

中国工程科技论坛

我国核能发展的再研讨

● 中国工程院

定价 60.00 元

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

中国工程技术论坛

我国核能发展的再研讨

Woguo Heneng Fazhan de Zaiyantao



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

2011年日本福岛核事故后,国内外对核电安全高度关注。为进一步推动我国核能科学发展,2012年6月4~5日,中国工程科技论坛第139场《我国核能发展的再研讨》在天津召开,主题为“我国核能的科学发展”。论坛主要围绕我国核能的科学发展进行战略思考,并对核电安全性、技术与资源支撑能力、发展速度与规模、高放地质处置以及我国内陆核电站发展等相关问题进行研讨。来自中国工程院、清华大学、中国核工业集团公司、中国广东核电集团有限公司苏州热工院的7位专家分别做了精彩的报告。与会的约200位专家、学者、大专院校科研人员、企业代表等认为本次论坛的举办对我国核能发展的方针、技术路线等提出了很好的咨询建议,对我国能源事业和国民经济的发展起到了一定的推动作用。本书是中国工程院中国工程科技论坛系列丛书之一,适合相关专业领域的科技工作者、战略咨询研究制定者,以及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

我国核能发展的再研讨 / 中国工程院编著. -- 北京:
高等教育出版社, 2013.5
(工程科技论坛)
ISBN 978-7-04-036998-4

I. ①我… II. ①中… III. ①核能-研究-中国
IV. ①TL

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032131号

总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 朱丽虹 封面设计 顾斌
版式设计 责任校对 责任印制

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷		网上订购	http://www.landaco.com
开本	850mm×1168mm		http://www.landaco.com.cn
印张		版次	2013年 月第1版
字数	千字	印次	2013年 月第 次印刷
购书热线	010-58581118	定价	60.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 36998-00

编辑委员会

主任：杜祥琬

副主任：陈念念

委员：潘自强 张金带 王 驹 周如明
王爱红 刘晓龙 薛 妍

目 录

第一部分

综述	3
----------	---

第二部分 专家报告及专家简介

对我国核能发展战略的几点思考	杜祥琬	11
吸取福岛核电站的教训,更安全的推进核电的发展	潘自强	16
中国内陆核电的发展	周如明	26
我国核电发展的铀资源支撑能力	张金带	43
高放废物地质处置:核能可持续发展的一个关键问题	王 驹	48

第三部分

部分参会人员名单	65
后记	68

第一部分

综 述

综 述

一、论坛背景及内容

2012年6月4~5日,第139场中国工程院科技论坛“我国核能发展的再研讨”在天津召开。参会人员有:中国工程院主席团成员、原副院长杜祥琬院士,以及工程院陈念念、钱绍钧、胡思得、邱爱慈、钱皋韵、陆佑楣、潘自强、李冠兴、孙玉发、叶奇蓁、余贻鑫、于俊崇、苏万华等13位院士,原国防科学技术工业委员会副主任、核能行业协会理事长张华祝,国家核电技术集团公司总经理顾军,中国核工业集团公司总工程师雷增光,国家核电技术集团公司总工程师王俊,中国广东核电集团有限公司总工程师赵华,中国电力投资集团公司副总经理张晓鲁,原清华大学常务副校长何建坤,天津市科委总工程师贾堤,天津大学副校长余建星等领导以及从事核技术工作的专家、学者、大专院校科研人员、企业代表等参会总人数达200余人。在为期一天的论坛中,7位院士、专家做了精彩的报告,并与听众进行了互动,取得了圆满成功。

2011年日本福岛核事故后,国内外对核电安全高度关注。中国工程院及时启动了“我国核能发展的再研究”重大咨询项目,项目于2012年初形成了《新形势下我国核电发展的建议》阶段研究报告,并在2月份召开的国务院常务会议上汇报了项目阶段研究成果,得到了国务院领导及有关部委的充分肯定,为国家核电发展战略的决策提供了有力支撑。5月31日,国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议,再次听取全国民用核设施综合安全检查情况汇报,讨论并原则通过了《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标》等两项决议,同意公布并向社会征求意见。

在此形势下,中国工程院及时主办本次论坛,具有十分重要的意义。本次论坛的研讨主题是“我国核能的科学发展”。论坛报告从我国能源结构的长远发展必然经历的三个阶段入手,阐明了驯服核能并确保安全是人类义不容辞的历史使命和责任,并对科学制定我国核能发展战略提出了意见和建议;深入分析了日本福岛事件辐射事故和我国现有核电站(含在建)的安全性,探讨了进一步提高核电安全水平的具体措施;在总结发展核电对于改善能源结构、提高能源安全、减少二氧化碳排放所起作用的基础上,研究了我国核能发展的战略定位,提出了到2020年我国投产运行的核电装机容量应达到6000~7000万千瓦的具体

建议,并探讨了实现这个发展规模和速度的可行性;论坛还就我国内陆核电站发展以及在核电发展过程中的资源支撑能力、高放废物处置等相关问题进行了评估和研讨。

二、整体情况

核(裂变)能是人类可利用的重要能源之一,它以清洁、安全、发展潜力大等特点为世界各国所重视并竞相发展。但在日本福岛事件发生后,国内外对核能的发展产生了许多不同意见。我国面对巨大的环境和节能减排压力,开展如何使我国的核电能够健康可持续发展的战略研究刻不容缓。对此,在深入分析福岛事件发生的原因和我国现有(包括在建)核电站实际情况的基础上,论坛对我国核能发展的方针、技术路线、管理体制、配套技术以及核安全、内陆核电站建设、核燃料循环、高中低放射废物处理技术等问题进行了研讨。

论坛于2012年6月5日在天津水晶宫饭店会议厅举行,陈念念院士主持,中国工程院主席团成员、原副院长杜祥琬院士出席论坛并作了题为《对我国核能发展战略的几点思考》的主题报告;潘自强院士、叶奇蓁院士分别以《吸取福岛核电站的教训,更安全地推进核电的发展》和《核电发展的规模和速度》为题做了演讲,清华大学何建坤教授就我国核电发展的若干建议做了发言,中核集团地矿事业部总工程师张金带、中核集团地质研究院副院长王驹、苏州热工院研究员周如明也分别围绕核电发展资源支撑能力、高放地质处置、内陆核电发展等方面做了专题报告。

论坛为做报告的几位院士和专家颁发了中国工程院论坛纪念牌。论坛进行得紧凑有序,气氛热烈。作为论坛承办方的天津市科委、核工业理化工程研究院为本次工程院科技论坛的成功举办做出了重要贡献。

论坛期间,天津市王治平副市长会见了出席论坛的院士及主要来宾。王市长对中国工程院和院士们长期以来对天津经济社会发展和科技创新的指导、支持表示感谢。他认为论坛在天津举办让更多的院士、专家了解了天津科技经济社会发展情况,为天津市从事能源领域研究的高层次人才搭建了一个技术交流平台,推动了天津市在该领域的技术发展、学科建设和人才培养。部分与会院士和专家还分别参观了天津市空客飞机制造厂、核工业理化工程研究院和中核(天津)机械公司。

三、主要观点

(一) 杜祥琬院士

杜祥琬院士首先指出,我国能源结构的发展过程必将经历三个阶段。目前我国处在以化石能源为主(占90%以上)的阶段,在2015年前后进入多元结构阶段,在此阶段必须靠可再生能源和核能二者的合力才能较早进入非化石能源为主的第三阶段并稳定发展。因此,人类无法弃核。

其次,杜祥琬院士就核裂变能在它发展的几十年历程中,曾发生过三里岛、切尔诺贝利和福岛三次大事故所带来的安全警示进行了分析。他认为:三次事故分别从内部风险和外部风险不同角度提供了互相补充的丰富经验教训和启示,深化了人们对核安全的理解。这表明:核事故是可分析、可认识的,而且每次核事故都带来了核安全技术和核安全管理水平的提高。杜院士指出,通过我国在福岛事故后及时开展的核电安全大检查肯定了我国核电站具备对严重事故的预防和缓解能力,应对极端外部事件具有一定安全裕度,安全风险处于受控状态;同时他也指出,要充分吸取各次核事故的教训。驯服核能必然是一个在实践中不断总结、提高、改进的过程。

之后,杜院士认为“发展核能既是战略必争,又是百年大计,需夯实基础、稳扎稳打”。为此,他强调要切实落实安全大检查提出的各项整改措施,提升核安全文化素养和水平;研究和制定更高的核安全标准,从选址、设计、堆型选择、建造、运行、管理等各环节确保运行安全,提高预防或缓解事故的能力,使放射性释放的潜在风险切实可控;必须科学制定我国核能发展战略,并在战略的指导下调整 and 制定核能发展规划及实现规划目标的路线图和具体措施;对内陆核电站场址的选择需作更充分的论证、制定严格的设计标准,更严格地约束排放;要重视开展核能长远发展的技术路线以及高放废物的分离—嬗变技术的研究、核废物最终处置问题的尽早研究和工程技术上的准备。

最后,杜院士认为,发展核能的根本目的是造福人民,发展核能是国家行为,需更好地理顺和完善管理体制和机制,并以各种方式和实施效果赢得公众的信心和支持。

(二) 潘自强院士

潘院士首先分析了福岛事故中突出的辐射问题,用该事件过程中排入大气和海洋中的放射性核素总量、事故较长时期内福岛县、周围居民以及工作人员分别所受的照射剂量等大量翔实数据,表明该事故对世界的影响按集体有效剂量

估计,不会大于切尔诺贝利的百分之一,从而消除公众对该辐射事故的恐慌心理;然后明确地陈述总结了福岛事故发生的原因和教训,提出要进一步提高核电的安全水平。

其后,潘院士通过我国核电厂地震海啸影响复核结果、防洪设计评估、对环境的影响、对公众健康影响、对人员身体健康影响等事实进行举例和数据分析,得出了福岛事故改变不了“核能是安全、环境友好能源”的基本结论。潘院士认为,尽管福岛事故产生的辐射照射对公众健康的影响是不大的,对工作人员产生的剂量基本上控制在可接受的范围内,且尚未发现可察觉的生态环境影响,但产生了较大范围的环境污染,经济损失是巨大的,对公众和社会的影响也是巨大的,是不可接受的。潘院士提出,核能界要充分认识到进一步提高核能安全的迫切性,以及推进核电持续发展的艰巨性,同时提出了有关的措施建议。

(三) 叶奇蓁院士

叶奇蓁院士就我国核电发展的建议速度和规模做了报告(略)。

(四) 张金带研究员

中核集团地矿事业部副主任、总工程师张金带首先分析了2020年我国核电规划目标对铀资源的需求情况,并从我国已探明的铀资源情况和天然铀生产能力以及海外铀资源开发和国际贸易情况两个方面进行了系统性分析评估。他认为,世界核电大国铀资源的保障都是利用“两个市场、两种资源”,在“较多发展核电的国家不产铀,较多产铀的国家不发展核电”的格局已延续了几十年的背景下,只要加强国内铀矿勘查和开发,加强对国外铀资源的开发和采购,建立多元化的铀资源保障体系,完全可以满足我国2020年核电发展规划的需要。

其后,张总又对我国2030、2050年铀资源保障能力进行了评估和建议。他在报告中谈到,铀资源是一个自然概念,也是一个经济概念,随着需求的拉动和技术的进步,肯定可以找到更多的铀资源。但为规避对外依存度过大所带来的风险,为了保持核能的可持续发展,从长远看,必须通过技术进步提高铀资源利用率,同时还必须提早安排增殖快堆研究和核燃料循环技术的发展问题。

(五) 何建坤教授

清华大学何建坤教授作了对《我国核电发展的若干建议》的发言(略)。

(六) 王驹研究员

随着我国核能事业的飞速发展,高水平放射性废物(简称高放废物)的处理和处置即将成为一个重大的安全和环保问题。核工业北京地质研究院科技副院长王驹研究员在介绍国内外进展的基础上,重点讨论了我国高放废物地质处置面临的挑战。

王驹首先介绍了高放废物的分类、来源、地质处置的概念,以及目前世界上普遍接受的深地质处置方案。认为高放废物的地质处置是一项极其复杂的系统工程,具有长期性、复杂性、艰巨性、综合性和探索性等特点。同时也说明,国内外大量的理论研究、实验室研究、工程尺度验证和示范,以及计算机模拟均表明高放废物能够得到安全处置。

其次,王驹就国际高放废物地质处置特点进行了介绍,指出,欧、美、日等有核国家和地区通过制定国家政策、颁布法律法规、成立专门机构、拨付专门经费、制定长期科技开发计划、建立专门的地下研究设施和开展长期研究等方式,从政策、法规、机构、经费和科研等方面确保高放废物的安全处置。在过去 10 多年中,各国在高放废物地质处置法规、选址、场址评价、工程屏障、地下实验室、概念设计、性能评价、处置库建造、公众接受等方面取得了重要进展。并重点介绍了美国、瑞典、德国、瑞士、法国、日本、芬兰等几个国家的研究开发进展情况和地下实验室的重要作用,同时也介绍了我国在这些方面的有关情况。

最后,王驹提出,高放地质处置除面临着一系列社会和人文科学方面的难题外,还在科学、技术和工程上面临一系列重大挑战。呼吁我国应当在大力发展核电的同时,也要高度重视高放废物的地质处置。

(七) 周如明研究员

周如明研究员针对中国工程院的研究报告《新形势下我国核电发展的建议》(2012 年 2 月)中提出要“统筹沿海和内陆核电厂的布局”的建议,认为需要对影响内陆核电厂布局的关键因素做出深入的分析。首先,周如明从如何理解我国内陆核电厂环境辐射安全的审管要求入手,探讨了我国有关核电厂选址、设计和运行的核安全法规,我国有关内陆核电厂放射性液态流出排放的审管要求。通过对内陆核电厂排放口下游浓度的控制要求与国际相关饮用水标准的数据比较,认为这些审管要求可以确保内陆核电厂排放口下游 1 km 处水体满足我国生活饮用水标准中的放射性指标要求。从我国水资源分布特点来看,内陆核电厂可以布局在长江流域以及其他水资源相对丰富的地区。

其次,周如明又重点对美国 38 个内陆核电厂和法国多个内陆核电厂的水环

境影响进行了评估,分析了美国水资源分布与内陆核电厂布局的关系。指出,我们尤其要注意借鉴美国 NRC 对内陆核电厂环境问题的识别方法和评估结论,包括放射性液态流出物排放的环境辐射影响和核电厂的放射性液态流出物排放控制的水平。美国内陆核电厂的 2000 堆年运行经验和法国内陆核电厂的 1000 堆年运行经验均证实,内陆核电厂放射性液态流出物的排放不会影响电厂排放口下游作为饮用水源、灌溉、捕鱼和娱乐活动的功能,所产生的环境辐射影响是处在平均本底辐射水平涨落范围内的小影响。

最后,周如明指出,类似福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的。通过总结福岛核事故来加强纵深防御安全体系,可以保障内陆核电厂周围的水资源安全,但我们仍有必要做好内陆核电厂在严重事故工况下确保水资源安全的各种应急预案,使得能在一旦发生严重事故工况下,实现放射性污水的“可存贮”、“可封堵”、“可处理”和“可(与地表水体实体)隔离”。

第二部分

专家报告及专家简介

对我国核能发展战略的几点思考

杜祥琬

中国工程院

一、我国能源结构的长远发展将经历三个阶段

目前我国能源结构处在以化石能源为主(占90%以上)的阶段。如果以非化石能源所占比例超过10%作为进入多元结构的标志,则我国可能在2015年前后进入能源多元结构阶段。

在这个阶段初期的几十年中,化石能源仍将占大头,但煤炭和石油年消耗的总和占比将逐步下降。这个年消耗总和的绝对量,将持续一段时间(约20年左右)的增加,并达到历史性的峰值,然后缓慢减少。这个变化趋势的必然性由三个原因所决定:一是煤炭、石油带来的环境问题必须得到控制;二是更根本的原因在于煤炭、石油的不易再生性;三是洁净能源(包括可再生能源、核能及天然气)的替代能力将逐步提高。在煤炭与石油年消耗总和的绝对量达到峰值后,我国能源需求总量的增量,将由上述洁净能源来补充,这些洁净能源在我国一次能源结构中的占比将逐步增加。这个多元结构阶段大约会持续百年左右,然后进入非化石能源为主的第三阶段,这个新阶段的标志是非化石能源将占到一次能源总量的90%以上。

涉及一个世纪以后的事,很难定量说准,然而,讨论这个长达百年以上的“能源结构三阶段”的战略意义在于,它可以使我们从方向上定性判断各类能源消长的大趋势,从而增强战略谋划及政策制定的稳定性。例如,包括非常规天然气在内的天然气,属于较洁净的化石能源,从资源和开发潜力看,应成为我国能源发展的重点和亮点之一。但定量而言,即使通过努力到本世纪中叶,天然气的供应能力比现在增加一倍甚至两倍,也只能占到届时一次能源总量的百分之十几。届时,它将成为一个绿色能源支柱,但不能只靠天然气替代煤炭和石油;欲实现更高比例的替代,必须加上可再生能源和核能的贡献。

可以肯定,在多元结构阶段,天然气将为能源结构的改善起到重要作用,但它和可再生能源及核能的发展并不是相互排斥的,三者共同努力,一个也不能少,才有望使洁净能源在2050年的中国一次能源结构中占到半壁江山(中国工

