

核能与核安全：日本福岛核事故分析与思考

陈 达

(南京航空航天大学材料科学与技术学院核工程系, 南京, 210016)

摘要:核能是当今人类社会不可或缺的重要能源,日本福岛核事故危害巨大并再次将核能利用推向风口浪尖。本文从世界核能发展及中国能源需求出发,阐述了发展核能的重要性和必要性;对日本福岛核事故基本情况进行了简单介绍,并对事故原因作深入分析;从福岛核事故对世界核电发展的影响、中国核电发展规划、核电站选址、核电站设计运行、核电技术研发、核安全文化及核电人才培养等方面进行了分析思考,吸取经验、总结教训,切实把核安全摆在核电发展首位。

关键词:核能;核安全;福岛核事故;分析与思考

中图分类号: TL48

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)05-0597-06

Nuclear Energy and Nuclear Safety: Analysis and Reflection About Fukushima Nuclear Accident

Chen Da

(Department of Nuclear Engineering, College of Material Science and Technology,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Nuclear energy is indispensable and important energy to human society. Fukushima nuclear accident produced great harm and will seriously affect the development of nuclear energy. In this paper, the importance and necessity of the development of nuclear energy are introduced based on the development of world nuclear energy and the energy demand in China. The basic situation of Fukushima nuclear accident is introduced and the reasons of the accident are also analyzed. The influence of Fukushima nuclear accident on the development of world nuclear power, the nuclear power development plan of China, the nuclear power plant siting, the design and operation of nuclear power plant, and the research of nuclear power technology, nuclear safety culture and personnel training of nuclear major are analyzed and discussed. Nuclear safety is the most important thing in the development of nuclear power.

Key words: nuclear energy; nuclear safety; Fukushima nuclear accident; analysis and reflection

1 核能是当今人类社会不可或缺的能源

19世纪末,天然放射性的发现开创了人类认识物质世界的新篇章,揭开了核科学技术的序幕。20世纪初叶,核科学技术在理论和实验研究上均得到了快速发展并获重大突破,其中核裂变现象的发现让人们认识到物质质量亏损将转变成以往任

何化石及其他能源所不可比拟的巨大能量,这就是核能。人类历史上,科学技术进步所取得的最新成果往往首先被应用于当时的军事斗争,核科学技术也不例外。二战期间,基于核裂变原理的原子弹就被成功研制生产,并于1945年8月6日和9日分别投向日本广岛和长崎,事实证明其巨大杀伤力是任何冷兵器和热兵器所不能比拟的。迄今为止,核武器仍然是国际军事竞争中不可替代的杀手锏。

二战结束后,科学家们开始转向核能和平利用的研究和实践,以期让核能造福人类。20世纪五六十年代,以前苏联奥布涅斯克实验型核电站、美国希平港核电站和英第安角1号核电站、法国舒兹核电站、德国奥珀利海姆核电站等为代表的第一代核电站先后被建造,用于验证核电在工程上的可行性并证明是成功的。第一代核电站功率均比较小,商业利用价值不大,但它们却为后期核电站的开发建设奠定了重要的理论基础,积累了许多宝贵的工程经验并建立了可供参考的一整套设计、运行和管理规程。随后,核电站在世界范围内被大规模兴建,1970年达到167台,1990年达到328台,2000年达到438台。根据国际原子能机构(International atomic energy agency, IAEA)公布的数据^[1],截至2010年底全世界在运行核电机组共计441台(总装机容量达3.75亿千瓦)、在建核电机组67台(装机容量0.64亿千瓦),核电年发电量约占世界发电总量的15%。表1给出了全世界在运行和在建核电站基本情况。核电比例超过30%的国家和地区共12个,核电比例占10%以上的国家和地区达21个。法国在运行核电机组58台,2010年核电总量为4 101亿千瓦时,核电比例高达70%以上;美国拥有世界近1/4的核电机组,2010年核电总量为8 071亿千瓦时,其核电比例约为20%。核能已成为当今人类社会不可或缺的重要能源,核电是目前世界电力供应的重要组成部分。

