管理技术导则文件。而国内部分核电厂现有 SAMG 是以 1992 年的 EPRI 技术基准报告为基础编制的,与最新的技术导则文件存在一定的差别。

因此,各核电厂应根据 WANO SOER 2013-2 建议项第 5 条 a 项“保持应急/事故应对策略和程序与现行技术导则的一致性。确认核电厂程序和当前技术导则之间的偏差得到了严格的技术和安全审查”,结合 EPRI 最新技术导则,对现行 SAMG 开展升版或技术审查、评估。

4 结论

本文旨在介绍核电厂严重事故日常管理的内容、典型问题及改进措施等,为各核电厂严重事故管理提供参考,并探讨当前核电厂严重事故日常管理尚未解决的问题。通过以上论述可以得出以下结论:

(1) 国内核电厂已开展全面的严重事故日常管理工作,并不断改进和完善,有效提升了核电厂应对严重事故的能力;

(2) 仍然有一些问题,如严重事故管理导则电子化的应用、移动电源车接入系统试验、移动设备操作错配和严重事故管理导则框架更新等,需要核电厂统筹考虑以确定满足自身管理体系的解决方式。

参考文献

- [1] 张迅. 核电站严重事故管理导则及存在问题分析 [J]. 设备管理与维修, 2022 (17): 30-33.
- [2] 杨志义, 张佳佳, 冯进军, 等. 核电厂严重事故管理指南 (SAMG) 实施阶段若干问题的思考与建议 [J]. 核科学与技术, 2014 (2): 26-34.
- [3] 张迅. 严重事故管理导则在田湾 VVER 机组的应用 [J]. 电子技术应用, 2022 (S1): 206-208.

Summary of Daily Management Experience and Development Suggestions for Serious Accidents in Nuclear Power Plants

Sun Fengping

(SPIC Laiyang Nuclear Energy Co., Ltd., Yantai 265200, China)

Abstract: After the Fukushima nuclear accident, the nuclear power plants attach great importance to handling to severe accidents. Nuclear power plants have taken three types of management measures, namely equipment, personnel, and documents, to maintain and enhance the ability to handle severe accidents, and have implemented them into corresponding management procedures. In the daily management of severe accidents, nuclear power plants have identified typical problems such as incorrect fuel models, lack of regular testing projects for emergency mobile pumps, non-standard key management, and failure to conduct sufficient evaluation of mobile equipment, and have provided corresponding improvement measures. Discussions are conducted on the current issues such as the digitization of severe accident management guidelines, mobile device access system testing, mobile device operation mismatch, and updating of the severe accident management guidelines framework, and relevant suggestions are provided.

Key words: severe accidents; daily management; severe accident management guideline; SAMG; Fukushima; mobile devices

(责任编辑: 徐晓娟)

雷富安, 史克亮, 杨掌众, 等. 地浸采铀过程中抽注平衡相关问题总结与建议[J]. 核安全, 2024, 23(3): 99-106.

Lei Fuan, Shi Keliang, Yang Zhangzhong, et al. Summary on Issues Related to Pumping Balance in in-situ Uranium Mining [J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 99-106.

地浸采铀过程中抽注平衡相关问题总结与建议

雷富安^{1, 2}, 史克亮², 杨掌众¹, 陈栋梁¹, 余建兴¹, 姚永奎¹, 张树丛¹, 吴王锁²

(1. 生态环境部西北核与辐射安全监督站, 兰州 730020; 2. 兰州大学放射化学与核研究所, 兰州 730000)

摘要: 本文旨在深入探索地浸采铀工艺中抽注平衡问题对地下水环境的影响。抽注平衡作为地浸采铀过程中的关键环节, 其稳定性和合理性直接关系到地下水环境的安全与可持续性。因此, 本文围绕抽注比的影响因素、计算方法及其对地下水环境的影响进行了系统研究。通过理论推导和实证分析相结合的方法, 得到一个初步结论: 抽注比周期在时间上以一个月为计算单位; 在空间上, 以一个独立采区的所有抽注孔抽注量数据为计算依据; 在环境影响上, 以一个独立采区所有观测孔的数据进行综合的专业研判。研究成果不仅有助于优化地浸采铀工艺参数和提高资源利用率, 还为地下水环境保护提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词: 地浸采铀; 抽注平衡; 环境影响

中图分类号: **文章标志码:** **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0099-08

铀是重要的核电燃料和战略物资, 广泛用于科研、国防、医药、工业同位素等诸多生产领域^[1-4]。地浸采铀是一种通过钻孔直接将溶浸液注入地下矿层(主要针对砂岩型铀矿)之后溶浸液与矿物的化学反应选择性溶解矿石中的铀及副产品的方法^[1]。

20 世纪五六十年代, 美国和苏联最早开展地浸采铀技术研究, 20 世纪 70 年代我国核工业第六研究所对地浸采铀技术开展研究, 20 世纪 90 年代我国开始进行较大规模的地浸采铀工作^[1-4]。2010 年以来, 全世界地浸采铀进入了快速发展期, 各国新建的铀矿山以地浸法逐步代替了原有的采矿工艺, 2011 年地浸采铀产量占世界天然铀总产量的 45%, 墨西哥 2015 年地浸

法采铀占总产量的 51%, 哈萨克斯坦地浸采铀资源占世界总量的 89%, 其出产的天然铀几乎全部产自地浸矿山^[1-4]。目前我国也以地浸采铀方法为主, 具有代表性的地浸企业或矿山有新疆天山铀业、内蒙古通辽铀矿等。据有关数据统计, 目前我国地浸法采铀占总产量的 60% 以上, 原始采铀法除了少部分还在生产外大多已经停产或待退役^[3-7]。总体来说, 地浸采铀方法具有生产成本低、自动化程度高、工业安全性好、特别适用于低品位矿石开采等优点, 已成为国内外主流的采矿方法^[8]。

地浸采铀作为一种特殊的铀矿开采方法, 其对地表环境的影响确实相对较小。然而, 这种开采方式对于地下水环境的影响却不容忽

收稿日期: 2024-04-12 修回日期: 2024-05-29

作者简介: 雷富安(1982—), 男, 博士, 现从事核安全监管工作

视^[1,9]。由于地浸采铀过程中溶浸剂的注入,使得含矿含水层的水文地球化学环境发生显著变化,从而可能对地下水环境造成污染。其中,抽注平衡问题在地浸采铀工艺中对地下水环境的影响尤为突出。抽注平衡不仅关系到浸出效率和铀资源回收率,更直接影响到地下水环境的稳定性。溶浸液如果流散到矿体浸出范围之外,就可能对地下水污染,进而对周边生态环境和人类健康构成威胁。因此,深入研究地浸采铀工艺中抽注平衡问题对于减少地下水环境影响具有重要意义。这不仅涉及抽注比例的调控,还需要对抽注负不平衡、抽注时间、边界范围、空间环境等因素进行综合考虑。通过优化抽注平衡条件,可以更有效地控制溶浸液的流散,减少对地下水环境的潜在危害。

我国在此方面的研究虽然已有一定基础,但仍存在许多亟待解决的问题^[1-5]。例如,对于不同地浸开采单元应采取何种抽注比例,以及如何在保证浸出效率的同时最小化对地下水环境的影响等,仍需要进行深入地探索和实践。此外,监管部门在监督地浸采铀过程对地下水环境的影响时,也需要充分考虑抽注平衡问题的重要性。通过制定更为严格和具体的标准和规范,以及加大现场监管和监测力度,可以更有效地保障地下水环境的安全和稳定。

综上所述,研究地浸采铀溶浸液抽注平衡问题对于减少地下水环境影响、保障生态环境安全和人类健康具有重要意义。这不仅需要科研人员的深入探索和实践,也需要监管部门、企业和公众的共同努力和配合。

1 抽注平衡在标准与环评中的描述

EJ 1007—1996 规定抽注液量应保持负不平衡,抽液量应高于注液量(简称抽注比)1%~3%;GB 23727—2020 中描述“地浸矿山设计应根据矿床水文地质特征合理确定抽液量大于注液量的比例,其中边界抽注单元的抽液量至少应超过注液量的 0.5%,并确定抽注比等参数对应的浸出液迁移扩散的控制范围”;GB