程院的研究报告),并进一步增加。而非化石能源为主的阶段,则须靠可再生能源和核能二者的合力才能较早到来并稳定发展。

二、人类不可能弃核。驯服核能确保安全是人类义不容辞的历史使命和责任

非化石能源包括可再生能源和核能。可再生能源中的太阳能、风能、生物质能等可看作是广义的太阳能。而太阳能源于核能,是太阳内部发生的核聚变释放能量的一种形式。可以说没有核能就没有人类,人类与核能天然地结下了不解之缘;另一方面,地球上可控的核能发展,大体上将经历由利用核裂变能走向利用核聚变能两大阶段,目前是利用核裂变能,而未来的核聚变电站将为人类提供可永续发展的核能,成为受控核能的归宿。从以上两重意义上说,人类无法弃核。

现阶段有现实意义的是核裂变能。在它发展的几十年历程中,曾发生过三哩岛、切尔诺贝利和福岛三次大事故。尽管因核电事故死亡的人数远少于煤炭的矿难事故和交通事故,但由于核事故具有一定的后效性和扩散性,每一次事故都增加了人们对核电安全的担忧,甚至使人谈核色变,因而给核电的发展势头带来负面的冲击。福岛事故后,德国、瑞士等国宣布逐步弃核,亦即放弃本国核裂变电站的发展。这些国家的弃核对世界核能的全局影响不大。

美国对本国核电安全性重新进行了评估,美国核管会评估的结论是:像福岛事故这样的事件序列在美国不可能发生。因此,在役核电机组继续运行,并继续进行核电站延寿和新建核电站的审批。我国在福岛事故后,及时开展了核电安全大检查。检查结果,一方面肯定我国核电站具备对严重事故的预防和缓解能力,应对极端外部事件具有一定安全裕度,安全风险处于受控状态;同时指出,要充分吸取各次核事故的教训,采取进一步加强核安全的措施,落实安全大检查提出的整改意见,改进和提升安全水平。英、法、俄及韩、印等国和国际原子能机构也对福岛事故进行了认真分析,对核电的安全性重新进行了评估,作出了明确的结论,确认了继续发展核电的方针。世界核能发展的基本格局是稳定的。

这种战略上的稳定性,有以下三方面的深层次原因:第一,发现和认识核能,是二十世纪人类最伟大的科学成就之一。人类既然认识了核能的巨大潜力和价值,就不可能把它锁在抽屉里、关在笼子里,必然会努力去开发它、掌握它,使之成为人类的驯服工具,不驾驭核能才是真正的危险。第二,原理上,核裂变能是可以驾驭、可以控制的;实践上,也已证明了这个可控性。至2010年底,全球共441座运行的核裂变反应堆,总装机3.75亿千瓦,年发电量占全球电力的15%。30个拥有核电的国家累计已有1.4万堆年的运行经验。实践证明,裂变核电站

是可以做到安全的。第三,对每次核事故,经过仔细的、全面的研究,对事故发生的具体原因、给出的经验和教训,都有明确的结论。三次事故分别从内部风险和外部风险不同角度提供了互相补充的丰富经验教训和启示,深化了人们对核安全的理解。这表明:核事故是可分析、可认识的,而且每次核事故都带来了核安全技术和核安全管理水平的提高。驯服核能必然是一个在实践中不断总结、提高、改进的过程。

三、发展核能既是战略必争,又是百年大计, 需夯实基础、稳扎稳打

核电在战略上具有竞争力,根本原因在于,它有着不可替代的优点:它是高能量密度的能源;输出功率稳定高效;它是比较清洁、低碳、环境友好的能源;这些优点的展现又是以核电可以做到安全为基础和前提的。我国发展核能和可再生能源是为了逐步替代化石能源,而高比例的替代要求其最终必然发展到一个相当大的规模。同时,核能是一个科学技术要素很多的产业,其安全和规模化发展必将带动多方面的科学、技术和工程领域的进步,对国家来说,这是一个争占科技优势制高点的大战略,也是创新型国家的重要标志之一。

我国已运行 15 台核电机组,装机 1257 万千瓦,几代核电人的卓越努力,使之保持着良好的安全纪录。这既是发展的基础,也是信心的根据之一。核电目前在我国电力中所占的比例不足 2%,有着很大的发展潜力,在这个战略必争的领域,保持指导思想和方针政策的稳定性和持续性是十分重要的。

历史地看,我国核能事业还很年轻,处在发展的初级阶段。需要清醒地认识到,我国核能基础研究薄弱,技术储备不足,对长远发展目标和路线图的论证还不够深入,全产业链各个环节的发展尚未协调配套,核能发展的法制建设和管理体制有待改进完善。在坚定发展核能的同时,需强化风险意识,努力夯实各方面的基础,有一个“百年大计、稳扎稳打”的心态和安排。“不要大跃进”的意见是对的,其实,各行各业乃至国民经济全局都应避免违反科学规律的跃进。在我国的发展史上,未曾有过因头脑冷静稳步发展造成的失误,倒是有狂热的“大跃进”使国家损失惨重的深刻教训。我国核能迄今的发展是比较健康的。中央提出,国民经济要稳中求进,核能今后的发展也应该是这样,为此,需认真做好一系列工作:

- 切实落实安全大检查提出的各项整改措施,提升核安全文化素养和水平;研究和制定更高的核安全标准,从选址、设计、堆型选择、建造、运行、管理等各环节确保运行安全,提高预防或缓解事故的能力,使放射性释放的潜在风险切实可控。

- 科学制定我国核能发展战略,并在战略的指导下调整 and 制定核能发展规划及实现规划目标的路线图和具体措施。中国工程院核能研究课题组建议,在2015年装机约达4000万千瓦规划的基础上,2020年我国核电运行装机达6000~7000万千瓦,在建约3000万千瓦,可供研究和决策参考。对进一步实现更大规模核电的目标和时间表,有关单位和专家已有一些定量的研究和建议,尽管各家的估算存在着差异,却有一个共同点,即规模与时间表要和铀资源的可供性相匹配。获取铀资源有几种途径,完全可以通过对情况的科学调研与分析,对技术可行性、市场可能性、供应安全性、经济性及提高铀资源利用率的途径,得到更中肯的认识,并使相应的研发投入和政策措施的制定,也建立在更充分的科学论证的基础上。

- 沿海和内陆核电站都要做到安全,对内陆核电站确定严格的设计标准,且对排放约束更严是必要的。在场址的选择上需作更充分的论证,特别是对避开地震带和水源的稳定可供性应予以高度重视。欧美60%的核电机组建在内陆,美国104座运行中的反应堆,100个在内陆,我国可充分借鉴其经验。

- 关于核能长远发展的技术路线,涉及热中子堆以后如何发展的问题。我国目前启动了实验快堆的研究,但快堆的发展战略尚不清晰,商用快堆采取何种技术路线,后处理技术如何选择,其他堆型(包括裂变—聚变混合能源堆、小型核反应堆、核动力堆等)前景如何……这些问题,宜多做研究,多进行论证。与此相关的是,需加强与核能有关的基础性研究,如与反应堆质量和寿命有关的材料学研究、核反应堆新概念、新技术、新工艺研究、从海水中提取铀的研究等。我国未来的核能规模可能是世界上最大的,它必须建立在最先进而又可靠的科学技术基础之上。

- 高放废物的分离—嬗变技术和核废物的最终处置问题,需早做研究和工程技术上的准备。高放废物的地质处置,需保持长期与生物圈隔离,避免对环境的危害。在已有工作的基础上,应加强研究和部署。

- 发展核能是国家行为,需更好地理顺和完善管理体制和机制。发展核能的根本目的是造福人民,有关的科学普及工作和公众参与需要制度化、常态化,这对赢得公众的信心和支持是十分重要的。



杜祥琬 1938 年出生, 院士, 应用物理与强激光技术专家。出生于河南省南阳市, 原籍开封。1964 年毕业于苏联莫斯科工程物理学院。曾任中国工程院副院长。中国工程物理研究院研究员、高级科学顾问。中国科协荣委。曾主持我国核试验诊断理论和核武器中子学的系统性创新性研究。是我国新型强激光研究的开创者之一, 作为 863 计划激光专家组首席科学家, 主持研究、制定了符合国情的目

标、重点与技术途径等发展战略与实施方案; 在有关物理规律和关键技术研究中获得重要成果; 提出并成功主持了综合实验研究, 解决了多项单元技术衔接与总体集成的工程技术问题, 使我国氧碘化学激光等新型强激光技术跨入世界先进行列。2001 年后任 863 计划先进防御技术领域专家委员会主任。获国家科技进步特等奖一项、一等奖一项、二等奖两项, 部委级一、二等奖十多项。2000 年获何梁何利科技进步奖。

1997 年当选为中国工程院院士, 2006 年当选为俄罗斯国家工程科学院外籍院士。

杜祥琬主持研究了“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”、“我国核能发展的再研究”、“中国可再生能源发展战略研究”等我国能源发展战略重大咨询研究项目, 现任国家能源专家咨询委员会副主任。参加了我国应对气候变化减排承诺的科学论证, 主持了“应对气候变化的科学技术问题研究”等重大咨询研究项目, 现任国家气候变化专家委员会主任。

作为中国代表团高级顾问参加了哥本哈根联合国气候变化大会以及坎昆大会、德班大会等。在会上的中国中心, 从能源的角度, 详细阐述了中国为降低碳排放强度需要做出的艰苦努力, 同时宣讲了中国在主动承诺并实现目标方面的决心。

吸取福岛核电站的教训,更安全地 推进核电的发展

潘自强

中国核工业集团公司

一、福岛核事故的概况

(一) 福岛核事故的起因

从图 1 看(见下页),事故是地震加海啸,主要是海啸引起的。

(二) 辐射事故概况

在福岛事故中大量放射性物质从反应堆释放到环境中。表 1 列出了释放到大气中的放射性物质总量,作为对比同时列出了切尔诺贝利事故和三里岛事故释放到大气中的放射性物质总量。由表中可见,福岛事故排入大气中的¹³¹I 和¹³⁷Cs 比切尔诺贝利事故低约一个数量级。

表 1 排入大气中的放射性总量

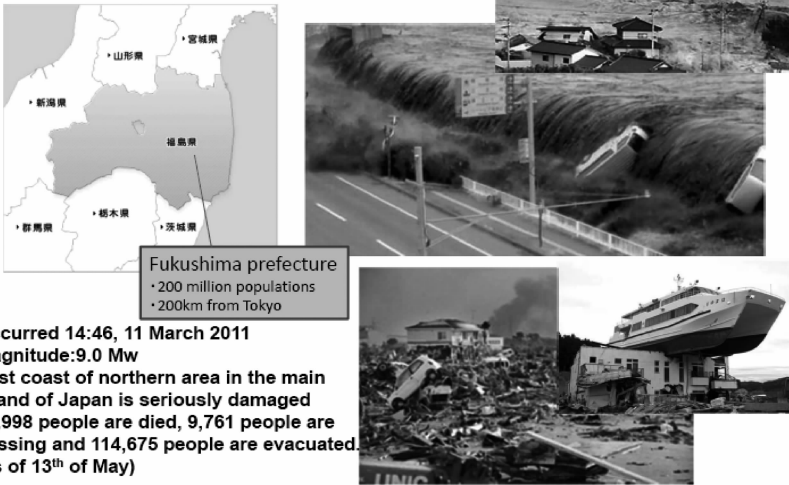
单位: Bq

放射元素	切尔诺贝利事故	三里岛事故	福岛事故
¹³³ Xe	6.5×10^{18}	3.7×10^{17}	
¹³¹ I	1.7×10^{18}	5.5×10^{14}	1.3×10^{17} * $1.1 \sim 1.6 \times 10^{17}$ **
¹³³ I	2.5×10^{18}		
¹³⁷ Cs	8.5×10^{16}		6.1×10^{15} * $0.9 \sim 3.7 \times 10^{16}$ **
⁹⁰ Sr	1×10^{16}		
²³⁹ Pu	1.3×10^{13}		

* 日本第一次公布

** 各种文献。

Tsunami in Fukushima Prefecture



Fukushima prefecture
 • 200 million populations
 • 200km from Tokyo

- Occurred 14:46, 11 March 2011
- Magnitude:9.0 Mw
- East coast of northern area in the main island of Japan is seriously damaged
- 14,998 people are died, 9,761 people are missing and 114,675 people are evacuated. (as of 13th of May)

Major root cause of the damage

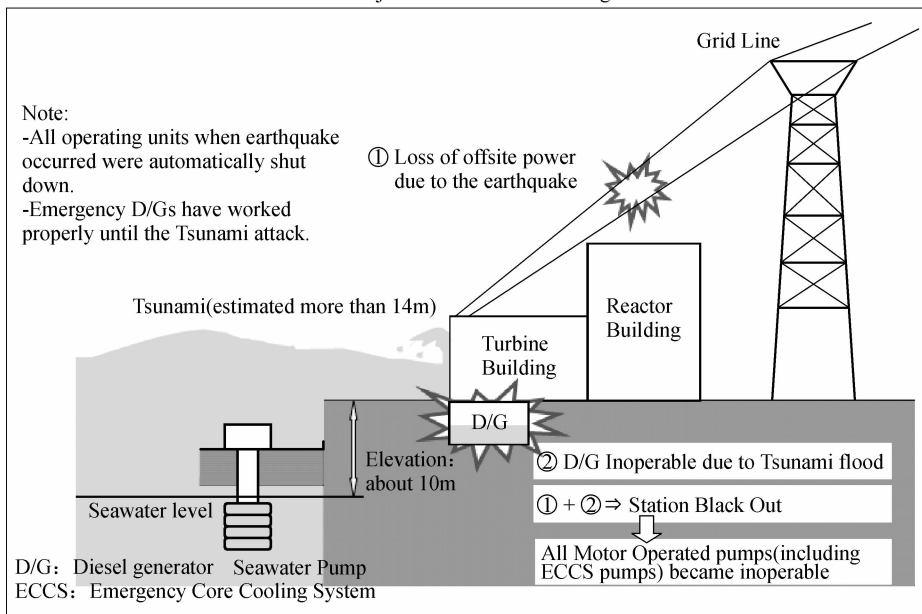


图 1 日本福岛核事故概况

到现在为止,没有一个很确切的排入海洋的放射性核素总量数据。估计排入海洋中的¹³⁷Cs的放射性总量 > 10¹⁵ Bq,福岛事故造成的影响估计四到五年以后会扩散到北美海岸,海水浓度大约小于 3 Bq/m³。

WHO 今年三月底发表了一个关于儿童甲状腺剂量率分布的保守估计数据,对于¹³¹I,福岛大多数地区是 10 ~ 100 mSv,个别区域是 100 ~ 200 mSv,日本范围内是 1 ~ 10 mSv,而在世界范围小于 0.01 mSv。

表2列出了2011.6.27~9.30期间,居民所受内照射(^{134}Cs 、 ^{137}Cs)剂量。表3列出了福岛周围居民所受累积剂量调查结果。由表中可见,99.7%均小于10 mSv。表4列出了福岛事故后各地区居民所受外照射剂量。

表2 居民所受内照射剂量统计数据

内照射剂量	人数
< 1 mSv	4447 人
1 mSv	6 人
2 mSv	8 人
3 mSv	2 人

表3 福岛事故周围居民累积剂量统计数据

累积剂量	人数(%)
< 1 mSv	998(62.8%)
< 5 mSv	1547(97.4%)
< 10 mSv	1585(99.7%)
> 10 mSv	4(最大 14.5 mSv)

表4 福岛事故后各地区居民所受外照射剂量

地区	外照射剂量(mSv)	
福岛	两个高点	10 ~ 50
	大多数	1 ~ 10
日本其他地区	0.1 ~ 1	
世界其他地区	<0.01	

对福岛核电站中20 115名工作人员在2011.3~2012.1.31期间所受照射的统计数据是,有66%的人员照射剂量<10 mSv,有167人剂量>100 mSv,有6人剂量>250 mSv,其中最大是678.8 mSv。

在事故中死亡6人,均是非辐射因素造成的。其中2人死于海啸;2人死于心脏病,这两个人年龄是65至70岁;另外2人因其他因素死亡。

综上所述,福岛核事故导致反应堆堆芯熔化,一回路密封被破坏,大量放射

性物质释放到环境中,但由于及时采取了适当的防护措施,工作人员所受辐射照射低于人体可感觉水平,居民所受剂量在世界天然本底涨落范围内,没有发现任何对生态系统的影响。但对社会和经济造成了重大影响和损失,是不可接受的。

二、深入研究和吸取事故教训,进一步提高核电的安全水平

在福岛核事故中,首先应该吸取的教训是极端外部事件不够保守,其次是外部工程抢险措施不够,例如外部电源,外部冷却水、遥控操作和测量装置都存在缺陷。总的来说,对极端自然事故考虑不够,场内应急相对薄弱,防止放射性废水泄漏和处理的设施也是不够的。

日本监管机构独立性较弱,众所周知,日本核安全监管部门是工业厅下面的一个系统。它的安全责任不够明确,尽管有一个安全委员会,但是安全职能也不够明确。

福岛核事故应该给我们哪些经验教训呢?