中国是一个世界大国,国家建设和经济发展对能源有较大需求,但长期以来主要依靠化石能源,其占中国能源结构的70%左右。煤炭、石油资源已日趋枯竭,其对环境造成的污染和温室气体的排放也不容忽视。大力发展绿色可再生能源,如太阳能、风能、水能、生物质能、潮汐能、地热能等,逐步改变能源结构已势在必行。核电作为一种清洁能源,具有其他能源不可比拟的优势。中国是世界上少数几个拥有比较完整核工业体系的国家之一。20世纪70年代,国务院做出了发展核电的决定,经过三十多年的努力,中国核电从无到有,得到了一定的发展。截至2012年3月,中国在运行核电机组16台,总装机容量1 182万千瓦,2011年核电比例仅为1.85%,远低于世界平均水平,还有很大发展空间^[2]。中国人均能源资源占有率较低,分布也不均匀,为保证中国能源的长期稳定供应,有效节能减排,核能将成为必不可少的替代能源。2007年,国务院颁布的《核电中长期发展规划(2005—2020)》中提出:到2020年,核电运行装机容量争取达到4 000万千瓦;

表1 全世界正在运行和在建的核动力反应堆(核电站)情况(截至2010年12月31日)^[1]

国家	在运行 反应堆 (机组数)	在建 反应堆 (机组数)	2010年 核电总量/ (TW(e) ·h)	2010年 核电占全 国总发电 量比例/%
阿根廷	2	1	6.69	5.91
亚美尼亚	1		2.29	39.42
比利时	7		45.73	51.16
巴西	2	1	13.90	3.06
保加利亚	2	2	14.24	33.13
加拿大	18		85.50	15.07
中国	13	28	70.96	1.82
捷克共和国	6		26.44	33.27
芬兰	4	1	21.89	28.43
法国	58	1	410.09	74.12
德国	17		133.01	28.38
匈牙利	4		14.66	42.10
印度	19	6	20.48	2.85
伊朗伊斯兰共和国		1		
日本	54	2	280.25	29.21
大韩民国	21	5	141.89	32.18
墨西哥	2		5.59	3.59
荷兰	1		3.75	3.38
巴基斯坦	2	1	2.56	2.60
罗马尼亚	2		10.70	19.48
俄罗斯联邦	32	11	159.41	17.09
斯洛伐克	4	2	13.54	51.80
斯洛文尼亚	1		5.38	37.30
南非	2		12.90	5.18
西班牙	8		59.26	20.09
瑞典	10		55.73	38.13
瑞士	5		25.34	38.01
乌克兰	15	2	83.95	48.11
英国	19		56.85	15.66
美国	104	1	807.06	19.59
总计	441	67	2 629.95	NA

核电年发电量达到2 600~2 800亿千瓦时;考虑核电的后续发展,2020年末在建核电容量应保持在1 800万千瓦左右^[3]。后来又计划将2020年的目标调整为7 000万千瓦。中国在役、在建以及拟建核电站规划布局如图1所示。积极推进核电建设,保障能源供应与安全,保护环境,实现电力工业结构优化和可持续发展,已成为中国能源建设的一项重要政策。