50521—2023 中则规定应保持抽液量大于注液量,并符合 GB 23727 的有关规定。在实际监督过程中,环评批复对于新疆中核天山铀业有限公司每个地浸场的抽注比要求是不同的,比如 737 厂^[10]技改前为 1%,技改后为 0.54%,739 厂^[11]为 1%,738^[12]为 1%,蒙其古尔铀矿厂^[13]为 0.3%。由于地质条件的复杂性和地下水动力的影响,不可避免地会出现溶浸液流散至井场外的情况,从而在含矿含水层造成局部核素浓度的增高。对于正常生产期间地下溶浸液流散率,参照美国有关原地浸出与地下水复原的指标参数,新疆中核天山铀业有限公司原地浸出采铀工程生产期间溶浸液的流散率 f_1 确定为 0.05%,而停产期间,根据《蒙其古尔铀矿床原地浸出采铀工程环境影响报告书(2013 年)》的计算,溶浸液的流散率约为 1.12%。本文以蒙其古尔铀矿床为例来推导停产期间溶浸液的流散率^[12]。

停产期间,由于地下水动力的作用,溶浸液将向地下水下游方向运移,其流散率 f_2 按下式确定:

$$f_2 = \frac{m_i}{V_0 \cdot C_{0i}} \quad (1)$$

式中:

m_i 为 i 污染物在 t 时刻内流散出去的总量, kg(对放射性污染物为 Bq)。

$$m_i = V_0 C_{0i} [1 - \exp(-V/V_0)t] \quad (2)$$

式中:

t 为停产时间, d;

V_0 为停产开始时溶浸液总量,即溶浸范围内的空隙水量, m^3 。

C_{0i} 为溶浸液中 i 污染物在停产开始时的浓度, kg/m^3 (对放射性核素为 Bq/m^3)。

$$V_0 = V_0' \cdot \eta \quad (3)$$

式中:

V_0' 为溶浸范围体积, m^3 ;

η 为矿岩的孔隙度, %;

V 为一天内容浸液从溶浸范围边界流散出去的量, m^3/d 。

$$V = s \cdot u \quad (4)$$

式中：

s 为溶浸范围内的最大横截面积, m^2 ；

u 为地下水渗透流速, m/d 。

$$s = a \cdot h \quad (5)$$

式中：

a 为垂直于地下水流向的溶浸范围的最大宽度, m ；

h 为溶浸厚度, m 。

$$u = k \cdot \frac{dH}{dX} \quad (6)$$

式中：

dH/dX 为水力坡度；

k 为矿层的地下水渗透系数, m/d 。

将不同参数代入公式(1),得：

$$f_2 = 1 - \exp\left(\frac{-a \cdot h \cdot k \cdot (dH/dX) \cdot t}{V_0' \cdot \eta}\right) \quad (7)$$

将表1中的各参数代入式(7),计算蒙其古尔地浸采铀工程停产期间(35 d)的流散率 $f_2 = 1.12\%$ 。

表1 停产期间溶浸液中污染物流散率的计算参数

Table 1 Calculation parameters of pollutant flow rate in the leaching solution during shutdown

参数	$H/\%$	a/m	H/m	$K/(m/d)$	$dH/dX(\%)$	t/d	V_0'/m^3	V_0/m^3
数值	32.7	860	9.32	1.28	4.1	35	4.02×10^6	1.32×10^6

2 监督过程中相关抽注平衡问题的探讨

在监督地浸采铀过程中抽注比的情况时,生态环境部门的监督工作应遵循一系列科学、规范且严谨的操作流程,以确保抽注比符合法规标准或环评批复要求。下面将对如何进行检查、判定周期、空间范围确定以及何时提出监督要求进行深入研究探讨。

另外,对于监测孔地下水的的数据,当出现以下情况时,应提出监督要求:

(1) 地下水的水质指标出现显著变化,超出规定范围;

(2) 抽注比长时间偏离规定值,且无法合理解释原因;

(3) 地下水流动出现异常,可能影响到抽注系统的正常运行;

(4) 其他可能对环境造成不良影响的情况。

在提出监督要求时,监督员应详细记录相关数据和情况,并及时与营运单位进行沟通,要求其进行整改或采取相应措施。在实际监督过程中,监督员应根据相关法律法规、标准以及实际情况进行灵活调整和完善。同时,随着监督实践的深入和营运单位在研究设计方面的持续

改进,这些认识结果也应不断更新和完善。

2.1 在空间上,以一个独立采区的所有抽注孔抽注量数据为计算依据

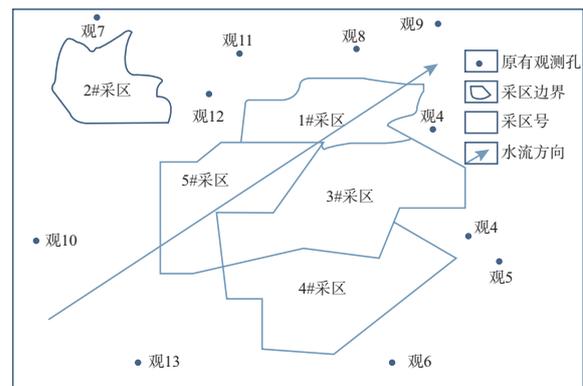


图1 某矿床首采段观测孔平面布置

Fig.1 Plane layout of the observation hole of the first mining section of a deposit

如图1所示,某矿床独立采区一般由几个相关联的采区组成,共用一组环境观测孔。在独立采区内,抽注的溶浸液均可视为一个系统,不受其他采区的影响,对于数量统计来说,受其他采区的干扰较少,有利于抽注比的计算。大的原则是将所有的采区(1#、2#、3#、4#、5#)想象为一个大的独立采区,在实际生产过程中,各采区的抽注平衡累计起来是抽注负不平衡的。比

如 1# 采区总是抽液量大于注液量,2# 采区总是注液量大于抽液量,但总体 1#、2#、3#、4#、5# 采区(在整个独立采区)抽注液量依然是保持抽注负平衡的。当然,每个采区也不是一直抽注比例不变的,当采区工作一段时间后,也为了消除部分矿化带没有被溶浸,有可能各个采区的抽注比例会发生变化,甚至抽液孔和注液孔的功能也会互换^[14]。所以在空间上,以一个独立采区所有抽注孔的抽注量数据为计算依据是比较合适的。

2.2 在时间上,以一个月来计算抽注比周期

以一个月为周期检查抽注比的因素,主要基于以下两个方面的考虑:

(1)从环境影响评估报告(环评报告)的角度来看,新疆中核天山铀业的各矿点均设定了 35 天的停产期。

这一设定不仅是为了设备维护和检修,更是考虑到溶浸液在停产期间可能增加的流散量及其对周边环境的影响。环评报告能够接受这一期间内溶浸液中污染物的扩散量,但这并不意味着可以忽视其潜在的环境风险。因此,为了有效监控和管理这种风险,选择一个合适的检查周期显得尤为重要。从实际生产情况和科学数据的角度分析,停产期间的溶浸液流散率明显高于生产期间。以《蒙其古尔铀矿床原地浸出采铀工程环境影响报告书》为例,生产期间的流散率 f_1 为 0.05%,而停产期间的流散率 f_2 则高达 1.12%。这意味着在停产期间,溶浸液的流散量会显著增加,可能对周边环境造成更大的影响。因此,选择一个能够覆盖停产期的检查周期,对于及时发现和控制溶浸液的流散至关重要。

根据《737 原地浸出采铀工程环境影响报告书(1999 年)》^[13]中的数据,抽注比和流散率的确定都是基于专业评审意见和科学数据的。这些数据为确定检查周期提供了有力的依据。抽注比 1% 的确定是根据原中核总矿冶局的评审意见,而 f_1 和 f_2 的确定则是基于美国有关数据和实际生产情况的考量。在考虑 737 厂抽注比技改后的情况时,我们首先要明确技改的目的和效果。抽注比技改至 0.54% 显然是为了更有效地控制溶浸液的流散,减少对周边环境的影响。

而 4 年的观测孔数据监测结果也充分证明了这一技改的有效性,因为数据显示基本没有发现溶浸液流散到 25m 的观测井之外。基于这一实际观测结果,我们可以认为技改后的抽注比对于控制溶浸液流散是有效的。因此,在监督检查中,选择一个月作为抽注负不平衡的周期是相对保守的。这个周期不仅低于停产期的 35 天,而且充分考虑了潜在的环境风险和监测的需要。这样的选择既能保证足够的监测频次,以便及时发现可能存在的问题,又不会过于频繁地增加监测成本和工作量。