(1) 应该加强核安全标准的研究,尽快改变中间大、两头小的状态。安全标准的制定应在大量研究工作的基础上,尽快制定“原子能法”、“放射性废物管理法”、“核安全法”等龙头法律。同时要加快制定“导则”和“工业标准”,并且协调“标准”和“法规”的关系。

(2) 加强外部事件研究,强化纵深防御,要深入研究地质、洪水、海啸等灾害的预防,加强应对极端外部事故的抢险设施,加强核安保措施方面的研究。

(3) 开展严重事故机理研究,增强严重事故预防和缓解能力。按照我国目前核电发展的规模,我们要引进人才,重视开展严重事故机理方面的深入研究。

(4) 强化核与辐射安全的研究,加强核安全基础研究,设立专业研究机构。

(5) 强化高放射性废物处理、处置研究,这也是目前国际上辐射安全很重要的一个方面。

(6) 提高安全文化建设,制定专门的“安全文化”导则。

(7) 加强应急体系和应急能力建设,建立和加强核应急救援和专业队伍的建设,明确和加强核集团公司的职责,这些都是很有必要性的。

三、福岛事故改变不了核能是安全、环境友好能源的基本结论

(一) 我国核电厂地震海啸影响复核结果

福岛事故是在特定条件下发生的事故。我国沿海不具备发生灾难性地震海啸的条件。通过对我国沿海 55 个观察点的调查,没有发现海啸产生的堆积物。

图 2 和图 3 描绘了琉球海沟和马尼拉海沟地震海啸影响。从图中可知,无

论琉球海沟地震,还是马尼拉海沟地震,对我们的影响都不大。

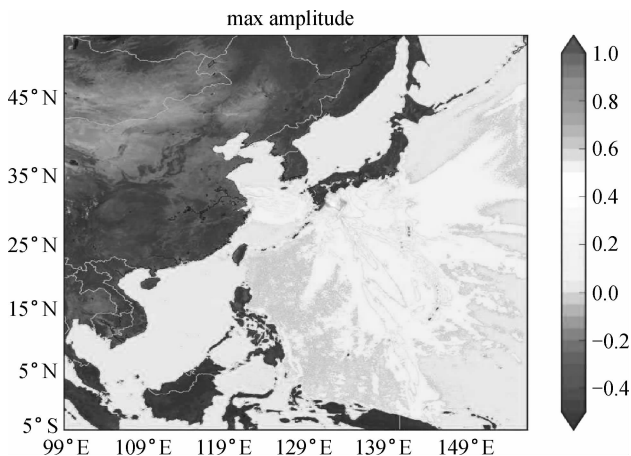


图2 琉球海沟地震海啸影响

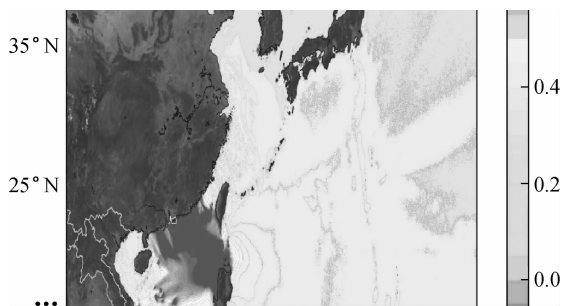


图3 马尼拉海沟地震海啸影响

(二) 我国核电厂防洪标准评估

表5列出了我国滨海核电站可能最大风暴增水与可能最大海啸增水对比表。由表中可见:可能最大海啸增水远小于可能最大风暴增水。可见海啸对我国核电厂影响不大。

表5 我国滨海核电厂址可能最大风暴增水与可能最大海啸增水对比表

单位: m

滨海核电厂址名称	可能最大风暴增水	可能最大海啸增水
海南昌江核电厂	3.71	<0.80
广东台山核电厂	5.23	2.41
广东阳江核电厂	5.19	1.16

续表

滨海核电厂址名称	可能最大风暴增水	可能最大海啸增水
广东大亚湾核电基地	5.30	1.16
福建宁德核电厂	5.12	<0.50
福建福清核电厂	4.37	<0.50
浙江三门核电厂	4.22	1.06
浙江秦山核电基地	5.44	0.53
江苏田湾核电厂	4.33	0.51
山东海阳核电厂	3.96	0.23
辽宁红沿河核电厂	2.49	0.55

(三) 核能是安全、环境友好能源

在环境影响方面,煤电链在正常情况下排出 SO_2 和 NO_x 等对森林、农作物等有可能产生可察觉的影响。而核电链,除切尔诺贝利事故外,未发现可察觉的影响。在固体废物占地面积方面,煤电链是 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,核电链是 $1 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$;在地表塌陷方面,煤电链是 $1 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,核电链 $1.6 \times 10^2 \text{ m}^2 \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$ 。所以,核能是一种环境友好的绿色能源。

在对公众健康影响方面,用归一化集体有效集体剂量当量来比较,用辐射照射评价,煤电链是 $420 \text{ 人} \cdot \text{Sv} \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,核电链为 $8.39 \text{ 人} \cdot \text{Sv} \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,煤电链约为核电链的 50 倍;用非辐射的健康危害评价方法,煤电链为 $12 \text{ 人} \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,核电链为 $0.67 \text{ 人} \cdot (\text{GW}_e \cdot \text{a})^{-1}$,煤电链比核电链高 1 个数量级。

表 6~8 分别列出了我国煤电链、核电链温室气体排放系数以及国外不同能源链温室气体排放系数。表 6 是 80 年代末 90 年代初煤电链温室气体排放系数,总计为 $1302.3 \text{ g} - \text{CO}_2/\text{kWh}$,现在可能要低一点。表 7 是核电链温室气体排放系数,生产建设和运行期间的总计为 $13.71 \text{ g} - \text{CO}_2/\text{kWh}$ 。比较而言,核电链温室气体排放系数约为煤电链的 1%,先进的燃煤技术减少每吨碳排放 85 美元,核电厂减少每吨碳排放是 29.5 美元,所以核电厂是降低温室气体的有效途径之一。

表 6 我国煤电链温室气体排放系数 单位: g - CO₂/kWh

	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	合计
开采	132.4	3.1	72.4	207.9
选煤			0.54	0.54
运输			6.24	6.24
自燃		2.7	65.2	67.9
电厂建设			1.32	1.32
供电运行		40.4	978	1018.4
				1302.3

表 7 我国核电链温室气体排放系数 单位: g - CO₂/kWh

材料名称	建设期间合计	生产运行期间合计	总计
水泥	3.14	3.52×10^{-3}	3.14
碳钢	3.11	2.20×10^{-1}	3.33
不锈钢(合金钢)	1.86×10^{-1}	1.43×10^{-2}	0.20
铜	2.07×10^{-1}		0.21
铝	2.10×10^{-2}		0.02
硝酸		8.32×10^{-1}	0.83
工艺用煤	6.02×10^{-2}	8.53×10^{-1}	0.91
石灰	6.63×10^{-5}	9.42×10^{-4}	1.01×10^{-3}
火电	4.87×10^{-3}	5.06	5.06
合计	6.726	6.85	13.71

表 8 不同能源链温室气体排放系数 等效碳 g/kWh

不同能源链	90 年代技术		新技术
	最大	最小	
褐煤	336	261	228(2005 ~ 2020)
煤	357	264	206(2005 ~ 2020)
石油	246	219	149(2005 ~ 2020)

续表

不同能源链	90 年代技术		新技术
	最大	最小	
太阳能	76.4	27.3	8.2(2010 ~ 2020)
水力	64.4	1.1	
生物质	16.6	8.4	
风	13.1	2.5	
核	5.7	2.5	

表 9 列出了 1945 年 ~ 2007 年期间全世界和中国因核与辐射事故导致死亡和急性损伤的人数。从表 9 可以看出,由于世界核事故造成的死亡人数为 49 人,中国核设施无死亡事件,说明我国核设施安全记录是良好的。与其他工业相比,核工业的安全是好的。

表 9 1945 年 ~ 2007 年期间世界范围和中国涉核死亡和急性损伤人数统计

类型	1945 ~ 1965		1966 ~ 1986		1987 ~ 2007		总计		
	死亡	急性损伤	死亡	急性损伤	死亡	急性损伤	死亡	急性损伤	
世界	核事故	12*	42	34**	140**	3	1	49	183
	辐射事故	4	4	3	7	0	1	7	12
	辐射与放射性同位素设施和研究	7	14	30	190	21	258	58	462
中国	核事故	0	0	0	0	0	0	0	0
	辐射事故	0	0	0	0	0	0	0	0
	辐射与放射性同位素设施和研究	2	17	1	11	7	21	10	49

* 其中 3 人死于非辐射因素。

** 其中切尔诺贝利事故死亡 28 人,急性损伤 134 人。

另外,需要说明的是,内陆核电站与沿海核电站从安全和环境看,没有原则上的差异。

总之,福岛事故改变不了核能是安全、环境友好的基本结论。

四、核能界要充分认识到进一步提高安全的迫切性， 以及推进核电持续发展的艰巨性

福岛核事故产生的辐射影响不大,对工作人员产生的剂量基本上控制在可接受的范围。到现在为止,尚未发现可察觉的生态环境影响。但产生了较大范围的环境污染,经济损失是巨大的,对公众和社会的影响是巨大的,是不可接受的。所以,如果不采取必要措施,核能的发展是困难的。

我们看到,社会上对核有一些看法。有一个说法是“切尔诺贝利事故死亡7000人,秦山核电站如发生事故则可能死30万人”。1999年日本JCO事故是一个临界事故,根本不太可能对环境产生多大影响,只是在一公里以内可能有影响,但是我们国家卫生部、环保部等全部启动监测措施进行全国监测,说明了整个社会对这个问题的看法。

再举一例,1990年河南杞县辐照装置发生运行事件,导致近10万人逃离。这就反映了我们必须要考虑核电发展任务的艰巨性。

1982年秦山选址环评未通过,1983年在非常激烈的辩论下通过。所以历史经验告诉我们,发展核电道路艰难。当认识到这个问题时,核工业界1983年着手开展核设施30年环境评价,评估核设施可能的影响。当时原子能院、清华大学等单位开展了核电、煤电气态流出物排放影响的研究。

联合国大会2012年关于“联合国原子辐射影响科学委员会”的决议提出要求研究不同能源排放放射性的影响,表明联合国意识到这是一个国际大问题。所以我们也要重视这个问题。

最后提出三点建议:

- (1) 实际上消除放射性大规模释放,提高核能的可接受性。
- (2) 要加强放射性废物的处理与处置,减小公众的后顾之忧。
- (3) 必须加强环境影响评价、公众沟通和生物效应研究,提高公众的可接受性。

总之,核能是安全的,但是现在要发展,必须更加重视核能安全和环境安全,推进这方面工作的发展。



潘自强 现任中国核工业集团公司科学技术委员会主任,兼任国家环保部核安全与环境委员会副主席,国家环境咨询委员会委员,国务院事故应急专家委员会委员,国家核事故应急专家委员会主席,中国核学会辐射防护分会理事长、中国环境学会核安全和辐射环境专业委员会主任、联合国原子辐射效应科学委员会中国代表和国际放射防护委员会主任委员会委员等职。1997年当选为中国工程院院士。

早期完成了多项辐射防护监测技术,提出了我国保健物理学框架,为保证核工业良好安全记录作出了重要贡献。成为辐射防护学科的主要带头人之一。完善了“天然辐射本底调查和国民剂量评价”方法学,主持完成了“核工业30年辐射和非辐射环境质量评价”,发展了“能源与环境评价”方法。在辐射防护标准、核事故应急、放射性废物安全等方面作出了贡献。近年,主要从事能源与环境、天然辐射影响和核与辐射防护等方面的研究。发表论文200余篇,编写专著25本。获国家和部级奖9项。

中国内陆核电的发展

周如明

苏州热工研究院

一、引言

目前,我国已运行的核电机组 15 台,装机 1257 万千瓦;在建核电机组 26 台,装机 2884 万千瓦。到 2015 年,我国核电总运行装机将超过 4000 万千瓦,但这些机组均位于沿海地区。

我国东部沿海地区经济发达,常规能源资源短缺,电价较高,核能在经济上具有竞争力,因此,我国已运行和在建的核电厂都率先在沿海地区建设。随着国家实施中部崛起战略,湖北、湖南和江西等内陆省份 GDP 相继突破万亿元,进入社会经济快速发展阶段,从能源资源短缺以及电网接纳能力和核电电价竞争性等角度来看,这些内陆省份均像上一世纪 80、90 年代沿海地区那样,迫切需要建设核电,且具备建设核电的条件。

中国工程院的研究报告《新形势下我国核电发展的建议》(2012 年 2 月)中提出要“统筹沿海和内陆核电厂的布局”,而我国在安排内陆核电厂的布局时,需要克服一些认识上的障碍,需要对影响内陆核电厂布局的关键因素做深入的分析,包括:如何理解我国内陆核电厂环境辐射安全的审管要求;如何借鉴国外内陆核电厂长期运行中积累的环境影响评估经验;如何吸取福岛核事故教训,保障内陆核电站周围水资源的安全等。

自 2008 年以来,中国核能行业协会已经组织完成了两项与内陆核电建设有关的课题研究:《内陆核电厂需关注的问题及不同类型核电机组的适宜性分析》(2008 年 11 月);《内陆核电厂水环境影响的评估》(2011 年 12 月)。目前,中国核能行业协会正在继续组织《内陆核电厂环境影响的评估》的课题研究。本文根据这些软课题研究的成果,就以上问题进行讨论。

二、内陆核电厂环境辐射安全的审管要求

(一) 有关核电厂选址、设计和运行的核安全法规

纵观国际上已经发布的有关核电厂选址、设计和运行的各种核安全法规,对

于内陆核电厂和沿海核电厂的要求均是相同的。

我国的核安全法规体系基本上是参照 IAEA(国际原子能机构)的法规体系建立的,同时也考虑了美国和法国等主要核电国家有关核电厂安全的监管要求。我国的各种核安全法规在制定时也均未对内陆核电厂提出特殊的要求。换言之,从核安全的角度来看,在我国沿海地区建造的核电机组也适合在我国内陆地区建造。

(二) 我国有关内陆核电厂放射性液态流出排放的审管要求

对于内陆核电厂,我国有关部门和社会公众均十分关注放射性液态流出物排放的影响,而我国环境保护部已经参照 IAEA 的相关法规与导则,为内陆核电厂的放射性液态流出物排放制定了严格的多层次审管要求^[1]:

第一层次是公众个人的剂量限值(也称基本标准)。国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871 - 2002)中,等效采用相关的国际标准,将公众个人剂量限值规定为 1 mSv/年。

第二层次是核电厂的剂量约束上限值。国家标准《核动力厂环境辐射防护规定》(GB6249 - 2011),明确将 0.25 mSv/年的个人有效剂量作为核电厂的剂量约束上限值。

第三层次是剂量约束值或排放量控制值,这个层次反映了辐射防护最优化以及 ARALA(可合理达到的尽量低水平)的原则。《核动力厂环境辐射防护规定》(GB6249 - 2011)中,给出了核电厂放射性流出物年排放总量的控制值。

上述各审管层次,对于沿海核电厂和内陆核电厂的要求是相同的。需要指出的是,人类生活在有着各种辐射源(宇宙射线、陆地 γ 辐射、天然核素氡及其子体的照射等)的环境中,与世界平均本底辐射水平 2.4 mSv/年以及我国 3.1 mSv/年的平均本底辐射水平相比,上述公众个人剂量限值、核电厂剂量约束上限值以及进一步制定的放射性流出物排放控制值是很严格的要求。

在《核动力厂环境辐射防护规定》(GB6249 - 2011)中,对于内陆核电厂的放射性液态流出物排放,还有第四层次的审管要求,包括:

- 槽式排放出口处的放射性流出物中除氚和碳 - 14 外,其他放射性核素浓度不超过 100 Bq/L。
- 排放口下游 1 km 处接纳水体中,总 β 放射性不超过 1 Bq/L,氚浓度不超过 100 Bq/L。
- 如果浓度超过上述规定,营运单位在排放前必须得到审管部门的批准。

表 1 给出 GB6249 - 2011 中,有关内陆核电厂排放口下游浓度的控制要求与相关饮用水标准的比较。

表 1 内陆核电厂排放口下游浓度的控制要求与国际相关饮用水标准的比较

国际组织/国家	推导浓度的参考剂量	总 β 指标值	氚指标值
WHO 饮用水指标	0.1 mSv/年	1 Bq/L(筛选值 ^{注1})	10000 Bq/L
加拿大卫生部饮用水指标	0.1 mSv/年	1 Bq/L(筛选值)	7000 Bq/L
美国 EPA 饮用水指标	0.04 mSv/年	(^{注2})	740 Bq/L
欧盟饮用水指标	0.1 mSv/年	(^{注2})	100 Bq/L(筛选值)
我国生活饮用水卫生标准 (GB5749-2006)	等效采用 WHO 饮用 水指标	1 Bq/L(筛选值)	-
GB6249-2011(排放口下 游 1 km 受纳水体)	-	1 Bq/L(筛选值)	100 Bq/L(筛选值)

^{注1}:筛选值:指大于该数值时,可通过进一步的剂量评估确定是否可用作饮用水。

^{注2}:未规定总 β 指标值,各 β/γ 放射性核素的浓度指标按照参考剂量进行推导。

对于表 1,可作如下分析:

— WHO 饮用水的放射性浓度指标,是采用 0.1 mSv/年推导的。与公众个人剂量限值、核电站剂量约束上限值以及我国本底辐射水平相比,推导出来的放射性浓度指标是足够安全的。

— 我国生活饮用水标准中,等效采用了 WHO 饮用水标准中给出的筛选值。GB6249-2011 中,对于内陆核电厂排放口下游的受纳水体,要求总 β 浓度不超过 1 Bq/L,可以确保内陆核电厂排放口下游 1 km 处水体满足我国生活饮用水标准中的放射性指标要求。

— 氚是一种低能纯 β 粒子,不会贯穿皮肤,其在人体内的排泄半衰期为 10 天,因此,是放射性毒性很低的核素。通常,在饮用水指标和核电厂放射性液态流出物排放评价中,将氚与其他 β/γ 放射性核素区分对待。由表 1 中可以看到,GB6249-2011 中对于内陆核电站排放口下游 1 km 处受纳水体的氚浓度控制,采用了国际上最严格的饮用水氚浓度指标。

到目前为止,尚未见到世界主要核电国家的法规、标准中对于内陆核电厂放射性流出物排放有从严控制的要求。

我国环境保护部在制定 GB6249-2011 的过程中,之所以对内陆核电厂提出从严的要求,是充分考虑到我国内陆核电厂址周围人口可能相对较多,且周围居民与地表水体的关系可能相对密切的特点。

三、国外内陆核电厂的水环境影响评估

美国 65 个核电厂(共 104 台机组)中有 39 个核电厂位于内陆地区,共 64 台

机组,占美国所有核电机组的 61.5%,这些机组至 2010 年底已经有约 2000 堆年的运行经验;法国 19 个核电厂(共 58 台机组)中,有 14 个核电厂位于内陆地区,共 40 台核电机组,占法国核电机组的 69.0%,这些机组至 2010 年底已经有约 1000 堆年的运行经验。

目前,在讨论借鉴国外内陆核电厂水环境影响评估经验时,还有不同的意见。有的认为,我国与美国、法国的国情不同,因此,这些国家的内陆核电厂水环境影响评估经验没有多大的借鉴意义。面对这种不同的意见,我们需要深入分析美国与法国内陆核电厂水环境影响评估的经验,研究如何借鉴。

(一) 水资源有关的内陆核电厂布局

美国多年平均水资源量为 29 702 亿 m^3 ,是人均水资源量较高的国家,但美国的水资源分布非常不均匀。美国大陆年平均降水量为 760 mm。从太平洋沿岸到落基山脉,平均降水量为 500 mm 以下;从落基山脉到密西西比河,平均为 710 mm;从密西西比河到大西洋沿岸为 1100 mm。从图 1 可以看到,美国的核电厂大多分布在密西西比河流域及其以西至大西洋沿岸的区域。其中,美国密西西比河流域共建有 21 个核电厂,共 32 个机组,总装机容量达到 3093 万千瓦。在最近的美 NRC 网站上,已经给出新建核电厂的申请情况,其中,在密西西比河流域拟新建或扩建的核电项目有 5 个,这些项目的装机总容量估计在 1000 万千瓦左右。

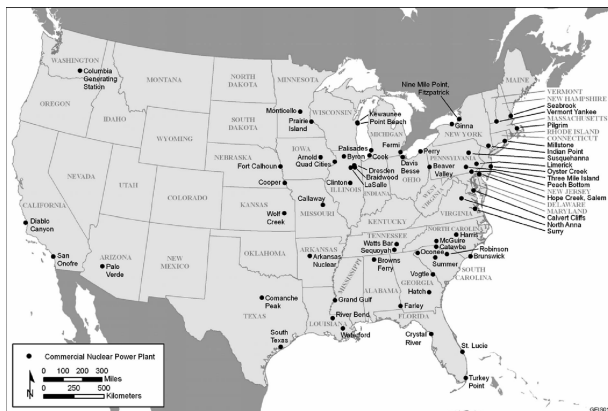


图 1 美国核电厂的分布

我国多年平均水资源量为 28 124 亿 m^3 ,是人均水资源量相对较少的国家,同时有水资源分布不均匀的特点。我国多年平均降水量为 648 mm。西北多干旱地区;长江两岸平均降水量为 1000 ~ 1200 mm;江南丘陵和南岭山地大多超过

1400 mm;东南沿海的广东、福建、广西、浙江等省区,年降水量大部地区在2000 mm以上。因此,参照美国,可以将我国内陆核电厂布局在长江流域以及其他水资源丰富的地区。

《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》(国发[2012]3号)提出,要确立水资源开发利用控制红线,到2030年全国用水总量控制在7000亿 m^3 以内。目前,水利部正在编制《全国水中长期供求规划》。因此,在内陆核电站布局时,需要将核电发展中长期规划中的内陆核电站用水量列入全国水中长期供求规划以及各省的水资源利用规划。

一个建设4台AP1000机组的内陆核电厂(采用自然通风冷却塔)年取水量约为1.2~1.6亿 m^3 左右,由于冷却塔蒸发、漂滴损失造成的耗水量在0.9~1.3亿 m^3 左右。按照美国内陆核电厂的评估实践,内陆核电厂的用水量评估应考虑冷却塔蒸发、漂滴损失造成的耗水量。

(二) 水的利用特点

在美国,内陆核电厂的冷却水源/接纳水体有着多样的水文特征。有的核电厂位于密西西比河干流或支流附近,有的位于多年平均流量为100~200 m^3/s 的小河附近,也有的位于河流上人工筑坝形成的湖泊或河道型水库附近,而这些湖泊或水库的库容可以在几亿 m^3 以上,但也有几千万 m^3 的情况(最小的库容仅为3800万 m^3)。

查阅了美国NRC(核管理委员会)对27个申请延寿运行的内陆核电厂给出的环境意见书^[2],其中,三分之二核电厂的接纳水体有灌溉、捕鱼和各种娱乐功能。

查阅了美国38个内陆核电厂的2009年度环境辐射监测报告^[3],其中,二分之一核电厂(20个)排放口下游地表水体中有公共饮用水源的取水点。而所有这些公共饮用水源样品中的总 β 放射性均小于1 Bq/L,氡浓度均小于74 Bq/L(注:美国环境保护署给出饮用水中氡的浓度指标为740 Bq/L,在实际执行中,公共饮用水源的氡浓度控制在74 Bq/L以下)。

例如,如图2所示,Beaver Valley核电厂($2 \times 840 \text{ MWePWR}$)位于Ohio河畔,在排放口下游2 km和7.8 km处分别有公共饮用水供水公司的取水口。2009年中,在下游2 km处的饮用水样品中监测到平均总 β 浓度为0.141 Bq/L,平均氡浓度为11.5 Bq/L。

又例如,位于Norman湖畔的McGuire核电厂($2 \times 1100 \text{ MWePWR}$)在排水口以西5.3 km处有公共饮用水处理厂取水点,在排水口SSW方位11.8 km以及SSE方位17.8 km处也分别有市政供水公司的取水口(见图3)。在2009年,最



图 2 Beaver Valley 核电厂公共饮用水源位置图

近的饮用水样品(以西 5.3 km)中监测到平均总 β 浓度为 0.071 Bq/L,平均氡浓度为 38.1 Bq/L。



图 3 McGuire 核电厂公共饮用水源位置图

在美国,确实有许多核电厂周围居民取用地下水作为饮用水源,但 20 个排放口下游有公共饮用水取水点的美国内陆核电厂的环境辐射监测数据表明,内陆核电厂运行期间的放射性液态流出物排放并不影响下游地表水体作为公共饮用水源的功能,所有排放口下游饮用水样品中的总 β 浓度和氡浓度都能很好地

满足美国饮用水标准的要求。加上三分之二内陆核电厂排放口下游有灌溉、捕鱼和各种娱乐功能,可以认为,美国的内陆核电厂是与周围环境和谐相处的。

法国境内有 8 条主要的河流,这些河流沿岸均建有核电厂。其中,有的河流上建有多座核电厂,有的在跨国河流上建有核电厂。

流入地中海的罗纳河(Rhone),平均流量为 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量为 $200 \text{ m}^3/\text{s}$,沿岸建有 4 座核电厂,共 14 台机组。这 4 个核电厂位于罗纳河约 180 km 长的河段上。其中,两个核电厂最近的河流距离为 33.5 km(Cruas 核电厂至 Tricastin 核电厂)。

平均流量($100 \text{ m}^3/\text{s}$)和最小流量($15 \text{ m}^3/\text{s}$)很小的维也纳河沿岸建有 Civaux 核电厂($2 \times 1300 \text{ MWe}$)。在 Civaux 核电厂放射性液态流出物排放口下游约 10 km 处有一座 7000 左右人口的城镇,将维也纳河作为其饮用水源。

塞纳河全长 776 km,流经巴黎市区。Nogent 核电厂($2 \times 1300 \text{ MW}$)位于塞纳河巴黎上游约 90 km 处,平均流量为 $400 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量为 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 。巴黎市的居民饮用水一半取自地下水,一半取自塞纳河。

莱茵河上游在瑞士境内,沿岸建有 4 座核电厂(共 5 台机组),总装机容量 3372 MWe。莱茵河在法国境内长 190 km,平均流量 $1100 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$,沿岸建有 Fessenheim 核电厂($2 \times 900 \text{ MWe}$)。莱茵河下游进入德国境内,长 867 km,在其沿岸有至今尚在运行的 Biblis 核电厂($2 \times 1200 \text{ MWe}$)。此外,法国 Cattenon 核电厂($4 \times 1300 \text{ MWe}$)位于法国、卢森堡和德国交界的摩泽尔河段。

(三) 放射性液态流出物排放的环境辐射影响评估

在研究如何借鉴国外内陆核电厂环境影响评估经验中,特别要注意借鉴美国 NRC 对内陆核电厂环境问题的识别方法和评估结论。在 1996 年,NRC 对于美国运行核电厂共提出了 92 个环境问题。至 2009 年,NRC 又将美国运行核电厂的环境问题归纳成 78 个。对所有这些环境问题,NRC 都对其环境影响的重要度进行了分类。

对于核电厂放射性流出物排放的环境辐射影响,NRC 已经给出评估结论,是属于只有小影响的环境问题^[4]。其理由是,美国运行核电厂放射性流出物排放对周围公众产生的环境辐射影响,均远低于美国联邦法规规定的剂量限值和设计目标值,处在美国平均本底辐射水平的涨落范围。

在美国,有 21 个内陆 PWR 核电厂,在这些核电厂 2005 ~ 2009 年期间的放射性流出物排放报告^[3]中,给出了每年度放射性液态流出物中的裂变产物和腐蚀产物的排放量。所有这些核电厂五年内归一化至 1000 MWe 的裂变产物和腐

蚀产物年排放量的平均值为 2.19 GBq/年(0.044 ~ 8.46 GBq/年)。

在上述 21 个美国内陆核电厂 2005 ~ 2009 年期间的放射性流出物排放报告中,均给出根据放射性液态流出物排放量计算得到的公众最大的个人全身剂量和器官剂量,其中最大值分别为 3.11 $\mu\text{Sv}/\text{堆}\cdot\text{年}$ 和 4.18 $\mu\text{Sv}/\text{堆}\cdot\text{年}$,分别占美国联邦法规 10CFR50 附录 I 规定的设计目标值的 10.4% 和 4.2%。

考虑到美国平均本底辐射水平为 3.6 mSv/年(3600 $\mu\text{Sv}/\text{年}$),可以得出结论,美国内陆核电厂放射性液态流出物排放所产生的环境辐射影响处在美国平均本底辐射水平的涨落范围。

在法国,EDF(法国电力公司)每年发布核电厂的放射性流出物排放报告。从中可以看到,法国核电厂的放射性液态流出物排放均控制在很低的水平^[5]。

以 900 MWe 机组为例,2002 ~ 2009 年期间,法国所有 24 台 900 MWe 机组的裂变产物和腐蚀产物排放量平均值为 0.35 GBq/堆·年,最大值为 1.15 GBq/堆·年,最小值为 0.08 GBq/堆·年。

根据法国 EDF 提供的资料,巴黎市上游塞纳河沿岸的 Nogent 核电厂(2 × 1300 MWe),实际的放射性流出物排放使得电厂周围公众受到的最大个人剂量为 0.9 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ 。与法国核电厂周围公众个人剂量的基本标准 1.0 mSv/年(1000 $\mu\text{Sv}/\text{年}$)以及法国平均的本底辐射水平 2.4 mSv/年(2400 $\mu\text{Sv}/\text{年}$)相比,Nogent 核电厂运行产生的环境辐射影响是十分轻微的,也处在在本底辐射水平的涨落范围^[5]。

需要指出的是,我国正在运行的核电厂也已将放射性液态流出物排放量控制在很低的水平。大亚湾核电厂和岭澳(一期)核电厂在 2002 ~ 2008 年期间,4 台机组放射性液态流出物中除氙外核素的平均排放量为 0.41 GBq/堆·年,与法国 900 MWe 核电机组处在同样的低水平。

可喜的是,我国拟建核电项目的建设单位和设计单位都在积极努力采用最佳可行技术处理放射性废液,确保放射性液态流出物排放罐出口浓度满足除氙和碳 14 外,核素浓度小于 100 Bq/L 的要求,并力争进一步达到更低的水平(例如,小于 37 Bq/L)。

现在,有一些管理部门和社会公众还担心放射性流出物排放在受纳水体中会产生长期的累积影响,从而影响下游水质。为此,查阅了美国 38 个内陆核电厂 2009 年度辐射环境监测报告^[3],统计了受纳水体中沉积物样品的放射性监测数据。可以看到,这些担心是不必要的:

— 只有不足 20% 的美国内陆核电厂在放射性液态流出物排放口附近的沉积物样品中检测出微量的与核电厂运行有关的 γ 核素,但有 70% 以上的美国内陆核电厂在周围水体(包括上游对照点)沉积物样品中检测出来自上一世纪 70

年代大气核武器试验和切尔诺贝利核事故沉降物的 Cs - 137 核素。图 4 给出美国 Hatch 核电厂排放口下游监测点(蓝线)和排放口上游对照点(红线)沉积物样品中的 Cs - 137 平均浓度。可以看到,切尔诺贝利核事故曾使得对照点沉积物样品中的 Cs - 137 达到 33 Bq/kg - 干重的水平。

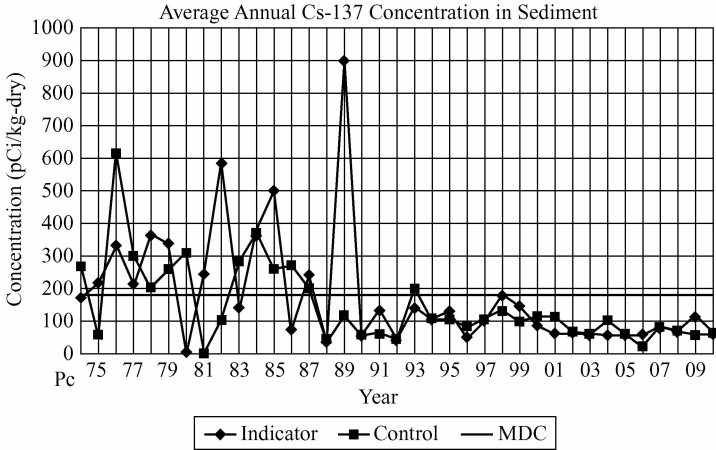


图 4 美国 Hatch 核电厂受纳水体中沉积物样品中的 Cs - 137 浓度
(受大气核试验和切尔诺贝利核事故影响)

— 所有沉积物样品中检测出的人工 γ 核素的放射性活度远低于沉积物样品中的天然放射性核素 K - 40 的水平。

— 以 Catawba 核电厂为例,2009 年中,仅在排放渠附近(0.64 km)检出 Co - 58(4.1 Bq/kg 干重)、Co - 60(3.8 Bq/kg 干重)。假定公众个人常年在排放口附近进行水上娱乐活动(游泳、划船、钓鱼等),得出对全身和皮肤所致的剂量分别为 2.53×10^{-6} mSv/年和 2.97×10^{-6} mSv/年。这些剂量估算值与美国公众个人平均受到的本底辐射水平 3.6 mSv/年相比,是可以忽略不计的。

四、总结福岛核事故教训,保障内陆核电厂周围水资源安全

2012 年 3 月 11 日,日本福岛第一核电厂因超设计基准地震和海啸事件引发了严重事故,事故中的放射性物质释放量超过了 IAEA 核事故分级表(INES)中的 7 级事故释放量,并且在事故过程中有一定数量的高放射性污水进入海水中。由此,引起了对于内陆核电厂周围水资源安全的担忧。

对此,我们需要说明;类似福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的;福岛核事故后的经验教训总结,将推进核电厂纵深防御的核安全框架体系;做好各种应急预案,可以保障内陆核电厂周围的水资源安全。

(一) 类似福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的

福岛核事故发生后,美国公众向 NRC 提出很多问题,例如,像日本福岛第一核电厂那样的事故序列可能在美国发生吗? NRC 于 2012 年 3 月 18 日和 3 月 19 日在其网站上对这些问题很快做出答复,指出类似福岛核事故那样的灾难性事件在美国是极不可能发生的。NRC 强调指出:

— 日本 3 月 11 日地震是世界上有记录历史以来的第 5 大地震。这样的地震只可能发生在“俯冲带”断层上。俯冲带处在构造板块的边缘,在那里,一个构造板块受到另一个构造板块挤压,或者说,在那里一个构造板块滑到另一个板块下面。俯冲带的大地震也必然会产生像在日本看到的那样巨大的海啸。

— 美国所有的核电厂都远离“俯冲带”断层,而且均设计得能够承受包括地震和海啸在内的环境灾害。

我国核电厂选址有关的核安全法规和导则是参照 IAEA 相关法规、导则制定的,在当今世界上属于最严格的标准。在实际选址过程中,按照厂址所在地区的极端事件(可能最大地震、可能最大降水、可能最大龙卷风、可能最大风暴潮等)确定厂址设计基准。

我国内陆地区地震活动水平相对较低。已经统计了 30 个通过初步可行性研究确定的内陆核电优先候选厂址的相关资料,从中可以看到,这些厂址均位于区域地壳稳定地区或区域地壳相对稳定地区,即均处于地震活动水平很低的地区^[6]。

同时,这些厂址的防洪设计均可使厂址成为“干厂址”。需要指出的是,与欧美国家可以选择软基厂址的情况不同,目前我国内陆核电厂均选择山体基岩厂址,因此,很容易建成留有较大防洪裕度的“干厂址”。

综上所述,从我国内陆核电的选址条件来看,可以像美国 NRC 那样得出结论,即类似福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的。

(二) 福岛核事故后对于核电厂安全性的评估

日本福岛核事故发生后不久(2011 年 4 月 12 日),美国 NRC 主席在向国会作证时重申,NRC 对美国商用核反应堆堆群的安全保持信心。2011 年 5 月,NRC 网站上公布了对美国 65 个运行核电厂进行核安全检查的报告。NRC 指出,在 65 个运行反应堆厂址中,有 12 个厂址在检查期间提出了 1 个或几个纠正行动要求,这些不符合项中有许多涉及培训问题。所发现的问题已经或正在积极采取措施进行解决,而所有这些问题均不会破坏电厂对极端事件做出响应的能力。

NRC正是基于对核电厂安全性的上述估计,在福岛核事故后继续批准9台运行机组延寿运行20年,其中,5台机组是内陆核电厂的运行机组。同时,NRC在2012年2月和3月先后批准2个内陆核电厂(Vogtle核电厂和V. C. Summer核电厂)各扩建2台AP1000机组。

福岛核事故发生后,环境保护部(国家核安全局)、国家能源局和中国地震局根据国务院2011年3月16日的决定,先后组织了运行核电厂和在建核电厂的综合安全检查。检查结果表明,我国运行和在建核电厂的安全风险处于受控状态,核电厂的安全水平是有保障的。

(三) 福岛核事故的教训总结

福岛核事故后,国际社会较为深入地总结了相关的事故教训。尤其是

— 日本政府在福岛核事故后两次(2011年6月和2011年9月)向IAEA提交了有关福岛核事故的报告。两次报告从福岛核事故中总结出了28条教训。

— IAEA在福岛核事故后(2011年6月)提出了福岛核事故调查报告,其中得出15个结论和16条教训。

— 美国NRC在2011年7月12日发表了有关福岛核事故的近期工作组调查报告—《加强21世纪反应堆安全的建议》。报告中提出,建立纵深防御与风险考虑适当平衡的合理的、系统的和连贯的监管框架,确保纵深防御每一层次的完整性和有效性。

目前,我国的国家核安全局在总结福岛核事故教训的基础上提出《核电厂改进行动通用技术要求》。该要求主要涉及:防洪能力改进技术要求;应急补水及相关设备技术要求;移动电源及设置的技术要求;乏燃料池监测的技术要求;氢气监测与控制系统改进的技术要求;应急控制中心可居留性及其功能的技术要求;辐射环境监测及应急改进的技术要求;外部灾害应对的技术要求。

可以认为,我国拟建的内陆核电项目按照国家核安全局的要求,进一步采取福岛核事故教训总结中提出的改进行动,可使内陆核电厂周围水资源安全得到根本的保障。

(四) 做好确保内陆核电厂水资源安全的应急预案

尽管我们说,像福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的,而且我们也可以说,通过总结福岛核事故来加强纵深防御安全体系,可以保障内陆核电厂周围的水资源安全,但我们仍有必要做好内陆核电厂在严重事故工况下确保水资源安全的各种应急预案,这种应急预案可以看成是纵深防御最后一个层次—应急响应计划的组成部分。做好各种应急预案可以进一步

消除社会公众对于内陆核电厂水资源安全的疑虑。

内陆核电厂在严重事故工况下确保水资源安全的应急预案,必须使得内陆核电厂一旦在严重事故工况下产生的放射性污水,实现“可存贮”、“可封堵”、“可处理”和“可(与地表水体实体)隔离”。在这方面可以借鉴日本东京电力公司在福岛核事故善后处理中取得的经验反馈^[6]。

(1) 关于“可存贮”

在1979年3月发生的美国三哩岛核事故中,由于稳压器泄压阀卡开和操纵员误停安全注入,一度中断了堆芯的闭式循环冷却,直至事故发生后两小时查明原因后投入安注,实现堆芯的闭式循环冷却。期间共产生放射性污水约1250 m³,相当于反应堆冷却剂水装量的5倍。这些高放射性污水先滞留在核岛厂房地坑中,后又溢到核辅助厂房。

福岛核事故过程中,由于长时间全厂停电,未能实现闭式循环冷却,直至2011年6月,放射性污水处理设施投入运行,经过处理的废水用于1~3号机组的堆芯冷却,才在一定程度上实现了闭式循环冷却。

2011年3月11日发生事故,至2011年6月29日,福岛第一核电厂1~4号机组汽机厂房内放射性污水量达到97 000 m³。据报道,东京电力公司2011年4月19日开始将部分高浓度放射性污水移送至放射性废弃物集中处理厂房,该厂房贮存放射性污水总量约30 000 m³。此外,东京电力公司也利用1~3号机组的冷凝器贮存放射性污水(合计7600 m³)。以上总计,在放射性污水处理设施投入前的高放射性污水量大约在14万 m³左右。

前面已经指出,像福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂实际上是不可能发生的,加上福岛核事故后将会提升核电厂应对全厂长时间停电的能力,因此,我国内陆核电厂一旦发生严重事故时的放射性污水产生量不会像福岛核事故那样多。

目前,我国内陆核电厂的建设单位和设计单位正在进行相关应急预案的研究,一旦发生严重事故工况下产生的放射性污水,将有预案将其滞留在核岛厂房、核辅助厂房,甚至汽机厂房内。同时,厂区内设置专用贮水罐或专用贮水池的预案也在研究中。

(2) 关于“可封堵”

在福岛核事故中,由于强烈地震的破坏,使得2号机组厂房累积的放射性污水通过厂房裂缝进入进水管道的附近的电缆竖井,并进而泄漏至海水中。对此,日本东京电力公司先后采取了投注混凝土、木屑、高分子吸水剂、碎报纸、凝固剂(水玻璃)等措施。直至最后朝着碎石层方向凿了8个孔,准备了12 000 L硅酸钠溶液(水玻璃),在注入6000 L后终于止住了污水外泄(见图5)。在这次事件

中,总共有 516 m^3 的放射性污水泄漏进入海水中。

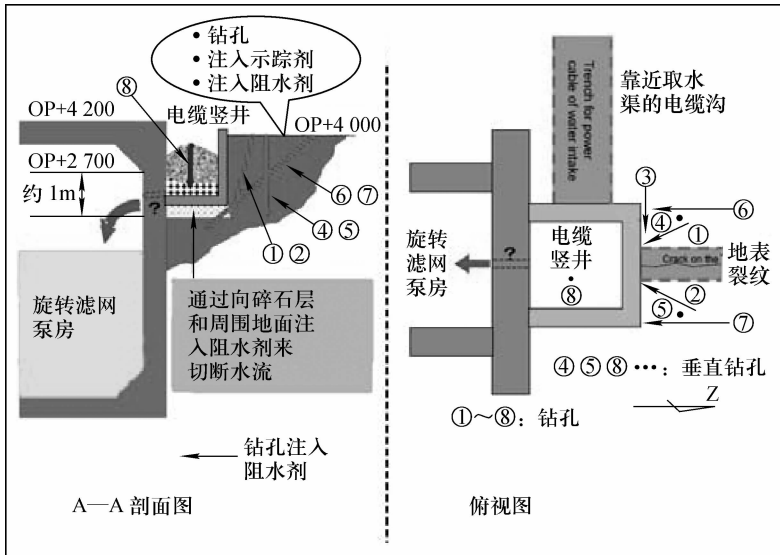


图5 福岛第一核电站2号机组取水渠附近电缆竖井泄漏放射性污水封堵示意图

应该说,日本东京电力公司在这次事件处理中通过摸索,得出了水玻璃阻水剂能有效封堵放射性污水的宝贵经验。尽管我们认为,像2011年3月11日日本东北部地震那样的强烈地震不可能在我国内陆核电站发生,但是在各内陆核电站现场,还是可以准备一定数量的水玻璃阻水剂,作为放射性污水封堵的应急预案。

(3) 关于“可处理”

在2011年3月11日发生福岛核事故后,日本政府通过努力,先后在2012年6月17日和8月19日投入两套高放射性污水处理装置。

日本东京公司采用的第一套高放射性污水处理装置由美国Kurion公司(采用沸石吸收剂组成铯吸收装置)和法国ARAVA公司(采用化学絮凝进行放射性去污)提供。第二套高放射性污水处理装置由日本Toshiba公司和美国Shaw公司提供,是一套铯吸收装置。截止2012年5月22日,两套装置共处理了 33.5 万 m^3 放射性污水。

目前,国家能源局已经全面启动了在运、在建核电站应对超设计基准事故安全技术研发计划,其中包括了《核事故放射性废水应急处理技术及工艺研究》的项目,相关的研究成果将可作为内陆核电站制定严重事故工况下高放射性污水处理应急预案的支撑。

此外,日本东京电力公司对局域海水进行放射性去污的实践也可供我们借鉴。例如,如图6所示,在2号机组取水渠的旋转滤网附近安装了海水循环处理装置,用泵抽取污染海水喷淋该装置内的沸石材料,以吸收过滤污染海水中的放

放射性铯。如图 7 所示,可以在局部水域投放有沸石组成的沙袋来吸附水体中的放射性铯。

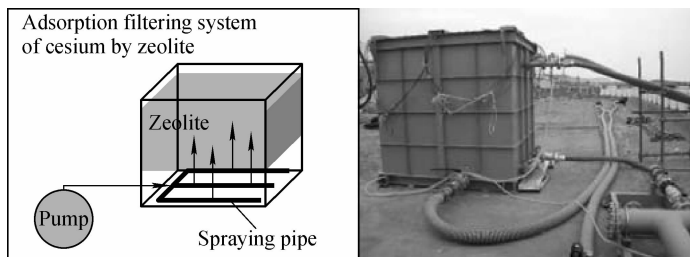


图 6 处理污染海水的海水循环装置

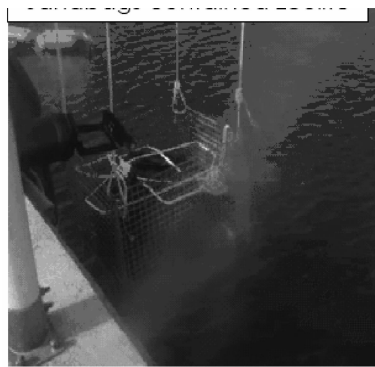


图 7 局部水域放射性去污沙袋

(4) 关于“可隔离”

切尔诺贝利核事故中,电厂附近的基辅水库即下游第聂伯河受到了污染,污染的重要原因是,沉积在地面的放射性被雨水冲刷进入水体,或者沉积在地面的放射性在冰融期随径流流入水体。

如图 8 所示,在福岛核事故过程中,1 号至 3 号机组发生爆炸后,放射性物质沉积在地面、厂房以及各种瓦砾碎片上。为了防止沉积的放射性物质随风飘散或被雨水冲刷入海,东京电力公司大面积喷洒抑制剂。抑制剂为水溶性合成树脂的浓缩液体稀释到 15% 浓度的溶液。据报道,截止 2012 年 6 月底,在地面、斜坡、道路、厂房上喷洒抑制剂的面积达到 87.7 万 m^2 。

在福岛核事故善后处理中,日本东京电力公司采取的将放射性与水体实体隔离的其他措施,也可供我们借鉴。例如:如图 9 所示,尽管目前不存在厂房高放射性污水释入地下水的途径,但东京电力公司计划用两年的时间在 1~4 号机组的现有海堤前安装一个屏蔽钢墙,该屏蔽钢墙由防水钢板桩组成,在靠海侧延伸 800 m,钢板桩高度为 22~23 m,一直插到地下水的隔水层。



图 8 福岛核事故中向地面、道路和厂房喷洒沉积放射性的抑制剂

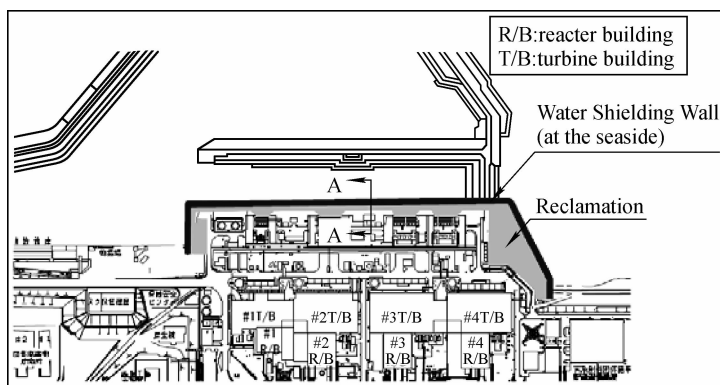
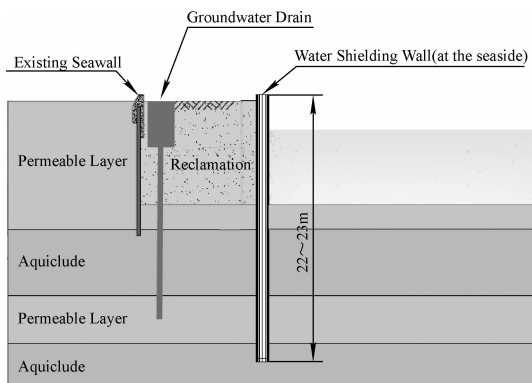


图 9 (a) 福岛第一核电站拟建地下水屏蔽墙的位置



(2) A-A Section

图 9 (b) 福岛第一核电站拟建地下水屏蔽墙的剖面图

五、结 束 语

通过以上的分析,对于我国内陆核电的发展,我们可以得出如下的认识:

— 我国湖北、湖南、江西等内陆省份迫切需要发展核电,且已具备发展核电的条件。

— 从我国水资源分布特点来看,内陆核电厂可以布局在长江流域以及其他水资源丰富的地区,而核电中长期规划中的内陆核电项目用水量需要列入《全国水中长期供求规划》和所在省份的水资源利用规划。

— 美国内陆核电厂的 2000 堆年运行经验和法国内陆核电厂的 1000 堆年运行经验均证实,内陆核电厂放射性液态流出物的排放不会影响电厂排放口下游作为饮用水源、灌溉、捕鱼和娱乐活动的功能,所产生的环境辐射影响是处在平均本底辐射水平涨落范围的小影响。

— 像福岛核事故那样的灾难性事件在我国内陆核电厂是极不可能发生的。总结福岛核事故教训,加强纵深防御安全体系,可以保障内陆核电厂的水资源安全。

— 为了消除社会公众对于内陆核电厂水资源安全的疑虑,有必要做好内陆核电厂确保周围水资源的应急预案,使得能在一旦发生严重事故的工况下,实现放射性污水的“可存贮”、“可封堵”、“可处理”和“可(与地表水体实体)隔离”。

参考文献

1. 赵成昆、周如明等. 内陆核电厂水环境影响的评估,中国核能行业协会软课题研究报告,2012 年 12 月
2. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/>
3. <http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-info.html>
4. US NRC. Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants; Main Report, NUREG - 1437, Volume 1, May, 1996
5. 赵成昆、周如明等. 法国内陆核电厂放射性液态流出物的排放控制与评估,中国核能行业协会软课题研究报告《内陆核电厂水环境影响的评估》的附录 2,2012 年 12 月
6. 赵成昆、周如明等. 吸取福岛核事故教训,保障我国内陆核电厂周围的水资源安全,中国核能行业协会软课题研究报告《内陆核电厂水环境影响的评估》

的附录4,2012年12月



周如明 1943年9月出生,1966年参加工作,先后在核工业部四〇四厂、苏州热工研究院、岭澳核电有限公司工作,长期从事核电厂的环境影响评价和安全分析工作。现为苏州热工研究院科技委顾问,教授级高工。

自2008年后致力于我国内陆核电建设的有关软课题研究,在中国核能行业协会组织的课题研究《内陆核电厂需关注的问题及不同类型核电机组的适宜性分析》、《内陆核电厂水环境影响的研究》和《核电厂环境影响的评估》中担任首席专家。