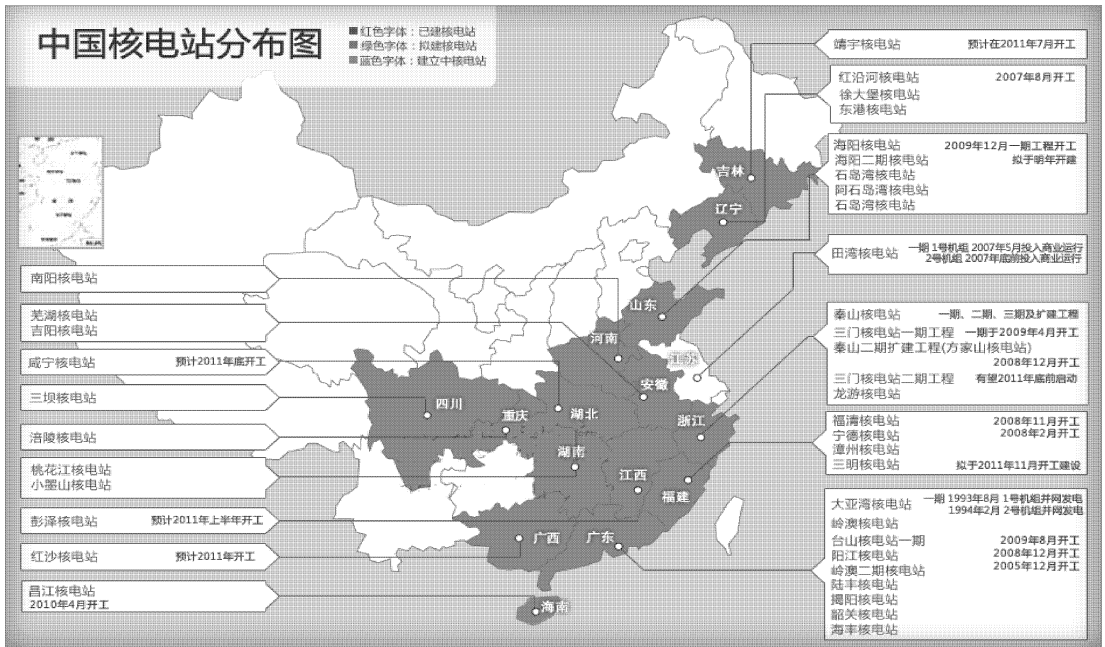


图 1 中国在役、在建以及拟建核电站规划布局

2 日本福岛核电站事故基本情况分析

20 世纪 70 年代,日本在福岛县双叶群大熊町沿海建造了世界上最大的核电机群,由福岛第一核电站 6 台机组(表 2)和福岛第二核电站 4 台机组组成。福岛核电机群均采用只有一条冷却回路的单循环沸水堆,高温高压蒸气直接从堆芯中产生,推动汽轮机发电,蒸汽压力约 7 MPa,干燥度不小于 99.75%。目前,全球 400 余台机组中大约 1/4 是沸水堆,但多数已不采用这种单层循环沸水堆。福岛核电站设计寿命是 40 年,已快接近退役。但运营单位——东京电力公司,基于经济利益考虑,用现行 60 年寿命设计标准来申请延长服役,即延至 2031 年退役。核电机群许多地方出现老化迹象,包括反应堆容器中子氢脆、压力容器腐蚀、热交换器核废料处理系统出现腐蚀等,存在着许多不安全的隐患。

表 2 日本福岛第一核电站基本情况^[2]

机组	堆型	建造时间	首次	商业	(电/热功率)/ MW
			临界时间	运行时间	
1 号	BWR-3	1967.07.25	1970.10.10	1971.03.26	460/1 380
2 号	BWR-4	1969.06.09	1973.05.10	1974.07.18	784/2 381
3 号	BWR-4	1970.12.28	1974.09.06	1976.03.27	784/2 381
4 号	BWR-4	1973.02.12	1978.01.28	1978.10.12	784/2 381
5 号	BWR-4	1972.05.22	1977.08.26	1978.04.18	784/2 381
6 号	BWR-5	1973.10.26	1979.03.09	1979.10.24	1 100/3 293

2011 年 3 月 11 日,日本本州岛东海岸发生里氏 9.0 级特大地震。地震发生后,运行中的福岛第

一核电站 1,2,3 号机组和第二核电站全部 4 个机组均通过液压系统将位于堆芯下部的控制棒插入堆芯,成功实现自动“停堆”,这表明该核电站达到了超基准地震事故设计标准。地震导致核电厂外部电源和厂用电丧失,立即启动紧急柴油发电机供电,以冷却堆芯燃料组件。全厂共设有 13 台紧急柴油发电机,其中水冷式发电机 9 台,空冷式发电机 4 台,地震发生前 12 台备用,1 台待修。地震发生后,2 台空冷式发电机无法使用,1 台空冷式发电机和全部水冷式发电机组均正常运作。柴油发电机供电一个多小时后,高度达 14 m 以上的强海啸将位于海拔 13 m 高处的柴油发电机全部淹没,导致其无法继续供电。只能依靠备用电池组供电,但供电时间非常有限。随后,调入 3 台移动式柴油发电机,但因接口不匹配,无法引入。在导热冷却系统断电停运情况下,整个反应堆处于高温蒸发状态,金属元件与水反应生成氢气,在适当浓度和高温条件下发生化学爆炸并起火,安全防护设施严重受损,厂房面目全非,致使大量放射性物质向外界泄露。