综上,从技术和思维逻辑的角度来看,选择一个月周期作为监督检查的时间间隔是合理的。这个周期既符合环评报告的要求,又能确保对溶浸液流散情况的有效监控。

(2)针对所描述的情况,对于独立采区抽注比的观察和评估确实需要更为严谨和细致的分析。一个月的观察时间虽然可以提供初步的评估,但考虑到营运单位在维持抽注比方面需要付出的努力,以及环评报告对抽注比的具体要求,我们可能需要更长时间的数据来做出更准确的判断。

首先,从表 2 中可以看出,A、B、C 三个抽注单元(与图 1 一致,A 抽注单元为 1#、2# 采区;B 抽注单元为 3# 采区,C 抽注单元为 4#、5# 采区)在维持所要求的抽注比方面存在挑战。仅仅关注每个单元的抽注是否达到负不平衡,并满足 1.0% 的要求是不够的。更重要的是要确保各采区之间的抽注平衡以及整个独立采区的总体抽注平衡。

其次,即使计算一个月的独立采区的抽注负不平衡,抽液量大于注液量仅为 0.85%,这与环评批复的要求仍有一定差距。这表明营运单位在控制抽注比方面还需要进一步努力。

因此,对于监督检查中抽注负不平衡的周期选择,虽然一个月的时间可以作为一个初步的参考,但可能还需要考虑更长时间的数据来评估营运单位在维持抽注比方面的稳定性和可靠性。同时,我们也应该强调营运单位在控制抽注比方面的责任和努力,并建议他们采取更加有效的措施来确保抽注比的稳定和合规。

表 2 一个独立采区 TQ 的实验数据
Table 2 Experimental data of an independent mining area TQ

采区 日期	A(1#、2# 采区)				B(3# 采区)			C(4#、5# 采区)			A-C		
	日注量 (A1)	日注量 (A2)	日抽 液量	抽大 于注	日注 液量	日抽 液量	抽大 于注	日注 液量	日抽 液量	抽大 于注	日注 液量	日抽 液量	抽大 于注
	m ³	m ³	m ³	%									
5.10	107.44	80.61	187.68	0.20	135.87	136.48	0.45	321.47	326.40	1.53	645.39	650.56	0.80
5.11	100.88	81.07	181.60	0.19	141.26	141.92	0.46	312.59	317.42	1.55	635.81	640.94	0.81
5.12	97.12	80.53	177.44	0.12	120.96	121.60	0.53	321.81	327.01	1.62	620.42	626.05	0.91
5.13	98.08	81.30	179.20	0.10	112.82	113.44	0.55	335.47	340.96	1.64	627.66	633.60	0.95
5.14	98.96	77.90	176.80	0.04	110.85	111.52	0.61	332.29	337.94	1.70	620.00	626.26	1.01
5.15	96.50	76.59	173.44	0.20	125.33	126.40	0.86	329.73	336.16	1.95	628.14	636.00	1.25
5.16	84.37	73.71	157.60	0.30	134.88	135.36	0.36	321.63	326.24	1.43	614.59	619.20	0.75
5.17	94.64	82.40	176.16	0.50	100.50	100.64	0.14	321.36	325.30	1.22	598.90	602.10	0.53
5.18	98.64	82.14	180.96	0.10	101.79	102.56	0.75	313.76	319.55	1.85	596.34	603.07	1.13
5.19	92.96	86.21	179.20	0.02	106.64	107.36	0.68	312.58	318.08	1.76	598.38	604.64	1.05
5.20	80.16	85.42	165.60	0.01	108.24	108.96	0.67	309.09	314.50	1.75	582.91	589.06	1.05
5.21	88.08	84.05	172.16	0.02	99.49	100.16	0.68	320.27	325.92	1.76	591.89	598.24	1.07
5.22	89.92	85.07	174.08	0.52	121.12	121.28	0.13	319.50	323.36	1.21	615.62	618.72	0.50
5.23	92.02	77.89	170.08	0.10	97.98	98.72	0.75	318.13	324.00	1.85	586.02	592.80	1.16
5.24	95.44	83.62	178.88	0.10	96.27	96.80	0.55	323.50	328.80	1.64	598.83	604.48	0.94
5.25	93.66	85.50	177.92	0.70	97.01	96.96	0.05	329.33	332.69	1.02	605.50	607.57	0.34
5.26	91.06	85.70	175.52	0.70	94.13	94.08	0.05	323.26	326.56	1.02	594.14	596.16	0.34
5.27	83.50	83.92	166.59	0.50	95.22	95.36	0.15	310.22	314.03	1.23	572.86	575.98	0.54
5.28	93.58	82.38	175.97	0.00	96.02	96.64	0.65	327.31	333.01	1.74	599.30	605.62	1.05
5.29	75.66	76.53	152.80	0.40	83.76	84.64	1.05	274.18	280.10	2.16	510.13	517.54	1.45
5.30	104.32	71.44	176.64	0.50	111.82	113.12	1.16	325.36	332.72	2.26	612.94	622.48	1.56
5.31	115.28	62.53	178.88	0.60	109.49	110.88	1.27	325.02	332.72	2.37	612.32	622.48	1.66
6.01	107.47	66.45	173.92	0.00	94.42	95.04	0.66	332.16	337.94	1.74	600.50	606.90	1.07
6.02	107.54	68.66	175.84	0.20	92.70	93.12	0.45	343.38	348.64	1.53	612.27	617.60	0.87
6.03	103.95	74.46	178.24	0.10	90.70	91.20	0.55	338.62	344.18	1.64	607.74	613.62	0.97
6.04	104.35	79.12	182.56	0.50	88.19	88.32	0.15	348.08	352.35	1.23	619.74	623.23	0.56
6.05	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	
(停电)													
6.06	89.30	63.52	151.84	0.64	85.12	85.12	0.00	317.74	321.18	1.08	555.68	558.14	0.44
6.07	110.16	62.19	171.20	0.67	91.22	91.20	0.02	346.99	350.64	1.05	610.56	613.04	0.41
6.08	117.04	62.29	178.08	0.70	92.85	92.80	0.05	341.17	344.66	1.02	613.34	615.54	0.36
6.09	116.48	61.38	176.96	0.50	87.87	88.00	0.15	328.86	332.86	1.22	594.59	597.82	0.54
6.10	116.24	66.88	182.08	0.57	88.58	88.64	0.07	327.50	331.28	1.15	599.20	602.00	0.47
合计	3044.80	2371.46	5405.92	0.19	3213.09	3228.32	0.47	10052.38	10207.18	1.54	18681.73	18841.42	0.85

2.3 在环境影响上,以一个独立采区的所有监测孔数据综合分析研判

将地下水评价标准及环评报告本底调查中关于水体的监测结果列于表3。从表3中可以看出,矿区水体(不包括含矿含水层)的放射性核素的含量都在GB 5749—2022限值以下。表3中GB 5749—2022的标准值与《饮用水水质标准》WTO第三版中的筛查水平是一致的,表3中列出的《饮用水水质标准》WTO第三版的标准值是指导水平。表3中列出的指导水平(核素的活度浓度值)相当于每一个列出的放射性核素所致的剂量为0.1 mSv/a的一个参考剂量水平。

综合表3,依《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)或《地下水质量标准》(GB 14848—2022)来做出监督要求是合理的,最直观的方法是监督检查总 α 和总 β 的放射性水平,即总 α 低于0.5 Bq/L,总 β 低于1 Bq/L的水平,而不需要知道这些特定放射性核素的性质。

表3 评价地下水主要质量标准
Table 3 Evaluation of major quality standards for groundwater

污染物	标准值	标准值来源
筛查水平	pH值	6.5~8.5
	SO ₄ ²⁻	250 mg/L
	Cl ⁻	250 mg/L
	总硬度	1000 mg/L
地下水	总 α 放射性	0.5 Bq/L
	总 β 放射性	1 Bq/L
	指导水平	238U 10 Bq/L 234U 10 Bq/L 226Ra 1 Bq/L 230Th 1 Bq/L 210Po 0.1 Bq/L 210Pb 0.1 Bq/L
《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)或《地下水质量标准》(GB 14848—2022)		III类标准
《饮用水水质标准》WTO第三版,2004		

表4 737矿周围水体中放射性核素含量及总 α 放射性比活度测量结果

Table 4 Measurement results of radionuclide content and total alpha radioactivity ratio in water around 737 mine

铀/($\mu\text{g/L}$)	钍/($\mu\text{g/L}$)	²²⁶ Ra/(10 ⁻³ Bq/L)	总 α /(Bq/L)	²¹⁰ Po/(Bq/L)
1.20~12.7	0.04~2.92	1.50~18.80	$1.85 \times 10^{-2} \sim 4.02 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^{-3} \sim 1.13 \times 10^{-2}$