我国核电发展的铀资源支撑能力

张金带

中核集团地矿事业部

一、2020 年核电规划目标对天然铀和铀资源的需求

按 2020 年投运 7000 万千瓦、在建 3000 万千瓦的规模测算。2020 年当年消耗当量天然铀 1.36 万吨,2010 至 2020 年累计消耗当量天然铀 9.07 万吨。按天然铀产品提前 3 年供货考虑,2020 年当年需要提供天然铀 1.67 万吨,2010 至 2020 年累计需要提供天然铀 12.65 万吨。

另外,按经济可采资源储量提前 4 年提交、采冶回收率 65% 等条件测算,假设 7000 + 3000 万千瓦所需天然铀全部由国内供应,则到 2020 年当年需要经济可采的资源储量 3.22 万吨,2008 至 2020 年累计需要经济可采的资源储量 30 万吨。

二、我国已探明的铀资源情况和天然铀生产能力分析

截止 2010 年底,我国已探明 350 个铀矿床,累计探明铀资源储量 $\times \times$ 万吨。“十一五”铀矿勘查取得了重大进展,新探明 10 多个大中型、个别达到超大型的矿床,北方形成了 4 个万吨至数万吨级大型铀资源基地,南方老矿区扩大了储量。最近新一轮全国铀矿资源潜力评价工作,圈定各类铀矿预测区 320 余个,预测铀资源量为 210 多万吨,表明我国是铀资源较丰富的国家之一。据初步分析,现保有铀资源储量加上今后 10 年新探明的铀资源量,可以基本保障 2020 年以前的需求,但与核电的中长期发展规模的需求相比存在较大差距。

我国天然铀生产企业共有 11 个,分布在江西、浙江、广东、湖南、陕西、辽宁、新疆、河北等省、自治区。2010 年,天然铀产量达到 $\times \times \times \times$ 吨/年。预计 2020 年国内天然铀产能可达到 $\times \times \times \times$ 吨/年。由于国内天然铀的增长速度落后于国内核电的发展速度,国内天然铀的供需矛盾将逐年突出,其缺口部分必须由境外开发与国际市场采购来保障。

三、海外铀资源开发和国际贸易情况分析

根据经合组织/核能机构 - 国际原子能机构 2009 年度“红皮书”数据,截止

2009年1月1日,回收成本低于 $\$130/\text{kgU}$ 的铀资源540.4万吨,回收成本低于 $\$260/\text{kgU}$ 的世界已查明铀资源为630.6万吨,待查明铀资源为1040万吨;此外,全球还有非常规铀资源2200万吨铀,在海水中大约含有40亿吨铀,具有极大的开发潜力。

中国核工业集团公司和中广核集团公司于2006年先后成立了专业公司,积极开拓海外铀资源市场,取得了突破性进展。目前,我国天然铀储备已达 \times 万吨。预计2020年海外铀资源的权益份额可达到 \times 万吨铀/年,与国外签订天然铀长期供货协议超过 $\times \times$ 万吨。

世界核电大国铀资源的保障都是利用“两个市场、两种资源”,“较多发展核电的国家不产铀,较多产铀的国家不发展核电”的格局已延续了几十年。只要加强国内铀矿勘查和开发,加强对国外铀资源的开发和贸易采购,建立多元化的铀资源保障体系,完全可以满足我国2020年核电发展规划的需要。

四、2030、2050年铀资源保障能力分析

如果2030年、2050年核电总装机容量达到2亿千瓦、4亿千瓦。在不引入快堆、MOX燃料的情况下,经测算,2030年当年需要天然铀4.25万吨,累计需要天然铀47.42万吨,全寿期(60年)运行所需天然铀约200万吨;2050年当年需要天然铀7.23万吨,累计需要天然铀147.6万吨,全寿期(60年)运行所需天然铀约400万吨。这显然是一个相当大的需求。

根据我国新一轮铀矿资源潜力评价的结果,预测铀资源量为210多万吨,假设按能够全部探明、开发考虑,并按经济可采储量占探明资源储量的70%、铀采冶综合回收利用率为70%测算,可生产天然铀约100万吨。在不考虑引入MOX燃料元件、发展快堆技术的前提下,粗略测算:如果国内核电所需天然铀全部由国内供应,能满足近1亿千瓦压水堆核电站全寿期(60年)运行所需。

铀资源是一个自然概念,也是一个经济概念,随着需求的拉动和技术的进步,肯定可以找到更多的铀资源。但为规避对外依存度过大所带来的风险,必须提早安排快堆和快堆核燃料循环技术的发展问题。

五、通过核能技术进步提高铀资源利用率的情况分析

为了保持核能的可持续发展,从长远看,必须通过技术进步提高铀资源利用率,实现铀资源的有效利用。

铀资源的有效利用与堆型选择,特别是燃料循环方式选择密切相关。核燃料在热堆中“一次通过”,铀资源的利用率约为0.6%;热堆闭式循环可使铀资源的利用率提高20%~30%(达到0.8%);而采用增殖快堆闭式循环,可使铀资源的利用

率提高 30 ~ 60 倍,从而使地球上已探明的经济可采的铀资源使用几千年。

商用快堆进入核电市场的时间取决于:(1) 快堆核能系统(包括热堆乏燃料后处理、快堆燃料制造、快堆乏燃料后处理等)的技术成熟度;(2) 快堆与热堆相比的经济性;(3) 国际铀资源的供应情况。一般而言,只要还能从市场上买到比较便宜的天然铀,热堆电站就会继续运行。

目前世界上一些核电发达国家已开始部署快堆核电站的发展,印度、俄罗斯、法国和日本宣布的快堆核电站商业化时间分别为 2020 年、2020 ~ 2025 年、2040 年和 2050 年。总体上看,世界快堆核能系统可能在 2030 年后达到商业化,2050 年后实现规模发展。

根据我国的实际情况,2030 年前将全部建设热堆,如快堆技术进展顺利,则 2020 年有望建成示范快堆,2035 年左右有可能开始进入核电市场,并在 2050 年前后得到规模发展。

六、评估结果和建议

(一) 评估结果

第一,我国保有铀资源储量可以保障 2020 年核电发展规划的需要。按 2020 年投运 7000 万千瓦、在建 3000 万千瓦的规模测算,2020 年当年需要提供天然铀 1.67 万吨,2010 至 2020 年累计需要提供天然铀 12.65 万吨。假设所需天然铀全部由国内供应,则到 2020 年当年需要经济可采铀资源量约 3.22 万吨,2008 至 2020 年累计需要经济可采铀资源量约 30 万吨。我国铀资源潜力预测在 210 万吨以上,目前已探明铀资源量加上新探明铀资源量,完全可以保障 2020 年核电发展规划的需要。

第二,核电发展对铀资源的需求应立足全球。世界核电大国铀资源的保障都是利用“两个市场、两种资源”,“较多发展核电的国家不产铀,较多产铀的国家不发展核电”的格局已延续了几十年。国际原子能机构 2009 年度红皮书的数据表明,全球回收成本低于 \$260/kgU 的世界已查明铀资源为 630.6 万吨,待查明储量 1040 万吨,全球保有铀资源储量比 2007 年增加了 14.5%,储量预测乐观;此外,全球还有非常规铀资源 2200 万吨铀,在海水中大约含有 40 亿吨铀,可以满足全球核电发展的需要。因此,全球铀资源对核电发展的供应是充分的。福岛核事故后,国际铀价下跌,预计在今后一段时间内总体上还将呈一定的下跌趋势,然后在一定范围(约 50 ~ 60 美元/磅 U_3O_8)上下波动。目前,国内企业开展的铀资源海外开发和天然铀采购已取得突破性进展。通过加强国内铀矿勘查和开发,加强对国外铀资源的开发和贸易采购,建立多元化的铀资源保障体系,

能够为我国核电发展提供有效的资源支撑。

第三,增殖快堆技术和核燃料循环技术的进步能够大大提高铀资源利用率。铀资源是一个自然概念,也是一个经济概念,随着需求的拉动和技术的进步,肯定可以找到和利用更多的铀资源,铀资源开发成本的提高对核电运行总成本的影响也十分有限。但为规避对外依存度过大所带来的风险,必须提早安排增殖快堆和快堆核燃料循环技术的发展问题。商用快堆进入核电市场的时间取决于:(1)快堆核能系统的技术成熟度;(2)快堆与热堆相比的经济性;(3)国际铀资源的供应情况。一般而言,只要还能从市场上买到比较便宜的天然铀,热堆电站就会继续运行。目前,世界上一些核电发达国家,如印度、俄罗斯、法国和日本已开始部署快堆核电站的发展,总体上可能在2030年后达到商业化,2050年后实现规模发展。根据我国的实际情况,应争取在2035年左右实现产业化。

第四(存在问题),我国铀资源储量潜力较大,但勘查程度总体较低,需要加大投入;铀矿采冶技术、资源利用率有待进一步提高,需要大力开展科技攻关;我国的海外铀资源开发需要进一步加强统筹协调;快堆、MOX燃料的研发工作刚刚起步,急需加大工作力度,为核电发展的资源保障提供坚实的基础。

(二) 建议

第一,由于找矿周期较长,为提高铀资源对中长期核电发展的保障能力,必须尽快制定我国铀矿地质勘查的中长期规划,加大投入,大力加强国内铀矿地质勘查。

第二,实施铀矿冶基地战略和低品位开发战略,建设与国内核电发展相适应的铀纯化基地和若干个铀矿采冶基地,支持关键技术攻关,提高采冶技术水平,形成规模化生产能力。

第三,鉴于铀与油气、煤炭等矿产在沉积盆地叠置产出,而矿业权大部分被油气和煤炭占有,由于矿业权排他性的规定,造成目前相当一部分铀矿无法正常勘查和开发,建议尽快完善有关矿业权法规,制定相关政策,建立矿业权协调机制,按照资源利用最优化原则,合理确定铀矿与共生条件下的油气、煤(煤层气)等相关矿产资源的勘查和开发秩序。

第四,加强海外开发,争取掌控更多的海外经济可采铀资源。将天然铀作为国家矿产资源境外开发优先支持的矿种,尽快建立国家层面的海外铀资源开发组织协调机构,建立与国际接轨的矿业投资、融资机制,制定相应的财政、金融和税收优惠政策,建立国外矿产资源地质调查和风险勘查专项基金。

第五,发挥国家、企业两个积极性,加快实施天然铀产品和铀资源储备战略。利用福岛核事故后国际天然铀市场价格下跌的时机,积极推进国际天然铀采购

和海外开发。对国内已探明的铀资源也要进行战略性保护。

第六,统筹规划,分步实施,大力支持和推动增殖快堆、MOX 燃料元件、后处理等关键技术研发和产业化。



张金带 1956 年出生,浙江永康人,研究员级高级工程师。现任中核集团地矿事业部(中国核工业地质局)总工程师,中核集团科技委常委、铀矿地质勘查首席专家,全国国土资源标准化技术委员会委员等。1982 年 1 月毕业于浙江大学地球化学专业。主持完成了著名的江西邹家山铀矿床(南西段)勘探;2001 年担任中核地质局总工程师以来,组织实施了中国北方沉积盆地砂岩型铀矿调查评价和

勘查、中国南方重点铀矿田勘查、铀矿地质志编制、全国铀资源潜力评价、中国铀矿床研究评价、铀矿大基地勘查采冶技术研究等重大项目,主持建立了我国地浸砂岩型铀矿地质技术标准体系,多次参与中国工程院关于核能研究的重大咨询项目。2004 年获政府特殊津贴,2006 年获国防科工委授予的“国防科技工业有突出贡献的中青年专家”称号,2007 年获“李四光地质科学奖”。

高放废物地质处置： 核能可持续发展的一个关键问题

王驹

核工业北京地质研究院,中核高放废物地质处置评价技术重点实验室

一、引言

高水平放射性废物(简称高放废物)主要是指乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体,对实行“一次通过”政策的国家,高放废物也包括乏燃料。根据我国放射性废物分类,高放废物分为高放废液和高放固体废物两类。高放废液的放射性浓度大于 4×10^{10} Bq/L。高放固体废物,第一类是,其核素的半衰期大于5年,但低于或等于30年,释热率大于 2 kW/m^3 或活度大于 4×10^{11} Bq/kg;第二类是,废物中的核素,其半衰期大于30年,释热率大于 2 kW/m^3 或活度大于 4×10^{10} Bq/kg。

高放废物是一种放射性强、毒性大、含有半衰期长的核素并且发热的特殊废物,对其进行安全处置难度极大,面临一系列科学、技术、工程、人文和社会学的挑战,其最大难点在于使高放废物与生物圈进行充分、可靠和长期的隔离,且隔离时间长达一万年甚至更长。

随着我国核能事业的飞速发展,高放废物的处理和处置,即将成为一个重大的安全和环保问题。这体现在如何最终安全处置核电站乏燃料后处理产生的高放废物、核武器的研制和生产过程中业已产生的高放废物、以及我国存在的某些可能不准备后处理的乏燃料。

对高放废物的安全处置,是落实科学发展观、确保我国核能工业可持续发展和环境保护的重大问题,同时,这也是一个与核安全同等重要的问题。在研究和开发方面,高放废物安全处置还存在一系列科学技术难题,需要几十年坚持不懈的努力加以解决。在公众接受方面,则存在一些需要认真解决的重大社会学难题。西方国家的核能开发情况表明,安全处置核废物,尤其是高放废物,已成为制约核能工业可持续发展的最关键因素之一。

我国的高放废物主要来源于压水堆核电站、国防核设施、CANDU 反应堆和将来可能建造的高温气冷堆。压水堆乏燃料经后处理将产生高放玻璃固化体、高放固体废物和 α 废物。国防核设施生产和军工核设施治理和退役,也将产生高放玻璃固化废物、高放固体废物和 α 废物。此外,研究堆和核潜艇的乏燃料经后处理后也将产生高放废物,但其数量较少。另外,需要进行深地质处置的还包括长寿命中放废物和高危险度放射源。

二、地质处置的特点

(一) 地质处置的概念

对于高放废物最终处置,曾经提出“太空处置”、“深海沟处置”、“冰盖处置”、“岩石熔融处置”、“深钻孔处置”等方案^[1-4]。经过多年的研究,目前普遍接受的可行方案是深地质处置,即把高放废物埋在距离地表深约 300 ~ 1000 m 的地质体中,使之永久与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程即称为高放废物处置库。高放废物处置库普遍采用的是“多重屏障系统”设计。各国根据地质条件的不同,选择了不同岩性作为天然屏障^[5,6]。所选的处置库场地在区域构造和工程地质稳定性方面要符合选址要求,处置库围岩的渗透性要低,对核素的吸附性要好,地下水的流速要缓慢,这些是选择天然屏障的最基本要求。对人工工程屏障不仅要考虑它们的工程强度,还要考虑它们在化学上和热学上的稳定性,以及它们抗辐射的能力。

(二) 地质处置的特点

由于高放废物中含有铀、钚、镅、锔等放射性核素,它们具有放射性强、毒性大和半衰期长等特点,因此,对其进行地质处置的难度极大,其难点在于如何使高放废物与人类生存环境可靠地隔离、如何使公众相信能够保证高放废物处置的安全、如何说服建库地点的居民同意建造处置库等。同时整个处置过程前人从未经历过,缺乏实际工程经验。因此,对该类废物的处置是一项极其复杂的系统工程,它具有长期性、复杂性、艰巨性、综合性和探索性等特点^[4,5],这主要表现在:

1) 研究开发难度大。建造高放废物地质处置库这样的地下工程,在科学、技术和工程上面临一系列重大难题,包括:如何选择符合条件的场址、如何评价场址的适宜性、如何选择隔离高放废物的工程屏障材料、如何设计和建造处置库、如何评价万年以上的时间尺度下处置系统的安全性能等难题。它们涉及的均是前沿交叉科学问题,涉及的学科包括地质学、水文地质学、放射化学、岩石力

学、工程科学、材料科学、矿物学、热力学、核物理、辐射防护、计算机科学以及社会科学、经济科学等。另外,开发处置库是一个长期的系统化的多学科联合攻关的过程,一般需要经过基础研究、处置库选址、地下实验室研究、处置库建设等阶段。

2) 安全评价期极长。国际上一般认定的安全评价期约为 1 万年(现在美国要求有更长的安全评价期)^[6,7]。这是世界上迄今为止要求安全评价期最长的工程,缺乏可借鉴的前人经验,因此,具有很大的探索性。由于安全评价期要求极长,这就给预测在这漫长的时间长河中天体、地质和人类生存环境的变化,增加了许多不确定性。

3) 研究开发周期很长。从目前国际上的实践经验来看,一般从高放废物处置库场地预选到处置库建成需要 50 年左右时间^[5-9]。例如,美国于 1957 年提出高放废物地质处置的设想并开始研究和技术开发,原来预计到 1998 年建成处置库,后来由于政治和技术等原因,估计要推迟到 2020 年以后才能建成处置库。芬兰于 1976 年开始研究,到 2020 年建成处置库,将历经 45 年,足见其工作的长期性。