福岛核事故一方面归因于突如其来的特大地震和海啸双重自然灾害,另一方面也有人为因素存在,是“天灾”和“人祸”共同作用造成的恶果。福岛核电站已接近寿命,部分部件出现老化现象,存在安全隐患。运营单位对核电机群设备、部件检查维护不到位,事故发生后部分关键设备无法发挥作用。早期单一回路的沸水堆设计存在缺陷,全厂失去电力后,核反应堆无法注水冷却,紧急情况下只能排放蒸气回路中含放射性的蒸气来减压,造成环

境污染;对堆芯融化事故估计不足,安全壳设计中未考虑氢氧复合系统,更未考虑堆芯融化物穿透压力容器而外泄的严重后果。福岛核电站遭自然灾害袭击后,日本东京电力公司对其可能产生危及人类社会和公众安全的后果估计不足甚至考虑甚少,仅从自身经济利益出发,采取保守冷却方式,千方百计考虑如何保住核电站以减少损失,而未采取更有利于公众安全的果断处置措施,最终造成堆芯融化,放射性物质外泄。事故发生后,2011年3月14日,日本政府宣布为4级核事故,3月18日升级为5级核事故,经过25天后亦即4月12日宣布为7级顶级事故。核事故的划分,IAEA有基本规范,不同级别核事故的发生和出现需要采取相应的应急响应和应急行动,以把危害和影响降到最低。福岛事故25天后,日本政府才突然将其升至7级核事故,而放射性物质的释放和泄露不是跳跃式的,这在一定程度上反映出测试数据的混乱和不一致,管理不到位,影响和贻误政府决策,致使无法开展有效控制和补救措施,加重了事态发展。事故发生后,日本政府向外界公布事故发展动态和应对处置措施等方面信息的准确性和及时性也有待商榷。

3 福岛核事故引发的几点思考

3.1 再度引起人们对核电的担忧与恐惧,对世界核电发展产生重要影响

1986年4月27日凌晨的切尔诺贝利7级核事故给全球带来很大危害,并导致核能利用和核电站建设进入低潮期。事故后,人们思考如何降低堆芯融化率和放射性向大气释放率等问题。美国核电用户要求文件(Utility requirements document, URD)和欧洲核电用户要求文件(European utility requirement, EUR)提出了第三代核电站的安全和设计技术要求,以提高核电站安全性和可靠性。自21世纪以来,能源危机促使各国相继出台积极的核电发展规划,世界核电发展开始复苏。切尔诺贝利事故阴影尚未挥去,日本福岛核电站又发生了7级核事故,再度引起人们对核电的担忧和恐惧。受日本福岛核事故影响,世界拥有核电的国家纷纷采取应对策略,并重新审视本国核电发展政策。德国政府宣布,2022年关闭现有全部核电站;瑞士政府也决定逐步退出核能发电;韩国、印度、意大利、巴西等国对核电发展持谨慎态度;美国、法国、俄罗斯等国则基本保持原有核电发展政策;中国将在保证安全前提下继续发展核电,但核电发展节奏可能会有所调整。福岛核事故对各国核电发展政策包括发展速度、技术路线、堆型选择等产生重要影响,但

世界核电事业仍将向前发展,并将促使在核电安全设计、预防不可抗力因素、核电厂选址条件及事故应急响应等方面技术的进一步改进和标准的提高。核安全将被提上一个新的高度。如果再发生重大核事故,核电发展恐怕会陷入绝境。