表5 739矿区地下水体中放射性核素含量及总 α 、总 β 放射性比活度测量结果

Table 5 Measurement results of radionuclide content and total alpha and total beta radioactivity in groundwater in 739 ore mine area

分析对象	铀/($\mu\text{g/L}$)	钍/($\mu\text{g/L}$)	²²⁶ Ra/(10 ⁻³ Bq/L)	总 α /(10 ⁻¹ Bq/L)	总 β /(10 ⁻³ Bq/L)
新疆河流均值	4.98	0.16	痕量	-	-
观测井1(25 m)	22.42	1.05	402	19.6	10.2
观测井2(125 m)	137.22	13.99	87	33	19.4

表6 738区域放射性测试分析结果(Bq/L)

Table 6 738 regional radioactivity test analysis results (Bq/L)

编号	样品名称	采样地点	总 α	总 β	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	U/($\mu\text{g/L}$)
S01	抽出液	矿区抽出液	266.52	200.53	234.461	0.91	1212.00
S02	自流井水	矿区自流井	0.07	0.31	13.7×10^{-3}	0.20	1.40
S03	井水	盐场倒班房	0.09	0.07	73.5×10^{-3}	0.04	6.52
S04	井水	任氏开垦地水井	0.05	0.07	2.0×10^{-3}	0.03	14.18
S05	河水	白羊河(托克逊县)	0.09	0.09	8.9×10^{-3}	0.03	2.04
S06	泉水	艾丁湖内公路铁桥旁	0.04	0.08	20.1×10^{-3}	0.04	4.76

表 7 蒙其古尔矿区地下水放射性核素浓度监测结果
Table 7 Monitoring results of groundwater radionuclide concentration in Mengqigur mining area

监测地点	铀 / ($\mu\text{g/L}$)	$^{226}\text{Ra}/$ (mBq/L)	$^{210}\text{Pb}/$ (mBq/L)	$^{210}\text{Po}/$ (mBq/L)
矿区钻孔 地下水 1	5.19	20.6	2.30	1.35
矿区钻孔 地下水 2	7.36	59.1	1.43	0.70
矿区钻孔 地下水 3	5.71	21.4	1.96	1.42
新疆维吾尔 自治区	0.44~20.40	0.83~8.77	-	-

因新疆含水层中铀的正常含量范围为 0.06~21.40 $\mu\text{g/L}$,由表 4 可见 737 矿体周围水体的放射性核素的比放射性活度均在新疆正常本底水平范围内。表 5 中观测井铀含量较高是因为属于含矿含水层。由表 6 可以看出,矿区浸出液矿层放射性浓度高,矿区各水体放射性比活度低。在全疆正常辐射本底水平范围之内。由表 7 可知,矿区内地下水中天然铀与新疆平均值处于同一水平, ^{226}Ra 浓度稍高于新疆维吾尔自治区水平。

如图 1 所示,独立采区一般由几个相关联的采区组成,共用一组环境观测孔。地下水不受环境污染的理想目的是尽可能与本底状态相类似。从表 3 至表 7 中可以看出这些铀矿厂的环境本底值低于 GB 14848—2022 中的指标,因此监督检查过程中可以此标准作为参考。但对于本底值远远低于标准值的,观测孔的监测数据可以参考本底值来做一些建议性的监督意见。

3 小结

综上所述,抽注平衡作为地浸采铀过程中的关键环节,其稳定性和合理性直接关系到地下水环境的安全与可持续性。因此,本文围绕抽注比的影响因素、计算方法及其对地下水环境的影响进行了系统研究。通过理论推导和实证分析相结合的方法,得到一个初步结论:抽注

比周期在时间上以一个月为计算单位;在空间上,以一个独立采区的所有抽注孔抽注量数据为计算依据;在环境影响上,以一个独立采区所有观测孔的数据进行综合专业研判。研究成果不仅有助于优化地浸采铀工艺参数和提高资源利用率,还为地下水环境保护提供了重要的理论依据和实践指导。

参考文献

- [1] 马飞, 张书成译. 酸法地浸采铀工艺手册 [M]. 原子能出版社, 2003.
- [2] Marko S, Borut S (2013) Partitioning of natural radionuclides in sediments around a former uranium mine and mill [J]. J Radioanal Nucl Chem 297: 201–207.
- [3] Gilligan R, Nikoloski AN (2015) The extraction of uranium from brannerite—a literature review [J]. Miner Eng 71: 34–48.
- [4] Marko S, Borut S (2013) Partitioning of natural radionuclides in sediments around a former uranium mine and mill [J]. J Radioanal Nucl Chem 297: 201–207.
- [5] LATN J, CHEUNG L, HANY, et al. China's Response to Nuclear Safety Pre-and Post-Fukushima: Antinterdisciplinary Analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 1104.
- [6] XIE Y, CHENC. RENX, et al. Emerging Atural and Tailored Materials For Uraniu-Contaminated Water Treatment and Environmental Remediation [J]. Progress in Materials Science, 2019, 103: 180–234.
- [7] Gorbunova O, Safonova, Tregubovav, et al. Cementation of Biodegraded Radioactive Oils and Organic Waste [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015, 304 (1): 371–375.
- [8] 阙为民. 中国铀矿采冶技术新方向 [J]. 中国核工业, 2017 (11): 35–37.
- [9] 吴黎武, 吉宏斌, 王清良, 等. 新疆某铀矿石浸出性能探索性试验研究 [J]. 铀矿冶, 2013, 03: 133–137.
- [10] 张智慧, 曹风波. 737 厂原地浸出采铀工程环境影响报告书 (可行性研究阶段) [P]. 1999, 5: 81–90.
- [11] 中国核工业集团公司. 新疆伊犁铀矿资源综合利用示范基地建设总体规划 [P]. 2012, 8: 51.
- [12] 连国玺, 曹风波. 新疆中核天山铀业有限公司蒙其古尔铀矿床原地浸出采铀工程环境影响报告书 [P]. 2002, 6: 118–134.
- [13] 连国玺, 曹风波. 新疆中核天山铀业有限公司蒙其古尔铀矿

床原地浸出采铀扩建(二期)工程环境影响报告书[P].
2016, 3: 115-137.

[14] 阙为民. 原地浸出采铀几个基本问题的探讨[J]. 铀矿冶,
2006, 02: 57-60.

Summary on Issues Related to Pumping Balance in in-situ Uranium Mining

Lei Fuan^{1,2}, Shi Keliang², Yang Zhangzhong¹, Chen Dongliang¹, Yu Jianxing¹, Yao Yongkui¹,
Zhang Shucong¹, Wu Wangsuo²

(1. North-Western China Regional Office of Nuclear and Radiation Safety Inspection, MEE, Lanzhou 730020, China; 2. Radiochemistry Lab, School of nuclear Science and technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The purpose of this paper is to explore in depth the impact of extraction and injection balance issues in in-situ leaching of uranium on groundwater environment. As a key link in the in-situ leaching process of uranium, the stability and rationality of pumping balance are directly related to the safety and sustainability of groundwater environment. Therefore, this article systematically studies the influencing factors, calculation methods, and their impact on groundwater environment of pumping ratio. Through a combination of theoretical deduction and empirical analysis, a preliminary conclusion is drawn: the withdrawal ratio period is calculated in units of one month in terms of time; In terms of space, the calculation is based on the pumping volume data of all pumping holes in an independent mining area; In terms of environmental impact, conduct comprehensive professional analysis based on the data from all observation holes in an independent mining area. The research results not only contribute to optimizing the process parameters of in-situ uranium leaching and improving resource utilization, but also provide important theoretical basis and practical guidance for groundwater environmental protection.

Key words: in-situ uranium extraction; balance; environmental impact

(责任编辑: 梁 晔)

陈秋场,刘省勇,张文利,等. 核电厂乏燃料水池扩容改造辐射防护技术实践与发展[J]. 核安全,2024,23(3):107-111.

Chen Qiuyang, Liu Shengyong, Zhang Wenli, et al. Practice and Development of Radiation Protection Technology for Nuclear Power Plant Spent Fuel Pool Expansion and Renovation [J]. Nuclear Safety, 2024, 23 (3): 107-111.

