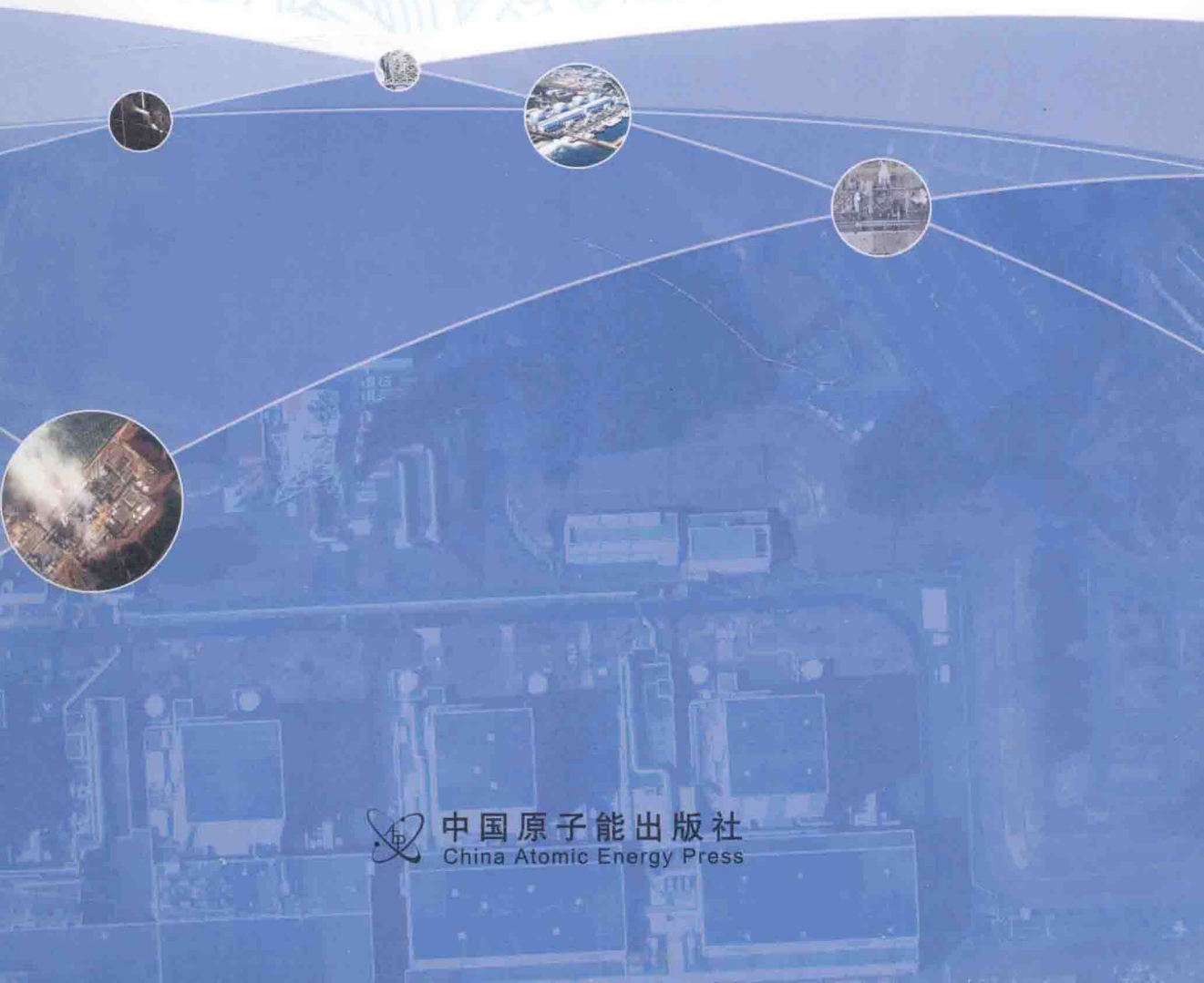


日本福岛核事故

环境保护部核与辐射安全监管二司 编
环境保护部核与辐射安全中心



中国原子能出版社
China Atomic Energy Press

日本福岛核事故

环境保护部核与辐射安全监管二司 编
环境保护部核与辐射安全中心

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

日本福岛核事故 / 王中堂, 柴国早主编.