3.2 中国核电建设应立足实际稳步推进,不能进行跳跃式发展

从中国能源需求和能源结构来看,核能仍是不可或缺的能源,积极发展核电是中国能源长期重大战略选择。福岛核事故基本不会改变中国核电发展政策,但重新审视和完善核电长远规划仍是必要的。2007年,国务院颁布的《核电中长期发展规划(2005—2020)》中提出:到2020年,核电运行装机容量争取达到4000万千瓦。《中国能源中长期(2030,2050)发展战略研究》中提出核电发展的中长期发展目标为:“2020年核电总装机规模达到7000万千瓦,核电装机占电力总装机的4.6%,核发电量将占总电量的7.0%左右。2030年达到2亿千瓦,核电装机占电力总装机的10%,核发电量占总电量的15%。2050年达到4亿千瓦,核电装机占电力总装机的16%,核发电量占总发电量的比重为24%。”^[4]2020—2030年,装机容量由7000万千瓦增长至2亿千瓦,若按每台机组100万千瓦计算,需要建130台机组;若按每台机组150万千瓦计算,则需建87台机组;平均以100台机组计算,则每年需建10台机组,且必须是连续建设,压力太大。核能绝不仅仅是核电站,而是包括核资源、核燃料循环、设计、建造、运行、管理及核废物处置等在内的产业链,是一个国家综合实力的体现,是需要长期积累的。从目前情况看,估计难以满足这个发展速度的需求。核能发展非常必要,但不能进行跳跃式发展而一步到位,应该把核安全放在首位,立足实际,循序渐进,稳步推进。

3.3 核电站选址应慎之又慎,提高对极端气候和自然灾害等因素的预期

核电站建造受许多因素的制约,如地震、海啸、飓风、冰雪、水文、地质、气象、空中飞行器的坠落撞击事故、周边环境(如易燃易爆仓库)、人口、交通等。最近,世界范围内极端气候愈发频繁。核电站选址应慎之又慎,提高对灾难性天气和毁灭性自然灾害所造成核事故的预想,提升对超设计基准事故的应对能力,这是至关重要的。迄今为止,中国在役和在建核电站均以沿海地区为主。从能源分布考虑,中国核电规划中拟建核电站有部分在内陆(图1)。目前,对于能否将核电站建造在中国内陆还存在不同看法和一些争论。核电站需要有充足的水源

冷却,内陆核电站一般需10亿立方米以上水库容量,且该部分水量不能进入城市管网作为生活用水和工业用水。从中国地理人文情况来看,不难规划出合适、合理可行的内陆核电场址。目前,世界在役和在建核电站中有很大大一部分为内陆核电站(图2)。美国、法国、俄罗斯、加拿大等国的核电站大部分建在内陆。与沿海核电站相比,内陆核电站选址及规划设计更应该反复论证,要充分考虑自然灾害和极端气候对水源的影响、核事故发生后对内陆和河湖周边环境的影响以及核事故应急措施的有效性等一系列复杂问题,不能受利益驱动而降低选址

标准、忽视选址细节。从目前情况来看,核电站场址一旦被批准选定、建成电站并运行后,对周围环境参数的变化及影响考虑甚少。2011年日本发生3级以上地震1.9万余次,在3月11日之前的一个多月中,福岛附近地震不断,频度加大,震级上升,应该引起核电站管理运行部门关注。虽不能判断大地震何时出现,但可对服役近40年来设备的抗震能力进行全面检查评估,以保证核电站的电、水正常供应。核电站建成后,应密切关注其周围环境参数的变化并及时采取相应措施,以提高核电站对极端气候和自然灾害的应对能力。