核电厂乏燃料水池扩容改造辐射防护技术实践与发展

陈秋场¹, 刘省勇², 张文利², 秦强¹

(1. 苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004; 2. 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 深圳 518000)

摘要: 在核电厂乏燃料水池扩容改造过程中, 辐射防护工作至关重要。项目组严格按照安全标准制定辐射防护方案, 从培训、模拟实操练习、剂量限值控制、辐射防护管理和防护措施、个人剂量监测、工作场所监测、工艺监测、突发事件的应急措施等方面作了全方位的准备, 严格按照程序执行工作, 为乏燃料水池扩容改造的顺利完成提供辐射防护保障。

关键词: 乏燃料水池; 扩容; 辐射防护

中图分类号: TL71 **文章标志码:** B **文章编号:** 1672-5360 (2024) 03-0107-05

X 核电厂对乏燃料水池非密集旧格架进行改造, 更换为高密格架, 从而在原有乏燃料水池面积的基础上实现乏燃料贮存量扩容。乏燃料水池扩容改造包括将非密集旧格架拆除、去污、包装、转运、暂存和新格架安装 6 个阶段。谭世杰等^[1]阐述了百万千瓦级核电厂乏燃料水池扩容方法。朱彩军^[2]提出了乏燃料水池格架改造方案。偶建磊等^[3]研发了核电厂乏燃料贮存格架水下吊装工具。罗文广等^[4]研发了核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置。刘省勇等^[5]开发了一种用于乏燃料水池扩容的水下冲洗装置及水下冲洗方法。非密集旧格架用于在乏燃料水池中贮存高放射性的乏燃料组件, 具有一定的辐射风险, 在改造施工前需要对乏燃料操作大厅的剂量场进行模拟计算^[6]。

针对乏燃料水池扩容改造操作流程复杂, 改造专用工具特殊和辐射风险高的特点, 本文结合改造工艺流程, 开发制定了适用于核电厂

乏燃料水池扩容改造的辐射防护管理措施和辐射监测计划, 以保证现场工作人员、公众和环境的安全。

1 改造辐射防护分析

乏燃料旧格架为辐格架, 贮存于乏燃料水池中, 结构材料为不锈钢, 中子吸收体材料为镅, 外形尺寸高 × 长 × 宽为 4425 mm × 1840 mm × 1840 mm, 重量约为 8t。

核电厂辐射监测系统(KRT)设置有乏燃料水池辐射监测仪表 KRT013/014MA。

旧格架施工和辐射防护步骤如下:

- (1) 旧格架移位;
- (2) 对池底旧格架内部表面剂量率进行测量, 当剂量率大于 10 mSv/h 时, 进行池底冲洗去污, 直至旧格架内部表面剂量率小于 10 mSv/h;
- (3) 将乏燃料水池辐射监测仪表 KRT013/014MA 阈值上调;

收稿日期: 2023-11-05 修回日期: 2024-03-04

作者简介: 陈秋场(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 现主要从事核电厂安全分析和反应堆物理分析工作

- (4) 将旧格架吊装到顶部离水面 100 mm;
- (5) 对水下旧格架外表面和基座表面剂量率进行测量,当剂量率大于 10 mSv/h 时,在乏池中进行冲洗去污,直至旧格架外表面和基座表面剂量率小于 10 mSv/h;
- (6) 将旧格架吊装到清罐池;
- (7) 将辐射监测仪表 KRT013/014MA 阈值恢复;
- (8) 旧格架清洗;
- (9) 旧格架外表面测量;
- (10) 晾干;
- (11) 吊装到平板车,翻转;
- (12) 包装;
- (13) 进行包装外表面剂量率测量,当剂量率大于 2 mSv/h 时,安装铅皮屏蔽;
- (14) 转运;
- (15) 暂存。

辐射防护指标为集体剂量(单机组) ≤ 25 人·mSv,最大个人剂量 ≤ 5 mSv,零地面污染,零人员体表污染。

2 辐射防护要求

辐射防护工作遵循标准如下:

- (1) GB 18871-2002,电离辐射防护与辐射源安全基本标准;
- (2) GB 6249-2011,核动力厂环境辐射防护规定;
- (3) EJ 381-1989,电离辐射工作场所监测的一般规定。

以上标准给出了常规的辐射风险和防护要求。本节描述了乏燃料水池扩容改造工艺流程中涉及的高辐射风险点及防护措施。

2.1 改造流程模拟实操练习

在技能培训中心乏燃料水池中采用等尺寸等重量的模拟格架模拟实操练习,制订周密的施工计划,以提高改造操作人员和辐射防护人员的操作熟练程度;穿戴辐射防护采用工具,以提高效率;控制放射性操作人员的数量,尽可能减少受照剂量;培养良好的现场作业习惯,避免出现不必要的人体放射性污染。格架改造采用

的专用工具较多,并且需要将工具放入乏燃料水池内作业,因此,应做好工具的登记,避免受污染工具遗失。

2.2 现场通风要求

在作业开始前,应查看工作区域的通风是否有效,若通风系统处于停运状态,则要在通风正常启动 1 h 后,开始现场正常作业。

2.3 剂量率控制

如果旧格架任何一点处的辐射水平 ≥ 10 mSv/h,则禁止将其吊出水面,且对旧格架进行水下去污;或者不吊出水面,而将其跟其他符合剂量率水平的旧格架进行调换,后续再制定去污措施。

在旧格架吊出乏燃料水池水面的过程中,辐射防护人员要用长杆仪表对旧格架的表面剂量率进行连续测量,当长杆仪表的读数 ≥ 500 mSv/h 或者在辐射监测仪表 KRT013/014MA 出现报警时候,要将旧格架即时放回水下。

出控制区的旧格架表面接触剂量率 ≤ 2 mSv/h。

距车辆外表面 2 m 处剂量率 ≤ 100 mSv/h。

司机座位处剂量率 ≤ 20 mSv/h。

2.4 污染水平控制

测量货包外表面和运输车辆外表面,污染限值为:

(1) β 和 γ 粒子 ≤ 0.8 Bq/cm² ;

(2) α ≤ 0.4 Bq/cm²。

2.5 现场污染测量要求

每次工作结束后,工作负责人应对工作涉及的污染区域出口进行污染水平测量,当发现有污染时应及时去污,以确保污染不扩散到相邻区域。应确保每次工作结束后,场所的污染水平恢复到工作前的状态。每次现场污染测量工作要进行及时记录,并由辐射防护人员进行抽查。

3 旧格架的辐射措施

3.1 乏燃料水池出水前的测量措施

在对旧格架进行水下辐射水平测量前,要

清空待测量的格架周边相邻的一个格架的燃料组件,以减少周围辐射场对旧格架测量结果的影响。用碳纤维长杆移动测量仪表 AMP-100 探头对旧格架进行水下辐射水平初步测量,本测量为定点与全面扫描的方式,以便能搜索出格架的热点。在定点测量以外的地方,如果发现有剂量率 ≥ 2 mSv/h 的情况,必须在测量表格中清楚地标示出来,以便去污的时候好定位。

若旧格架所有的栅格孔内的任意点的辐射水平小于 10 mSv/h,则将该格架在水下吊离水池底,吊装到顶部离水面 100 mm 处,对其侧面和底面基座的辐射水平进行详细测量。

详细测点布点如图 1 和图 2 所示,结合现场测量点矩阵,旧格架侧面的每一面的每个测量点的垂直方向间隔为 1 m,横向间隔为 0.46 m。格架底部每个元件单元布一个测点,基座的两边都要测量。若旧格架存在任意点的剂量率 ≥ 10 mSv/h,则禁止将该格架吊出水面,并利用乏燃料水池的水进行内部大循环,用机械冲刷方式去污。

3.2 KRT013/014MA 阈值的调整

旧格架在乏燃料水池出水前,KRT 运行经理应完成乏燃料厂房乏燃料水池辐射监测仪表 KRT013/014MA 阈值上调。将旧格架吊至清洗池后,再恢复 KRT 通道的阈值。

旧格架运输之前,要通知主控室,旧格架可能会引起该电站辐射监测仪表报警。

3.3 旧格架在清灌池中的清洗、剂量率测量和防护措施

在旧格架吊至清洗池后,使用便携式刷洗机械进行冲洗去污。表面辐射水平小于 2 mSv/h 时,使用外表面冲洗装置通过除盐水分系统 (SED) 水对旧格架外表面冲洗,不对旧格架单元格架内部进行全面冲洗,但是,需要针对格架内的热点进行最优化方式冲洗;对于表面辐射水平大于 2 mSv/h 部位,要特定针对热点进行冲洗并对格架外表面进行冲洗。