4) 研究开发投资大。投资数额视各国具体情况而定,如美国处置库场地尤卡山(Yucca Mountain),从选址到建成和运行整个处置库的生命周期内的总预算是 962 亿美元,到 2010 为止已使用约 100 亿美元。因此,在高放废物地质处置研究开发时,不仅要考虑处置工程的稳定性、核安全性和技术上的可行性,还应进行代价-利益分析,以便取得合理的经济效果。

此外,社会公众对高放废物安全处置极为关注,公众接受工作的成败在很大程度上决定处置工程的成败。社会公众、政治、伦理和地方政府等因素的影响,有时甚至会起到推迟或取消原定计划的作用。

三、高放废物可以安全处置

国内外大量的理论研究、实验室研究、工程尺度验证和示范以及计算机模拟均表明,高放废物能够得到安全处置。

(1) 精心选址。高放废物处置库一般选择在自然条件和社会经济条件均有利的地区。这种地区具有以下特点:远离人烟稠密地区;位于地壳稳定地区,没有地震、火山和泥石流等自然灾害;岩石完整,岩体或地层具有足够大的体积;天然屏障能够阻滞放射性核素迁移;地下水稀少且流动缓慢。

(2) 深埋。高放废物处置库一般建于 300 ~ 1000 米深的地质体中,在这样的深度下,人类闯入的几率极小,并且,深部为还原带,许多变价的次铜系元素均为不易迁移的还原态,极大地降低了元素的活动性。

(3) 精心设计的多重工程屏障可以长期阻滞放射性核素的迁移。高放废物处置库一般有三重工程屏障:玻璃固化体、废物罐、缓冲材料,这些材料可以迟滞地下水的浸入,迟滞放射性核素的迁移。

(4) 对处置系统的每一个过程都进行详细研究。高放废物处置库建成后将经历一系列的作用和过程,如地震、断层作用、地下水的侵蚀、地下水对废物的溶解、核素随地下水迁移、微生物作用、人为的钻探等。对这些过程,均需进行详细研究,以确保安全。

(5) 地下实验室研究。地下实验室是高放废物处置库工程的预演,在其中开展大量的工程开发和验证研究,包括开展 1:1 工程尺度验证实验,在真实的深部地质环境中考验工程屏障(如废物体、废物罐、回填材料等)的性能;进行示范处置,为未来实施真正的处置作业提供经验等。在地下实验室获得经验将为安全建造、运行和关闭处置库提供坚实的保证。

(6) 采用现代大规模计算机模拟技术,详细预测地质处置系统在未来 100 万年内的行为,其中 1 万年以内的预测准确度较高。欧盟的性能评价结果表明,在未来 100 万年内,高放废物处置库对个人产生的最大剂量仅为 10^{-4} Sv/a,比背景辐射(10^{-3} Sv/a)还低一个数量级。

(7) 分步骤建造处置库,确保万无一失。

(8) 考虑了废物可回取:在处置库的设计中,考虑了废物的可回取,以免万一有问题,可以把废物回取出来。

(9) 天然类比研究提高了对高放废物地质处置安全的信心。在西非加蓬的奥克洛“天然反应堆”中,10 吨裂变产物和 1.5 吨钚在过去的 20 亿年中,这些产物仅迁移了几厘米或几米远。其他类型的天然类比也获得了类似的结果,提高了对地质处置安全的信心。

经济合作和发展组织核能机构的权威调查结果表明,“经过长期研究,形成了广泛共识:

经过适当的选址和精心设计的处置库能够保证未来任何时间段内的充分安全与可靠,而且,地质处置是保证长寿命废物与人类生存环境永远隔离的唯一可行的途径”^[1]。

四、国际高放废物地质处置特点

目前世界上 441 台正在运行的核电机组每年产生 1 万多 tHM(吨重金属)的乏燃料,不足 1/3 的乏燃料接受了后处理,以对其中的易裂变材料进行循环利用,其余则放置在中间储存设施中。目前全世界储存有约 19 万 tHM 乏燃料。

高放废物安全处置的复杂性一直受到国际组织和世界各国的高度关注,欧、

美、日等有核国家和地区通过制定国家政策、颁布法律法规、成立专门机构、拨付专门经费、制定长期科技开发计划、建立专门的地下研究设施和开展长期研究等方式,从政策、法规、机构、经费和科研等方面确保高放废物的安全处置。在过去十几年中各国在高放废物地质处置法规、选址、场址评价、工程屏障、地下实验室、概念设计、性能评价、处置库建造、公众接受等方面取得的重要进展^[1-12]。

(一) 高放废物地质处置各方面进展

(1) 法律法规。在国际原子能机构的支持下,有关国家之间签订了针对放射性废物处置的“乏燃料安全管理与放射性废物安全管理公约”;国际辐射防护委员会出版了“固体放射性废物处置的辐射防护原则”(ICRP - 64)和“放射性废物处置的辐射防护政策”(ICRP - 77);国际原子能机构也颁发了一系列国际认同的非强制性放射性废物安全标准(RAWASS)。各国有关法规的重要特点是,明确规定了乏燃料和高放废物产生单位必须承担安全处置废物的责任。而政府除了要承担安全处置国防高放废物的任务外,还必须监督民用高放废物产生单位安全处置高放废物。

(2) 处置方法。深部地质处置已成为公认的高放废物永久处置方法。尽管早期探讨过海床处置、深钻孔处置和太空处置等方案,但就费用、风险和法规要求而言,这些方案实施的可能性不大。

(3) 燃料循环技术路线。英、法、德、日、俄和印度等国采取对乏燃料进行后处理、玻璃固化、暂存和最终处置的技术路线,而加拿大、瑞典、芬兰和瑞士则对乏燃料直接进行处置。目前,美国暂采取乏燃料直接处置方案,但其方案中考虑了在100年之内还能从处置库中回取乏燃料,美国处置库中还同时处置军工高放废液的玻璃固化块。

(4) 地质处置技术路线。在通过大规模的基础研究和地下实验室研究,获得了丰富的经验和掌握技术之后,越来越多国家今后的高放废物地质处置技术路线是:处置库选址和场址评价→特定场址地下实验室→处置库建造。

(5) 地质处置规划。芬兰将于2020年建成乏燃料处置库,而瑞典已经于2009年确定场址,随后开始建库。法国已于2006年提交建造高放废物库的可行性报告。

(6) 选址工作取得了突破性进展。芬兰于2001年5月确定了Olkiluoto为高放废物处置库场址,瑞典于2009年确定了Forsmark为最终场址,法国确定了Meuse/Haute Marne为最终场址。美国布什总统于2002年7月确定了内华达州尤卡山为最终场址(但在2010年又遭到奥巴马总统的否决)。

(7) 工程屏障研究。针对不同的处置概念,提出了不同的工程屏障设计,并

对其在处置库条件下的性能及其与天然屏障的作用有了深刻的了解;以结晶岩为围岩的处置库,将采用膨润土作为回填材料。

(8) 地下实验室中的大规模试验及国际合作取得进展。瑞典的 Aspo、比利时的 Mol、加拿大的 URL、瑞士的 Grimsel 和 Mont Terri、法国 Meuse/Haute Marne、捷克的 Joseph、美国尤卡山的 ESF 等地下实验室研究均获得了大量成果;日本目前还在建造瑞浪和幌延地下实验室。

(9) 若干重点研究工作。国际上重点开展了处置库开挖技术研究、工程开挖损伤研究、废物罐可回取性研究、场址特性评价方法研究、场址水文地质特性研究、放射性核素迁移试验、放射性废物处置效应研究、工程屏障制造和性能研究、地质处置系统长期性能综合试验、原型处置库、天然类比研究、人工类似物研究等重大研究项目。目前的研究热点问题包括地质处置系统、场址评价、工程屏障和工程设计、废物的可回取、性能和安全评价、安全方案等方面。

(二) 各国研究开发进展

美国共有 104 个民用反应堆正在运行^[2,7],其乏燃料连同军事高放废物将在一起最终处置。据预测,到 2030 年,美国将积累 9.0×10^3 t 国防高放废物和 8.5×10^4 t 从商用反应堆中卸出的乏燃料。美国的高放废物地质处置计划原来由能源部负责执行,其下属的民用放射性废物管理办公室以及尤卡山场址特性评价办公室具体负责实施。该国采取乏燃料直接处置的技术路线,处置库概念设计为平巷型,位于地下水水位以上的包气带中,处置后的乏燃料可在 100 年内回取。处置库候选场址原定于内华达州的尤卡山,到 2009 年,详细的场址评价工作已完成,性能评价也已完成。整个处置计划约需 962 亿美元,经费主要来自电费的提成,每年能收取费用约 6 亿美元。但是,2009 年 2 月,美国新任总统奥巴马公布了 2009 和 2010 年的政府预算。其中尤卡山高放废物处置库项目 2009 年的预算减到 2.87 亿美元,比原布什政府的预算少了 1 亿美元。2010 年的预算减到 1.97 亿美元,为历年最低,到 2011 年彻底削减尤卡山项目经费。后来成立了美国核能未来高端委员会(Blue Ribbon Commission),该委员会于 2012 年 1 月公布了其最终报告,该报告建议美国重新启动选址程序。

瑞典有 4 个核电站^[2,9,10],共 12 个机组(包括已退役的 2 个机组),核电占总发电量的 51.6%。到 2010 年,预计累计产生的乏燃料将达 7.9×10^4 t。目前,乏燃料存放在 Simpevarp 核电站附近的乏燃料中间储存设施(CLAB)之中。由核电站出资成立的“瑞典核燃料与废物管理公司(SKB)”负责高放废物地质处置工作,采取的技术路线是用深部地质处置方法在结晶岩(花岗岩)中处置乏燃料。瑞典从 20 世纪 70 年代即开始系统、详细的研究工作,其研究计划及成果被

国际公认为是最好的,是在花岗岩介质中开展高放废物地质处置工作的“领头羊”。20世纪80年代,在Stripa铁矿建造了位于花岗岩中的地下实验室,在1995年又建成了位于花岗岩中的Aspö地下实验室;同时开展了大量试验,包括场址评价方法学、新型仪器试制(如地质雷达等)、核素迁移、工程屏障性能、深部地质环境等研究,世界上有十几个国家或组织参加了该项研究。瑞典自1976年开始选址,目前已筛选出2处场址,正在开展详细的场址特性评价,预计将于2009年确定最终场址。

德国有17台机组在运行,17台机组已停堆等待退役,2台机组已完成退役。核电占总发电量的30%。德国将采取对乏燃料直接处置的技术方案,处置库围岩为岩盐(盐丘)^[6,7]。据预测,到2040年,德国将有 $2.97 \times 10^5 \text{ m}^3$ 非发热废物、 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 发热废物。发热废物中,908 m^3 为高放废液玻璃固化体、 $2.814 \times 10^3 \text{ m}^3$ 为中放废物,其余为乏燃料。除已处理的乏燃料外,德国将采取对乏燃料直接处置的技术方案。鉴于德国北部有200个大小不同的盐丘以及岩盐的优点,德国于20世纪60年代就选定岩盐作为放射性废物处置库的围岩,并开始研究。60年代建造有位于盐矿中的Asse试验处置库。戈勒本盐矿(Gorleben)于1977年选为高放废物地质处置库候选场址,1979~1984年开展了地质调查;1986~1994年开挖完成2个深达840 m的竖井;1996年起开展了综合的坑道场址调查工作。2000年德国绿党执政之后,于2001年6月11日通过一项协议,决定德国今后放弃核电,并决定暂停戈勒本场址的工作。

瑞士有5个核电机组^[2,6,7],核电占总发电量的40.6%,其乏燃料总量将达到 $3.0 \times 10^3 \text{ t}$,是先运到英国和法国进行处理,制成玻璃固化体(约 500 m^3)后,再运回国内进行处置,相关工作由瑞士核废物处置合作机构(Nagra)负责进行。采用深部地质处置方式,处置库围岩为花岗岩或黏土岩。瑞士建有2个地下实验室:位于花岗岩中的Grimsel地下实验室和位于黏土岩中的Mont Terri地下实验室。

法国共有59个机组^[2,6,7],核电占总发电量的78.2%。预计到2040年将有 $5.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ 的高放废物玻璃固化体和 $8.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的超铀废物需要处置。法国国家放射性废物处置机构(ANDRA)负责高放废物的处理及处置工作。法国采用深部地质处置技术路线,可选择的围岩为花岗岩和黏土岩,其选址工作始于20世纪80年代,已筛选出三处场址:Meuse/Haute Marne场址(黏土岩)、Vienne场址(花岗岩)和Gard场址(黏土岩)。Vienne场址因公众反对,现已放弃。Meuse/Haute Marne场址已获当地民众同意,2000年开始建地下实验室,并于2004年建成。评价工作要求已于2006年完成。

日本目前有17座核电站(53个机组)^[2,6,7],核电占总发电量的35.2%。目

前这些核电站退役后,将总共产生 5.3×10^4 t 的乏燃料。经后处理、玻璃固化之后,将被最终处置。日本 2000 年成立了“高放废物地质处置实施机构”(NUMO),负责具体的选址和建库工作。日本 1976 年就提出应采用深部地质处置方式处置高放废物,并开展了大量研究,包括室内大型试验、性能评价和地下实验室研究。在釜石和东浓地下实验室开展过大量现场科学试验,还参与瑞典、加拿大和瑞士等国的地下实验室研究。目前正在建设瑞浪和幌延 2 个地下实验室。前者位于花岗岩中,设计深度 1 000 m,目前已达 200 m 深。后者位于沉积岩中,深度 500 m。

芬兰目前有 2 座核电站^[2,6,7]。核电占总发电量的 32%。按核电站运行 40 年计算,芬兰需处置的乏燃料为 2.6×10^3 t;若按运行 60 年计算,则有 4.0×10^3 t。芬兰政府已批准新建造 1 座核电站,故需处置的乏燃料会更多。芬兰拟采用“深部地质处置”的技术路线最终处置乏燃料,处置库拟建在深 500 m 左右的花岗岩基岩之中,为竖井—巷道型或竖井—斜井—巷道型。据估算,最终处置芬兰乏燃料的总费用为 30 亿欧元(不包括研究开发费用)。处置费用来自电费。到目前为止,所需的 30 亿欧元处置费用已筹集完毕,其乏燃料处置库场址评价设施(ONKALO)螺旋坑道已开挖了 2800 米(全长为 5500 米,520 米垂直深度),2020 年拟投入运行。2001 年 5 月,芬兰国会以 159 票赞成,3 票反对的表决结果,最终确定 Olkiluoto 核电站的花岗岩体为处置库场址。

五、高放废物地质处置地下实验室

地下研究实验室是开发最终处置库必不可少的关键步骤,地下实验室在处置库开发过程中起着下述重要作用^[2,10,12]:

- (1) 了解深部地质环境和地应力状况,获取深部岩石和水样品,为其他研究提供数据和试验样品;
- (2) 开展 1:1 工程尺度验证试验,在真实的深部地质环境中考验工程屏障的长期性能;
- (3) 开发处置库施工、建造、回填和封闭技术,完善概念设计,优化工程设计方案,全面掌握处置技术,并估算建库的各种费用;
- (4) 开发特定的场址评价技术及相应的仪器设备,并验证其可靠性;
- (5) 开展现场核素迁移试验,了解地质介质中核素迁移规律;
- (6) 通过现场试验,验证修改安全评价模型;
- (7) 为处置库安全评价、环境影响评价提供必不可少的各种现场数据;
- (8) 进行示范处置,为未来实施真正的处置作业提供经验;
- (9) 培训技术和管理人员;

(10) 提高公众对高放废物处置安全性能的信心,解决高放废物处置的一些社会学难题。

早期的地下实验室一般利用废旧矿山坑道或民用隧道改建,仅开展方法学试验,不做“热”试验,且与处置库场址没有直接联系。这种地下实验室被称为“普通地下实验室”(generic underground research laboratory)。比较著名的有瑞典的 Stripa 和 Aspo、德国的 Asse、加拿大的 URL、日本的东浓和釜石、瑞士的 Grimsel 和 Mont Terri 等地下实验室。

经过多年试验,随着经验的积累、技术的成熟,又出现了另一种地下实验室:特定场址地下实验室(site-specific underground research laboratory)。它是在选定的高放废物处置库预选场址上建造的地下设施,可以开展“热”试验,具有方法学研究和场址评价双重作用,从中获取的数据可直接用于处置库设计和安全评价。并且,这种地下实验室在条件成熟时可直接演变成处置库,比较著名的有美国内华达州尤卡山的 ESF 设施、芬兰正在 Olkiluoto 建造的 ONKALO 场址评价地下实验室、法国巴黎盆地东部的 Meuse/Haute Marne 等地下研究设施。

六、国内进展

(一) 有关政策

2003 年我国发布了“中华人民共和国放射性污染防治法”,其第四十三条中明确规定了“高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置”,这从国家层次明确了深地质处置的地位。

2006 年国防科工委、科技部和国家环保总局联合发布了《高放废物地质处置研究开发规划指南》,提出处置库开发“三步曲”式的技术路线^[11-13],明确了研究开发的总体设想,从而使我国高放废物地质处置进入了全面启动的新阶段。

2007 年 10 月国务院批准了《我国核电发展中长期发展规划(2005~2020 年)》,提出了 2020 年建成地下实验室的阶段目标。

2010 年 7 月财政部、发改委和工信部颁布“核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法”,规定拥有已投入商业运行五年以上的压水堆核电机组的核电厂需要缴纳乏燃料处理处置基金,其征收标准为 0.026 元/千瓦时。其用途包括高放废物处理处置、乏燃料运输、离堆贮存、后处理等。这一办法的公布使得高放废物地质处置研究开发和未来地下实验室和处置库建设的经费有了明确的来源。