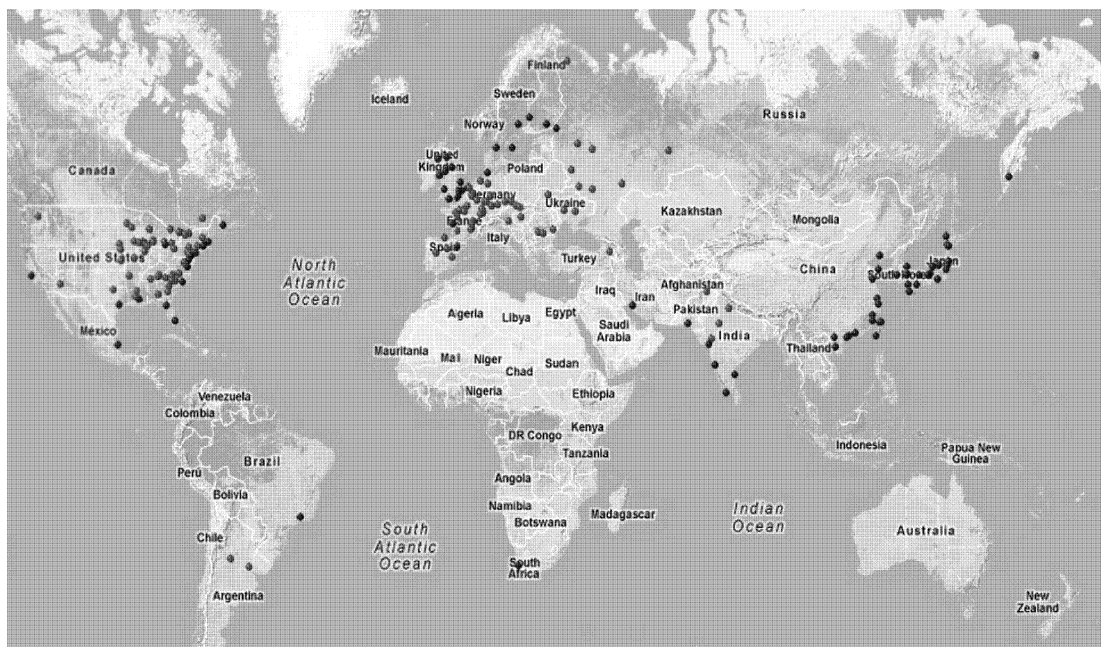


图2 全世界正在运行和在建的核动力反应堆(核电站)分布图^[2](截至2012年3月)

3.4 充分考虑缓解措施,提高核电站超设计基准事故应对能力

核电站的周密设计是保证其安全运行的基础,也是事故灾难发生时消除或降低危害的保证。核电站设计中均需充分考虑正常概率情况下的设计基准事故,如断电、失水、燃料元件破损等,并作全面分析评价,然后予以设防解决。对于千年一遇或千年不遇的极小概率超设计基准事故,充分考虑并作全面分析,但不需要设防。因为过多的冗余设计不但会使核电站建造成本大幅提高,也会带来一系列工程上的问题,必要性不大。对于核电站超基准事故并叠加,应增加相应的缓解措施,以将危害降到最低。

3.5 加大对核电站的检查维护力度,严格审核核电站延期退役

核电站是一个很复杂的系统,长期运行过程中难免会出现小故障。运营单位应加大对核电机组及

设备的检查和维护力度,确保核电站高效安全运行,确保事故发生时关键设备能发挥效能。目前,世界范围内正在运行的400余台核电机组中大约1/3建造于20世纪70年代,约1/2建造于20世纪80年代(图3),部分机组已接近退役。受当时核电理论水平和工程实践经验及制造控制能力的局限,早期核电站的安全水平与后来建造的核电站存在一定差距,且经过三四十年的持续运行,其性能较初始状

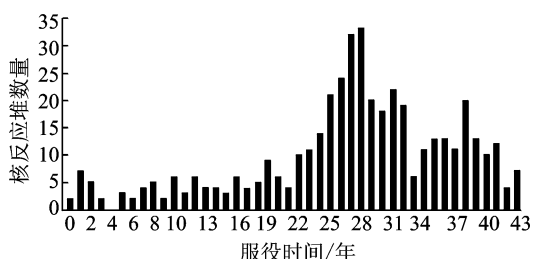


图3 全世界正在运行核动力反应堆(核电站)服役时间分布图^[2]

况也要差得多。因此,应该加倍重视在役早期核电站的检查维护力度,性能达不到现行新标准的,应予以整治或关闭。要严格控制达到寿期的核电站退役,不能为了追求经济利益而降低标准,批准其延长寿期。