去污完成后,再对旧格架的 6 个表面辐射水平进行复测,若经过重复冲洗去污后,仍然存

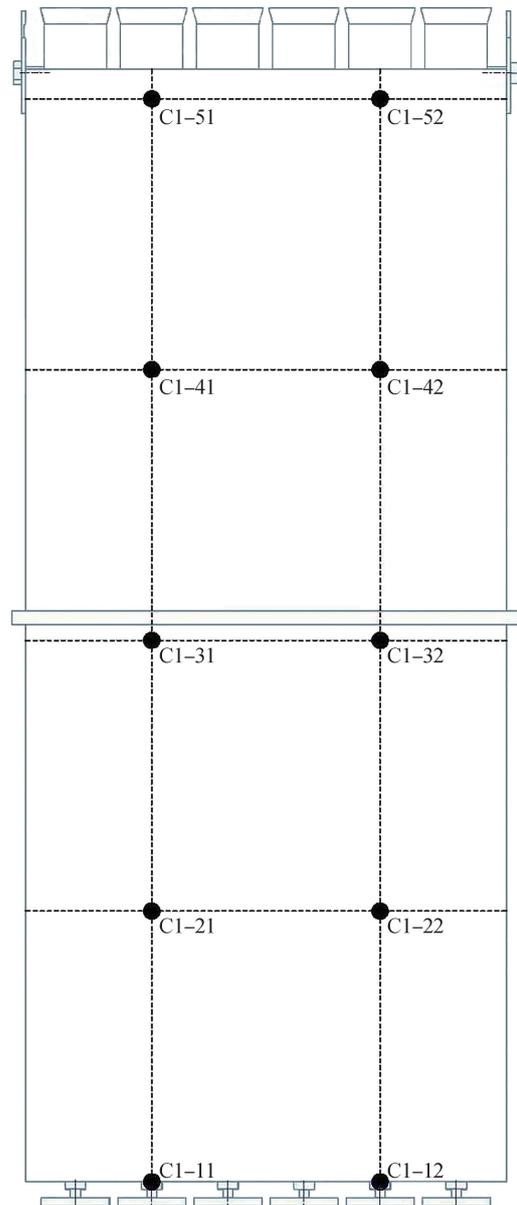


图 1 旧格架侧面测点

Fig.1 Side measurement point diagram of old rack

在有旧格架表面接触剂量率 > 2 mSv/h,则经辐射防护人员评估并同意后,方可将旧格架吊起装车。旧格架在平板车上就位并对其包装完成后,采用一定的铅皮屏蔽措施,使其表面接触剂量率 ≤ 2 mSv/h。

旧格架清洗期间,执行清洗的工作人员要戴气面罩、穿纸衣、戴乳胶手套和塑料鞋套,或者气衣。无关人员撤离 KX20 m,远离清洗池地点 5 m 外的工作人员戴口罩,KX20 m 处连续监测空气污染的仪表正常运行。

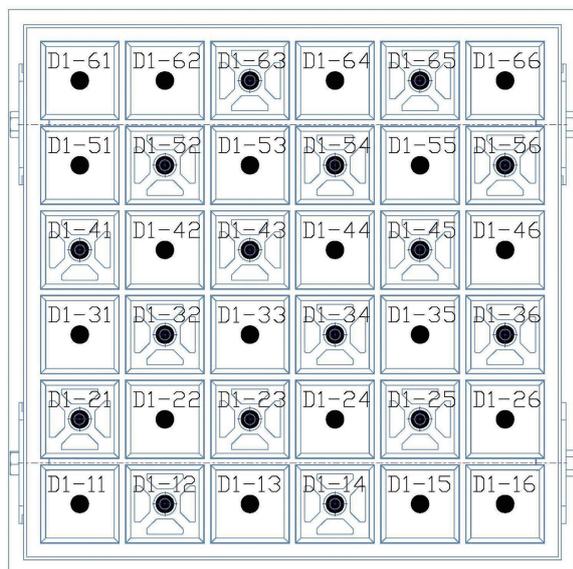


图2 旧格架俯视测点

Fig.2 Top view measurement point diagram of old rack

3.4 旧格架转运出控制区前的包装、测量

按照放射性物品出控制区的要求,对旧格架进行完整包装和测量。专用的包装袋材料为环保阻燃,抗UV,防酸碱,防水防晒,抗撕裂,正常使用年限为11年左右。

用专用防雨罩对旧格架进行覆盖并固定后,运往热机修车间。旧格架运输前的包装操作过程如下:

(1)平板汽车倒车进入燃料厂房,关闭竖直通门;将托水盘放置在平板车上合适位置,将枕木放置在托水盘上;

(2)在汽车顶部位置铺设白色塑料布,防止放射性粉尘玷污平板车,在脱水盘枕木和平板车上铺好旧格架包装袋;

(3)将格架翻转后放置在托水盘枕木上,用包装袋将旧格架完整包裹,包装袋的每个外表面为黄色,印有放射性标志和格架编码;

(4)旧格架运输包装袋封口;

(5)旧格架包装袋外面装上防雨罩,并拆除白色塑料布;

(6)用封车带将格架和拖车固定,确认符合放射性物质出控制区的要求,准备启运至热机修车间。

4 应急措施

在做好辐射防护的同时,也应针对可能发生的辐射事故制定应急措施。

当现场操作区辐射剂量过大时,应将旧格架重新降入乏燃料水池,利用水池形成生物防护屏障。无关人员应撤离乏燃料厂房 KX20 m。

当改造现场发生人员辐照剂量超标时,受污染人员不得擅自走动或离开。应立即通知辐射防护人员,执行清污工作,利用清污专用工具将污染人员剂量值降低。当出现严重辐照剂量超标时,对人员实施必要去污清洗后,联系急救车将受污染人员运送至 X 核电厂厂内医院。

当受污染格架吊装专用工具或其他放入乏燃料水池作业的受污染的工具与登记的数量不符时,应立即安排相关人员进行排查,直到找到受污染的专用工具或其他受污染的物品。

5 结论

在 X 核电厂乏燃料水池扩容改造施工过程中,辐射安全防护贯穿于施工管理的全过程。本文调研了核电厂乏燃料水池扩容改造工艺流程,研究制定了乏燃料水池扩容改造辐射防护方案,包括培训、模拟实操练习、剂量限值控制、辐射防护管理和防护措施、个人剂量监测、工作场所监测、工艺监测、突发事件的应急措施等方面;研究制定了旧格架的辐射措施,包括在乏燃料水池出水前的测量措施、辐射监测仪表阈值调整措施、旧格架在清灌池中的清洗、剂量率测量和防护措施、旧格架转运出控制区前的包装、测量,为乏燃料水池扩容改造的顺利完成提供安全保障。

参考文献

- [1] 谭世杰, 刘省勇, 陈军, 等. 百万千瓦级核电厂乏燃料水池扩容方法: 中国专利, 201810493565.6 [P]. 2018-10-19.
- [2] 朱彩军. 乏燃料水池扩容改造技术应用 [J]. 一重技术, 2019 (05): 61-65.
- [3] 偶建磊, 袁志敏, 吴伟, 等. 核电厂乏燃料贮存格架水下吊装工具研制 [J]. 核动力工程, 2021, 42 (04): 182-185.

- [4] 罗文广, 偶建磊. 核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置研制 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (05): 146-149.
- [5] 刘省勇, 郑超雄, 李成业, 等. 一种用于乏燃料水池扩容的水下冲洗装置及水下冲洗方法: 中国专利, CN201810494496.0 [P]. 2018-05-22.
- [6] 杨腊腊, 刘省勇, 杨煦, 等. 乏燃料操作大厅的剂量场随屏蔽水位的变化研究 [J]. 辐射防护, 2021, 41 (02): 112-118.

Practice and Development of Radiation Protection Technology for Nuclear Power Plant Spent Fuel Pool Expansion and Renovation

Chen Qiuyang¹, Liu Shengyong², Zhang Wenli², Qin Qiang¹

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Jiangsu Suzhou 215004, China; 2. Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China)

Abstract: During the construction process of nuclear power plant spent fuel pool expansion modification, radiation safety protection is integrated into the entire construction management process. This article strictly formulates radiation protection plans based on safety standards, making comprehensive preparations from training, simulated practical exercises, radiation dose limits, radiation protection management and protective measures, personal dose monitoring, workplace monitoring, process monitoring, and emergency plans. The work is strictly carried out according to safety procedures. Improve radiation protection guarantees for the smooth completion of the expansion and renovation of the spent fuel pool.

Key words: spent fuel pool; expansion; radiation protection

(责任编辑: 徐晓娟)

刘建. 华东地区核电厂操纵人员管理现状和对策[J]. 核安全, 2024, 23(3): 112-116.