2011 年 12 月,国务院颁布新的“放射性废物安全管理条例”,明确了有国务院核工业行业主管部门组织实施高放废物的安全技术研究、地下实验、选址和

建造。

2012年5月国务院原则批准环保部、发改委、财政部、国家能源局和国防科工局提出的“核安全与放射性污染防治十二五规划及2020年远景目标”,其提出的9项重点任务中包括“推动高放废物地质处置预选区研究”,2020年远景目标中,进一步明确“建成地下实验室”。

上述法律法规等的颁布和施行,为高放废物地质处置的研究开发提供了保障。

(二) 我国高放废物的数量

我国的高放废物主要来源于核电站乏燃料经后处理产生的高放废液以及以前积累的军工高放废液,此外,还包括一部分 CANDU 堆乏燃料和超铀废物。

(1) 我国核电发展和乏燃料数量

根据2007年10月国务院批准的《我国核电发展中长期发展规划(2005~2020年)》中的核电规模,我国大陆到2020年投入运行的核电装机容量将达到4000万千瓦,在建装机容量1800万千瓦。以此为基础计算,到2020年我国将累积有约10,300 tHM 乏燃料(其中压水堆乏燃料约7000 tHM 和重水堆乏燃料约3300 tHM)。《我国核电发展中长期发展规划(2005~2020年)》中,于2020年建成的反应堆,加上届时在建的18个反应堆,最终共将产生82,630吨乏燃料。关于2020年以后的乏燃料数量,每增加一座百万级千瓦的核电站,每年将多产生约22 tHM 乏燃料,每个堆全寿期共产生约1320吨乏燃料。

(2) 深地质处置的放射性废物量

我国需要进行深地质处置的放射性废物分为三类:民用放射性废物、国防放射性废物和处置方案待定的乏燃料。民用放射性废物来源于压水堆乏燃料的后处理,包括高放玻璃固化废物、高放固体废物和 α 废物。核能发电产生的乏燃料量决定了此类放射性废物量。国防放射性废物来源于过去的核军工生产和将来的军工核设施治理和退役,包括高放玻璃固化废物、高放固体废物和 α 废物。处置方案待定的乏燃料包括重水堆乏燃料和未来可能产生的高温气冷堆乏燃料。

(三) 我国高放废物地质处置研究进展

我国高放废物地质处置研究工作于上世纪80年代中起步,20多年来,在处置选址和场址评价、核素迁移、处置工程和安全评价等方面均取得了不同程度的进展^[11,13-22]。潘自强、钱七虎院士领导的课题组完成了中国工程院咨询课题“高放废物地质处置战略研究”,并于2009年出版了该项目的成果^[22]。核工业北京地质研究院等单位开展了高放废物处置库场址预选研究,在对华东、华南、

西南、内蒙、新疆和西北等 6 个预选区进行初步比较的基础上,重点研究了西北甘肃北山地区。1999 ~ 2012 年,核工业北京地质研究院等在甘肃北山开展了选址场址评价研究,在地质调查和水文及工程地质条件、地震地质特征等研究基础上,施工了 19 口钻孔,获得了深部岩样、水样和相关资料,掌握了花岗岩场址特性评价方法。2011 年甘肃北山预选区被国防科工局和环保部定为我国高放废物处置库首选预选区。按照国防科工局的总体要求,还在新疆的雅满苏、天湖、阿奇山、内蒙阿拉善开展了选址和场址评价工作。国防科工局还批复了粘土岩场址的选址项目。在工程屏障和工程设计领域,开展了处置库和地下实验室概念设计研究,开展了地下实验室工程前期研究,开展了工程设计关键技术研究 and 工程屏障特性研究,选出了内蒙古高庙子膨润土作为我国高放废物处置库首选缓冲回填材料,建立了膨润土特性研究的大型试验台架等。研究了低碳钢、钛及钛钼合金等材料在模拟条件下的腐蚀行为。在核素迁移方面,建立了模拟研究试验装置及分析方法;研究了镓、钷、铈等放射性核素在膨润土、花岗岩等介质上的迁移行为。在安全评价方面,进行了安全评价方法调研,还对甘肃北山场址进行了初步的安全评价。自 1999 年,与国际原子能机构开展了 4 期技术合作项目,开展了场址评价、工程设计、工程屏障和安全评价等研究。2009 年核工业北京地质研究院作为全职参与单位参加了欧盟第七框架计划“工程屏障长期特性研究”,至今已经取得一批重要成果。核工业北京地质研究院等完成的“我国高放废物处置库场址区域筛选”获得国防科学技术进步一等奖、“高放废物处置库场址评价方法”、“甘肃北山预选区深部环境研究”均获得了国防科技进步二等奖。

总的说来,我国高放废物地质处置研究自 1985 年以来,取得了显著进展,尤其是自 2000 年起,国家加大了对高放废物地质处置研究开发项目的支持力度,在甘肃北山场址评价和膨润土工程特性研究等方面取得了巨大进展。但是,从总体上说,还处于研究工作的前期阶段,距完成地质处置任务的阶段目标任务还相差甚远^[11-13]。

七、面临的挑战

高放废物安全处置的目标是:使高放废物与人类生存环境充分、彻底、可靠地隔离,且隔离时间要达上万年甚至几百万年。高放废物中含有镓、钷、铈、铈等放射性核素,它们具有放射性强、毒性大和半衰期长等特点,一旦进入人类生存环境,危害极大,且难以消除。正因为如此,就需要建造特殊的地下工程—深部地质处置库来处置这些高放废物。

然而,建造这样的地下工程,除面临一系列社会和人文科学方面的难题外,

还在科学、技术和工程上面临一系列重大挑战,包括如何选择符合条件的场址、如何评价场址的适宜性、如何选择隔离高放废物的工程屏障材料、如何设计和建造处置库、如何评价上万年甚至更长的时间尺度下处置系统的安全性能等。其中,须解决的重大科学问题包括处置库场址地质演化的准确预测、深部地质环境特征、多场耦合条件下(中(高)温、应力作用、水力作用、化学作用和辐射作用等)深部岩体、地下水和工程材料的行为、低浓度超铀放射性核素的地球化学行为与随地下水迁移行为以及处置系统的安全评价等。上述领域涉及的均是前沿交叉科学问题,涉及的学科包括地质学、水文地质学、放射化学、岩石力学、工程科学、材料科学、矿物学、热力学、核物理、辐射防护、计算机科学和人文科学等,需开展综合、交叉研究才可能有所突破。另外,争取公众支持更是使废物处置库计划成功的关键。正因如此,高放废物地质处置的研究才受到世界科学界的极大关注。

就我国目前的高放废物地质处置研究开发而言,还存在以下几点需要重视的问题:缺乏国家级高放废物地质处置专项规划、缺乏政府相关法规和标准、尚没有明确实施高放废物地质处置工程的责任主体、决策机制不健全、经费投入较少、研究开发力量薄弱和缺乏研究平台等。

八、结 语

高水平放射性废物(简称高放废物)是一种放射性强、毒性大、含有半衰期长的核素并且发热的特殊废物,对其进行安全处置难度极大,面临一系列科学、技术、工程、人文和社会学的挑战。随着我国核能事业的飞速发展,高放废物的处理和处置,即将成为一个重大的安全和环保问题,有可能成为影响核能可持续发展的一个关键问题。为此,我国应当在大力发展核电的同时,高度重视高放废物地质处置的研究开发,建立完整的法规和标准体系、完善决策机制、制定国家级专项规划、成立实施高放废物地质处置工程的责任主体、加大经费投入、尽快建立以地下实验室为核心的研究平台、增强研究开发力量、加强国际合作。

参考文献

1. 经合发展组织核能机构. 国际放射性废物地质处置十年进展[M]. 北京:原子能出版社,2001.
2. OECD/NEA. Geological repositories: political and technical progress[A]. In: Workshop Proceedings[C]. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2003.

3. OECD/NEA. Engineered barrier systems(EBS) in the context of the entire safety case[A]. In: Workshop Proceedings[C]. Oxford, United Kingdom:[s. n.], 2002.

4. IAEA. International Conference on the safety of radioactive waste disposal [R]. Tokyo, Japan:IAEA CN - 1353 - 7, 2005.

5. IAEA. International conference on issues and trends in radioactive waste management[R]. Vienna, Austria:IAEA CN - 90, 2003.

6. Witherspoon P. Geological problems in radioactive waste isolation—second worldwide review [R]. Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL - 38915, 1996.

7. P. Witherspoon. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Third Worldwide Review[R]. Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL - 49767, 2002.

8. Ju Wang. High level radioactive waste disposal in China: update 2010 [A]. J Rock Mechan Geotech Engin 2010; 2(1):1 - 11.

9. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. RD&D Programme; programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste 2000, 2001, 2002, 2003, 2004[R].

10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. Aspo Hard Rock Laboratory; annual reports of 2000, 2001, 2002, 2003, 2004[R]. [s. l.]:

11. 张华祝. 中国高放废物地质处置:现状和展望[J]. 铀矿地质, 2004. 20(4):193 - 195.

12. Kickmaier W, McKinley I. A review of research carried out in European rock laboratories[J]. Nucl Engin Design, 1997, 176: 75 - 81.

13. 王驹, 范显华, 徐国庆, 等. 中国高放废物地质处置十年进展[M]. 北京:原子能出版社, 2004.

14. 王驹, 陈伟明, 苏锐等, 2006, 高放废物地质处置及其若干关键科学问题, 岩石力学与工程学报 25(4): 801 - 812

15. 王驹, 徐国庆, 金远新, 等. 甘肃北山区域地壳稳定性研究[M]. 北京:地质出版社, 2000.

16. 王驹. 中国高放废物地质处置战略规划探讨[J]. 铀矿地质 2004, 20(4):196 - 204.

17. 王驹, 徐国庆, 郑华铃等. 中国高放废物地质处置研究进展:1985 - 2004 [J], 世界核地质科学 2005, 22(1):5 - 16.

18. 陈伟明,王驹. 高放废物地质处置性能评价[J]. 世界核地质科学 2005, 22(1):17-23.
19. 陈式. 对高放废物地质处置安全评价研究的讨论[J]. 辐射防护通讯 2005, (1):10-45.
20. 国防科学技术工业委员会、国家环保总局、科技部,高放废物地质处置研究开发规划指南
21. 国务院,《国家核电发展专题规划(2005-2020年)》
22. 潘自强,钱七虎. 高放废物地质处置战略研究. 北京:原子能出版社, 2009



王 驹 1964年出生,江西遂川人,1984年毕业于南京大学地质系,1991年获博士学位。现任核工业北京地质研究院科技副院长,研究员级高工、高放废物地质处置研究项目负责人。任国际岩石力学学会放射性废物处置委员会主席、中国岩石力学与工程学会废物地下处置委员会主任等多项学术职务。

主持和参加了十几项国家部委高放废物地质处置重大项目、国际原子能机构技术合作项目和欧盟第七框架研究计划项目等国际合作交流项目,推动制定了我国高放废物地质处置战略规划、建立高放废物处置库场址评价技术体系;主持的“中国高放废物地质处置库场址区域筛选”项目成果获得2011年国防科技进步一等奖。1997年获国务院政府特殊津贴,2002年获得国防科技有突出贡献中青年专家称号和中国青年地质科技最高奖-黄汲清奖。出版多本专著和译著。

第三部分

部分参会人员名单

部分参会人员名单

序号	姓名	单位	职称/职务
1	杜祥瑞	中国工程院	院士
2	陆佑楣	中国长江三峡工程开发总公司	院士
3	钱皋韵	中核集团	院士
4	钱绍钧	总装备部	院士
5	胡思得	中国工程物理研究院	院士
6	潘自强	中国核工业集团公司	院士
7	孙玉发	中国核动力研究设计院	院士
8	李冠兴	中核 202 厂	院士
9	邱爱慈	西北核技术研究所	院士
10	叶奇蓁	中核集团	院士
11	余贻鑫	天津大学	院士
12	陈念念	核工业理化工程研究院	院士
13	彭苏萍	中国矿业大学	院士
14	于俊崇	中国核动力研究设计院	院士
15	苏万华	天津大学	院士
16	张华祝	中国核能行业协会	理事长
17	雷增光	中核集团	总工程师
18	顾军	国家核电技术公司	总经理
19	王俊	国家核电技术公司	总工程师
20	赵华	中国广东核电集团有限公司	总工程师
21	张晓鲁	中国电力投资集团公司	副总经理
22	王振海	中国工程师一局	副局长
23	杨丽	中国工程师一局	局长助理
24	刘静	中国工程院三局学术与出版办公室	副主任
25	黎青山	中国工程院办公厅宣传处	副调研员
26	徐玉明	中国核能行业协会	副秘书长

续表

序号	姓名	单位	职称/职务
27	王德林	中国核学会	秘书长
28	柴国早	环保部核与辐射安全中心	总工
29	常向东	环保部核与辐射安全中心	副总工
30	陈晓秋	环保部核与辐射安全中心	副总工
31	张爱玲	环保部核与辐射安全中心	高工
32	何建坤	清华大学	研究员
33	吴宗鑫	清华大学	研究员
34	薛大知	清华大学	研究员
35	孙玉良	清华大学	研究员
36	张作义	清华大学核研院	院长兼总工
37	王驹	核工业北京地质研究院	总工程师
38	钮新强	长江勘测规划设计研究院	院长/教高
79	余建星	天津大学	副校长/教授
80	贾堤	天津市科委	总工程师
81	费建军	天津市电视技术研究所	高级工程师
82	高明洛	天津市万木辐射防护公司	总经理
83	梁炳海	天津电力建设公司	总工程师
84	柳志明	天津电力建设公司	高工
85	商迎庆	卫生防病中心	正主任医师
86	姚学	天津市核学会	理事长
87	高振镛	天津市核学会	副理事长
88	赵文颖	天津市核学会	主管
89	李文辉	军事交通学院	高工
90	郭红旗	技术物理研究所	书记
91	唐卫东	技术物理研究所	所长
92	杨斌	技术物理研究所	高工
93	徐涛	技术物理研究所	高工

续表

序号	姓名	单位	职称/职务
94	孔祥山	技术物理研究所	工程师
95	刘猛	中环天仪股份有限公司	副总经理
96	陈维琨	中环天仪股份有限公司技术中心	主任
97	侯志强	天津蓝孚高能物理技术有限公司	总经理/高级工程师
98	王剑钢	山东蓝孚电子加速器技术有限公司	总经理/教授
99	赵锋	天津市辐射管理所	所长
100	张晶	天津市辐射管理所	高工
101	张卫江	天津大学	教授
102	林志春	武装警察部队	主任
103	王成山	天津大学	教授
104	高宇	天津大学	讲师
105	王黎明	核工业理化工程研究院	院长
106	封志强	核工业理化工程研究院	党委书记
107	张志忠	核工业理化工程研究院	副院长 兼总工
108	吴辅兴	核工业理化工程研究院	副总工程师
109	张铁林	核工业理化工程研究院	副总工程师
110	张琪	核工业理化工程研究院	副总工程师
111	张云兴	核工业理化工程研究院	副总工程师
112	吴建军	核工业理化工程研究院	副总工程师
113	孟琰彬	中核(天津)机械有限公司	总经理
114	郭强	中核(天津)机械有限公司	党委书记
115	李连广	中核(天津)机械有限公司	总工程师
116	郝宝宏	中核(天津)机械有限公司	副总工程师

后 记

科学技术是第一生产力。纵观历史,人类文明的每一次进步都是由重大科学发现和技术革命所引领和支撑的。进入 21 世纪,科学技术日益成为经济社会发展的主要驱动力。我们国家的发展必须以科学发展为主题,以加快转变经济发展方式为主线。而实现科学发展、加快转变经济发展方式,最根本的是要依靠科技的力量,最关键的是要大幅提高自主创新能力。党的十八大报告特别强调,科技创新是提高社会生产力和综合国力的重要支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置,提出了实施“创新驱动发展战略”。

面对未来发展之重任,中国工程院将进一步加强国家工程科技思想库的建设,充分发挥院士和优秀专家的集体智慧,以前瞻性、战略性、宏观性思维开展学术交流与研讨,为国家战略决策提供科学思想和系统方案,以科学咨询支持科学决策,以科学决策引领科学发展。

工程院历来重视对前沿热点问题的研究及其与工程实践应用的结合。自 2000 年元月,中国工程院创办了中国工程科技论坛,旨在搭建学术性交流平台,组织院士专家就工程科技领域的热点、难点、重点问题聚而论道。十年来,中国工程科技论坛以灵活多样的组织形式、和谐宽松的学术氛围,打造了一个百花齐放、百家争鸣的学术交流平台,在活跃学术思想、引领学科发展、服务科学决策等方面发挥着积极作用。

至 2011 年,中国工程科技论坛经过百余场的淬炼,已成为中国工程院乃至中国工程科技界的品牌学术活动。中国工程院学术与出版委员会今后将论坛有关报告汇编成书陆续出版,愿以此为实现美丽中国的永续发展贡献出自己的力量。

中国工程院