3.6 加快先进核电技术的自主研发,注重技术整合

先进核电技术是核电站安全的基础,应加快更安全堆型的研发并掌握关键技术。中国核电发展的技术路线为:热中子反应堆—快中子反应堆—受控核聚变堆。目前,中国在运行的核电机组多为二代堆,在建的核电机组以中国自主研发的CPR1000和CNP1000二代加压水堆和引进的AP1000、EPR等三代堆为主,在研的四代堆有钠冷快堆、高温气冷堆、熔盐堆、超临界水冷堆。中国所涉及的核电站反应堆类型繁多、过于分散,实施起来五花八门,建议在一定阶段对相关技术和研发力量进行有效整合,要齐心协力,以尽快形成自主研发能力,不能为部门利益所驱而坚持各自为战。

3.7 提倡核安全文化,始终将核安全摆在核电发展首位

切尔诺贝利核事故和三哩岛核事故完全是由人为因素引起,福岛核事故的直接起因是多重小概率自然灾害的叠加,但事故应对过程中也存在一定人因问题。加强核安全文化建设,着力提高核电站从业人员包括决策层、管理层、技术层以及监督部门的核安全知识、核安全技能和核安全意识,进一步完善运行规程、应急响应和培训体系,保障核电站日常运行安全,增强核事故安全处置能力。提高政府对核电发展的调控和介入力度,加强对设计、施工和运营企业的监督和控制,以确保将核安全落实到核电发展的每一个环节。福岛核事故再次使人们对核电安全产生担忧。积极通过多种渠道,提高公众对核电的认识和认同,为核电发展营造良好的外部环境。

3.8 加快核电相关专业人才培养和人才储备

核电发展亟需设计研发、运行维护、管理监督等方面的专业人才,特别是核专业人才。核专业人才紧缺将成为制约未来中国核电快速发展的一大障碍。根据国防科工局以前的统计,按照一座百万千瓦级核电站需要400人计算,到2020年新增30座百万千瓦核电站需要核电人才超过1.2万人^[4]。以上数据仅是在2020年核电运行装机容量4000万千瓦基础上估算出来的。如果核电建设目标再度

提高,核专业人才需求缺口将更大。核工业人才队伍的成长周期较长,人才培养需从长计议。除清华大学、西安交通大学和上海交通大学等已有核专业高校外,2007年全国9所高校申请开设的核专业通过教育部审批,并于2008年开始招生,这些高校包括南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、武汉大学、华南理工大学、电子科技大学和中国科技大学等^[5]。后来,北京航空航天大学、南京理工大学等高校也相继新增与核技术有关的专业。从核专业人才需求形势出发,国家把核专业作为特色紧缺专业和学科给予重点扶植,无疑是合适的决策,但力度还有待加强,以支持高校搭建更为完善的人才培养软硬件平台并探索多模式人才培养体系,提高核专业毕业生的质量和素质,以满足核电发展的人才需求。

日本福岛核事故给全球带来了巨大危害和严重影响,也再次为人们敲响了核安全警钟。人们需深刻反思并从中吸取经验教训,让“安全第一”切实落实到核电站设计、运行和管理的每一个环节,以确保核电事业安全健康发展。发展核能为人类社会服务毋庸置疑,但核安全是首位,重中之重!

参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear power reactors in the world [R]. IAEA-RDS-2/31. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2011.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). The power reactor information system [EB/OL]. (2012-03-01). <http://www.iaea.org/pris>.
- [3] 国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划(2005—2020) [R]. 2007. National Development and Reform Commission. Mid long term development plan of the state's nuclear power of China (2005—2020) [R]. 2007.
- [4] 中国工程院. 中国能源中长期(2030, 2050)发展战略研究: 电力, 油气, 核能, 环境卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. Chinese Academic of Engineering. Study of the national development strategy on medium-and long-term program for energy: electrical power, oil and gas, nuclear power and environment [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [5] 李新玲. 报志愿选择核专业投身世界朝阳产业 [N]. 中国青年报, 2009-05-26. Li Xinling. Volunteer choice for nuclear major and devoted to prosperous industry [N]. China Youth Daily, 2009-05-26.