Liu Jian. Current Situation and Countermeasures of Nuclear Power Plant Operator License Management in East China[J]. Nuclear Safety, 2024, 23(3): 112-116.

华东地区核电厂操纵人员管理现状和对策

刘 建

(生态环境部华东核与辐射安全监督站, 上海 200233)

摘要: 本文主要介绍了我国核电厂操纵人员执照管理的现状, 从国家核安全监管当局的角度对核电厂操纵人员执照获取/延续过程的监督检查中发现的不足提出改进意见。

关键词: 核电厂; 操纵人员; 执照; 管理

中图分类号: C931.2 **文章标志码:** A **文章编号:** 1672-5360(2024)03-0112-05

核电厂操纵人员是指在核电厂主控室中担任操作或者指导他人操作核电厂控制系统工作的运行值班人员。核电厂操纵人员的水平直接影响核电厂安全、稳定和经济的运行。国家对核电厂操纵人员实行许可管理^[1]。本文就华东地区核电厂操纵人员管理现状介绍如下。

1 核电厂操纵人员管理现状

1.1 法规依据

《核安全法》^[1]第三十七条及《民用核设施操作人员资格管理规定》(以下简称部令第 22 号)第三条规定,核设施操纵人员应当按照国家规定取得相应执照。

1.2 操纵人员的分类和岗位

1.2.1 操纵人员的分类和条件^[2]

执照分为《操纵员执照》和《高级操纵员执照》。可担任操作核电厂控制系统工作职责的人员须持有《操纵员执照》,即通称的操纵员;可担任操作或者指导他人操作核电厂控制系统的相关职责人员须持有《高级操纵员执照》,即通称的高操。部令第 22 号对申请操纵人员执照

的人员提出了具体的条件^[2]。

1.2.2 操纵人员的岗位管理^[2]

操纵人员由核电厂归口开展日常管理。对于操纵人员岗位管理,按照规定应当明确岗位职责以及任职要求,由核电厂对操纵人员开展岗位授权,安排运行值班和培训;对不满足相应要求的操纵人员,应当取消其岗位授权:如身体健康状况、参加培训情况和运行值班情况等。

1.2.3 考核方式

考核方式包括笔试、口试和操作考试。

部令第 22 号对申请延续执照和申请变更执照的人员提出了具体的规定^[2]。

1.3 操纵人员的执照管理

1.3.1 国家能源局的职责^[2]

国家能源局负责组织核电厂操纵人员执照培训和考核,审定核电厂培训大纲;制定核电厂操纵人员考核标准(考核标准须由国家核安全局核准)。

国家能源局负责成立“核电厂操纵人员资格审查委员会”(以下简称资审委),统一负责执照考核工作。

收稿日期: 2023-11-03 修回日期: 2023-11-24

作者简介: 刘建(1963—),男,教授级高级工程师,现主要从事核安全监管工作

1.3.2 核电集团的职责^[2]

核电厂的执照申请、培训和考核工作由对核电厂实施控股管理的企业集团(以下简称核电集团)承担或者委托有能力的核电厂开展。

1.3.3 核电厂的职责^[2]

核电厂承接核电集团委托,开展执照申请、培训和考核工作。

核电厂相关操作工作应当聘用取得相关执照的人员开展,核电厂负责执行岗位管理。

核电厂操纵人员考评委员会(以下简称考委会)由各核电厂负责组建设置,具体负责厂内的执照考核工作。

1.3.4 技术支持机构的职责^[2]

我国核电厂操纵人员的笔试试题编制以及现场考评服务工作由中核集团核动力运行研究所核电运行研究评估中心承担。

1.3.5 国家核安全局的职责^[2]

国家核安全局负责批准颁发执照,对操纵人员资格有关工作进行监督管理。

1.3.6 生态环境部核设施安全监管司^[2]

生态环境部核设施安全监管司具体承担国家核安全局的职责。

1.3.7 生态环境部地区监督站(以下简称地区监督站)的职责^[2]

各地区监督站是国家核安全局的派出机构,负责辖区内核电厂操纵人员考试的现场监督工作和操纵人员岗位信息的核查工作。

1.3.8 生态环境部核与辐射安全中心(以下简称核安全中心)^[2]

核安全中心对核电厂报送的执照申请文件进行技术审查。

1.4 操纵人员执照的管理

1.4.1 执照申请流程

申请核电厂操纵人员执照的人员,应当先参加国家能源局组织的执照培训和考核,在国家能源局资格审查通过后,由核电厂统一向国家核安全局提交申请材料。

(1)各核电厂向资审委申请操纵人员执照申请考核,资审委受理并审核申请。

(2)资审委组织操纵人员执照申请考核及制

定考核标准,并提交国家核安全局核准。

(3)资审委负责执照申请考评组织的组建、敲定考核方式、编制考核程序,并在考核实施前提交国家核安全局备案。

(4)国家核安全局派监督检查人员到考核现场开展监督活动,对参加考核的人员、考核的各项规章制度、考核的组织准备和考场等进行检查;国家能源局向国家核安全局提供的考核资料作为监督的参考依据,包括考题和标准答案等;监督检查人员会根据相关资料对考核过程和考核结果评定过程进行现场监督检查,在检查结束后写监督检查报告。

(5)核电厂将通过考核人员的申请提交国家核安全局。

(6)国家核安全局收到申请后,开展审查工作。在审查过程中,国家核安全局可根据需要,要求核电厂和主管部门提交必要的支持性材料。

(7)国家核安全局在收到技术审查后作出是否批准颁发执照的决定,并颁发执照。

执照有效期为五年。

1.4.2 延续执照流程

执照有效期届满后仍拟继续从事核电厂操作工作的人员,应当在执照有效期届满三个月前提出延续执照申请。

1.4.3 变更执照流程

执照有效期内拟转至执照载明的核电厂以外的其他核电厂继续从事核电厂操作工作的人员,应当在执照有效期内申请变更执照^[3]。

2 操纵人员管理上存在的问题

2.1 相关文件程序自身存在问题

操纵人员管理文件和培训教材不满足法规导则的要求,且与最终安全分析报告不一致;管理程序之间存在不自洽等问题。

2.2 操纵人员执照考核监督中发现问题

(1)虽然现行国家能源局发布的《核电厂操纵人员模拟机考试实施细则》没有规定考官人数必须多于考生,但因模拟机考试属于实操考试,部分机组模拟机考试中考官人数少于考生,

不能有效监督到每一个考生的考试情况。

(2) 个别口试题目的参考答案存在明显错误。

2.3 操纵人员岗位信息表核查中发现的问题

(1) 存在运行岗位值班时间统计有误, 岗位信息不实的情况。

(2) 存在模拟机与参考机组主控实际布置不一致的情况。

(3) 存在培训学时数与《操纵人员培训与再培训大纲》不一致的情况。

(4) 存在缺少运行值班中运行事件的处理记录的情况。

(5) 个别培训记录存在弄虚作假现象。

2.4 多个部门管理权限衔接问题

法律规定上存在多头管理, 责任不明确的情况。

谁发证, 谁负责。在执照的管理上, 国家能源局负责考核, 而考核的监督、核准以及相应执照的颁发则由国家核安全局负责, 违背了权责统一的原则; 这两个部门均需在执行申请考试期间进行监督, 并且对申请人员进行资格审查。多头管理不仅浪费了行政资源, 也不利于操纵人员资质的管理。

2.5 考核标准不统一, 导致监督标准不一致

2.5.1 根据部令第 22 号, 国家能源局制定了考核标准后, 须提交国家核安全局核准。而目前国家能源局 2013 年发布的《核电厂操纵人员执照考核标准》(以下简称《考核标准》)^[5] 尚未得到国家核安全局核准。

2.5.2 《考核标准》^[5] 规定操纵人员执照考核分为笔试、模拟机考试、口试和现场考试, 而在部令第 22 号^[2] 中规定的执照申请考试分为笔试、口试和操作考试, 与国家能源局的标准^[5] 规定明显不一致。

2.6 各核电厂考委会委员能力水平参差不齐

中国核电起步较晚, 1991 年第一座反应堆投入运行, 在之后的一段时间里也没有较大的发展。2006 年以后, 核电才迎来了跨越式发展, 机组逐渐增多, 导致人才大量稀释。因此, 许多核电厂考委会委员由年轻的高级操纵员甚至刚

取得高级操纵员执照的人员担任, 他们虽然理论知识较为丰富, 但实践经验不足, 在模拟机考试中不能体现应有的作用。

3 核电厂操纵人员在实际运行操作中存在能力欠缺

3.1 培训不足, 经验欠缺

某核电厂操纵员操作失误, 由于二回路一设备故障的处理不当, 引发一回路安注动作, 导致发生停机停堆运行事件。

3.2 抗干扰能力差, 监护不到位

某核电厂调试期间, 在设置大气释放阀整定值时, 操纵员接听电话, 又没有监护, 设错了整定值, 导致高压蒸汽冲开大气释放阀而引发伤人事故。

3.3 心理素质差

某核电厂操纵员在做每班必做的灯试试验时, 错按了紧急停堆按钮, 导致了紧急停堆事件发生。

4 对策

鉴于核电厂操纵人员对于核电厂安全和经济运行的重要性, 为确保核电厂长期安全稳定和经济的运行, 相关单位必须加强对核电厂操纵人员的考核和管理。

4.1 修订完善法律法规, 明确责任, 权责统一

4.1.1 一是法律授权国家核安全局颁发核电厂操纵人员执照, 实现权责统一的原则, 国家核安全局应该负责操纵人员的考核工作。二是国家核安全局已经初步具备对部分核电厂操纵人员考核的能力。核安全中心已经配置了基于二代改进型压水堆核电技术的全范围模拟机, 并已开始对国家核安全局系统的监督员进行培训。

4.1.2 目前生态环境部及国家发展和改革委员会联合发布了部令第 22 号^[2], 密切与国家能源局间配合核准考核标准, 确保考核质量。

(1) 建议取消能源局考核标准中的“现场考试”, 一是目前国内核电厂操纵人员的培养大多是有一至两年现场操纵员(以下简称现操)的

岗位经历,才开始进入主控室工作;二是由于新建核电厂在进行操纵人员现场考试时,机组还未进入运行状态,不能完全具备现场考试条件;三是目前大多数核电厂持有操纵人员执照的岗位均在主控室,他们不会去执行现场的实际操作(此项工作是由“现操”完成的)。目前的全范围模拟机与主控室场景完全一致,可以满足模拟操纵人员现实的工作环境。从目前了解到的现场考试的结果来看,自实施现场考试以来,全国各核电厂现场考试不能通过的仅1人,通过率几乎100%,不能完成淘汰不合格人员的任务。

(2) 加强对执照考试试题和标准答案的审评,确保考试试题和标准答案的一致性和质量。

(3) 加强对核电厂的考委会委员资格的审定。确保各核电厂考委会委员能力的一致性。

4.2 加强对操纵人员考核和资格的监督审核

相关单位要通过做实做细相关审核工作,确保持照人员具有操纵核电厂控制系统的能力。

(1) 继续加强对操纵人员执照获取/延续资格的审查和监督,确保监督的有效性。

(2) 继续保持操纵人员对核电厂事故的处理能力,加强对每位操纵人员在日常运行过程中出现的事故处理具体表现的监督。

(3) 要重点关注操纵人员在培训和再培训中对事故处理的反应,确保操纵人员在持证期间操纵反应堆的能力,保障核安全。

4.3 重点关注操纵人员的心理健康和运行岗位禁忌症

相关单位应时刻关注操纵人员的心理状况,及时化解心理问题,确保反应堆安全运行。

4.4 加强对核电厂操纵人员日常管理工作的监督检查

相关单位应定期进行操纵人员岗位适应性评价,以确保操纵人员在持照期间能胜任操纵人员的岗位。

4.5 加强对操纵人员职业操守和行为规范的教育和监督

相关单位应通过对操纵人员职业操守和行为规范的教育和监督,倡导培育核安全文化,杜绝违规操作和弄虚作假,提高知识技能,严格尽职履责。

参考文献

- [1] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国核安全法 [S/OL]. (2017-9-1) [2023-11-3]. https://nnsa.mee.gov.cn/haqwh/xgyq/202008/t20200825_794972.html.
- [2] 生态环境部. 民用核设施操作人员资格管理规定 [S/OL]. (2017-9-1) [2023-11-3]. https://www.mee.gov.cn/gzk/gz/202112/t20211214_964075.shtml.
- [3] 国家核安全局. 关于进一步规范核电厂操纵人员岗位管理的通知(国核安发[2010]86号) [S/OL]. (2010-6-11) [2023-11-3]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xzgfxwj/202301/t20230117_1013592.html.
- [4] 国家核安全局. 核电厂操纵人员资质管理程序, 核安全司工作协调单 [2011] 1号 [S]. 北京: [2023-11-3]
- [5] 国家能源局. 核电厂操纵人员执照考核标准 (NB-T20257-2013) [S]. 北京: [2023-11-3]

Current Situation and Countermeasures of Nuclear Power Plant Operator License Management in East China

Liu Jian

(East Regional Office of the Nuclear and Radiation Safety Inspection, MEE, Shanghai 200233, China)

Abstract: This paper mainly introduces the current situation of operator license management of nuclear power plant in China. From the perspective of the national nuclear safety regulatory authority, the deficiencies are found in the process of the nuclear power plant operator license approval and renewal by inspection, and the improvement suggestions are put forward.

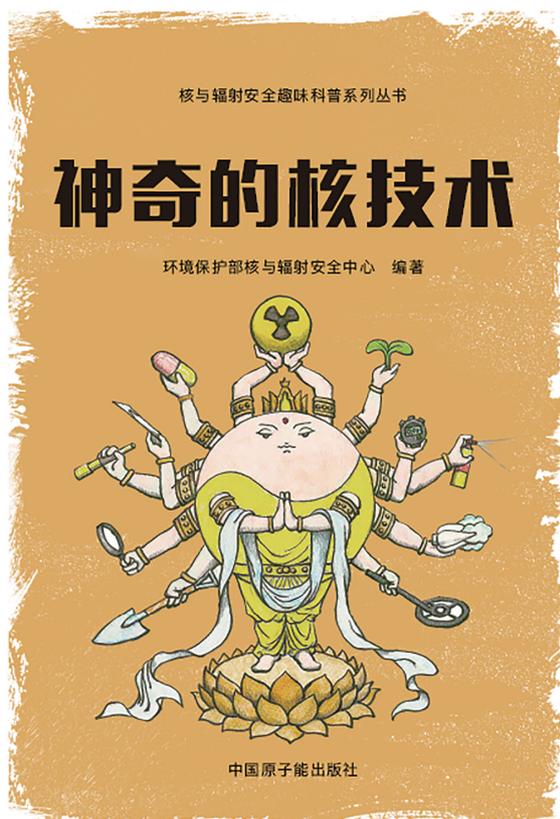
Keywords: nuclear power plant; operator; license; management

(责任编辑: 梁 晔)

《神奇的核技术》荣获环境保护科学技术奖（科普类）

近日,由生态环境部核与辐射安全中心编制完成的趣味科普图书《神奇的核技术》荣获 2023 年度环境保护科学技术奖(科普类)。

该图书语言通俗易懂,深入浅出,通过原创动漫卡通人物叙事的形式,介绍了核技术领域的基础知识,展现了核技术在工业、农业、医疗、环境保护、公共安全领域的应用现状。该书自出版以来在历年“4·15”全民国家安全教育日等重要宣传活动中被引用为宣传素材,同时被学习强国主平台专栏展播,为核技术的宣传普及做出了重要贡献。



公益广告



美丽中国·我是行动者

2024
六五环境日

美丽中国建设
全面推进

COMPREHENSIVELY PROMOTE
THE DEVELOPMENT OF A BEAUTIFUL CHINA

开展生态文明建设
全方位、全地域、全过程

中华人民共和国生态环境部

MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

公益广告



美丽中国·我是行动者

2024
六五环境日

美丽中国建设
全面推进

COMPREHENSIVELY PROMOTE
THE DEVELOPMENT OF A BEAUTIFUL CHINA

生态环境的内生动力
激发起全社会共同呵护

中华人民共和国生态环境部
MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

公益广告



美丽中国·我是行动者

2024
六五环境日

全面
推进
美丽
中国
建设

COMPREHENSIVELY PROMOTE
THE DEVELOPMENT OF A BEAUTIFUL CHINA

一体化保护和系统治理
坚持山水林田湖草沙

中华人民共和国生态环境部
MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

公益广告



美丽中国·我是行动者

2024
六五环境日

全面推进
美丽中国建设

COMPREHENSIVELY PROMOTE
THE DEVELOPMENT OF A BEAUTIFUL CHINA

共生的高度谋划发展
站在人与自然和谐

中华人民共和国生态环境部
MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

公益广告



核安全守护

美好生活

公益广告

中华人民共和国生态环境部