—北京: 中国原子能出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5022-6376-8

I. ①日… II. ①王… ②柴… III. ①放射性
污染-放射性事故-研究-日本 IV. ①TL732

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 212763 号

日本福岛核事故

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 谭俊 付凯 孙凤春 刘岩 肖萍

责任校对 冯莲凤

技术编辑 潘玉玲

印刷 北京盛通印刷股份有限公司

经销 全国新华书店

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 33 字数 824 千字

版次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5022-6376-8 定价 198.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

《日本福岛核事故》 编委会

主 编:王中堂 柴国早
副主编:汤 搏 侯 伟 杨 堤 陶书生
执行主编:孙国臣 郑丽馨
编 委:孙国臣 郑丽馨 焦 峰 张 浩 赵 力
陶书生 陈 睿 杨未东 李华升 吴彦农
侯秦脉 褚倩倩 许友龙 张增庆 周 红
王娅琦 刘时贤 马国强 肖 志 孙树海
张加军 车树伟 胡 江 孙 頔 夏雨齐
安洪振 张泽宇 段 军 邹 象 丁珊珊
技术顾问:常向东 陈晓秋 孙造占 吴 浩 周启甫

序

2011年3月11日,日本福岛第一核电厂受日本东北太平洋地区地震引发海啸的影响,发生了震惊世界的核事故。福岛核事故是世界核能利用史上又一次影响深远的重要标志性事件,它与美国三哩岛核事故、前苏联切尔诺贝利核事故一样,成为研究和发展核能道路上绕不开的警示碑。人类再一次深刻地认识到,核安全是核能与核技术利用事业发展的生命线,保障核安全是实现核能与核技术事业可持续发展的前提和基础。

当前,我国已成为世界上最大的能源生产和消费国,资源环境对经济社会发展的瓶颈制约形势日益严峻。发展核能是确保我国能源供应安全的有力保障,是优化能源结构的重要抓手,是促进节能减排的有效举措,是应对气候变化的必然选择,是加快经济发展方式转变、推进生态文明、建设美丽中国的重要途径。

与此同时也一定要清醒地认识到,与其他行业相比,核行业有着不容忽视的特殊性,对核安全的要求和重视关乎核能事业发展,关乎公众利益,关乎社会稳定,关乎国家未来。只有严把安全关,始终把“安全第一、质量第一”的根本方针和纵深防御的安全理念扎根于思想、体现于作风、落实于行动,核能才能兴利避害、强国惠民。

福岛核事故发生后,国家核安全局高度重视,组织开展了一系列有针对性的响应行动:第一时间启动应急协调机制,密切跟踪事故进展,研判事故发展趋势;开启全国环境辐射监测网,全面监视放射性物质扩散对我国的影响,并向社会权威发布监测信息;会同国家能源局和地震局对我国民用核设施进行综合安全大检查,对存在的薄弱环节提出改进要求;编制核电厂福岛改进行动通用技术要求,规范共性的改进行动等。与此同时,国家核安全局结合我国核能与核技术利用事业发展实际,编写并报批通过了《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标》,对我国未来一个时期的民用核设施核安全工作完善了顶层设计,做出了总体部署。此外,国家核安全局还在核电厂外部事件裕量评估、核电集团应急

救援能力建设、公众沟通方式方法研究、后续新建核电厂安全要求的编制等方面开展了大量卓有成效的工作。上述工作中,我们充分协调了各相关单位部门,投入了大量的人力物力,开展了广泛深入的调查研究,也实施了进度核查和政策微调。目前总体来看,我们在福岛核事故后核安全监管工作的方向是正确明晰的,采取的行动是科学客观的,各核设施改进得到了及时有效的落实,核安全水平有了进一步提高。

这本《日本福岛核事故》,是国家核安全局组织编写的旨在从核安全视角全面反映福岛核事故及相关研究的一部专业读物。书中收集梳理了福岛核事故发生、发展和后续处理的相关信息,以及各国对福岛核事故研究和反馈的成果,内容丰富详实,参考价值高。该书的出版,体现了国家核安全局深入研究福岛核事故的强大力度,反映了各类读者全面了解福岛核事故的迫切愿望,书中凝聚了国家核安全局系统特别是核与辐射安全中心相关人员的心血,是集体智慧的结晶!对于福岛核事故本身,这是一部回忆录;对于核安全监管工作,这是一部教科书;对于核能研究和设计工作,这是一部案例库;对于核设施建设和运行工作,这是一部警示集。“前车之覆,后车之鉴”,我们希望每位从事核能与核技术行业的工作者,在读到这本书时都能对福岛核事故有所思考,有所收获,有所警醒,有所进步。

历史的长河中,人类文明始终在曲折中不断前行。包括核能和核技术在内,任何文明成果的应用都是利弊共存,唯兴利除弊,才能推动文明前进的步伐。目前,福岛核事故后续的调查和处理工作仍未结束,对福岛核事故经验教训的总结反馈也将是一个长期持续的过程。希望广大业内同行能够以福岛核事故为契机,重新审视核能安全保障,进一步提升核设施核安全水平,共同推动核能与核技术利用事业的安全、健康、可持续发展。

是以为序。



2014年7月28日

前 言

日本福岛核事故与美国三哩岛核事故、前苏联切尔诺贝利核事故并列,都是人类历史上最具影响的核事故,详实了解福岛核事故的相关情况和从中获得的经验教训,是专业人员和公众的迫切需求。在福岛核事故发生之后,国家核安全局高度重视对福岛核事故的经验反馈工作,通过开展信息收集、参与现场调查和国际交流等多方面的工作,获取了大量福岛核事故相关的信息,并组织专业人员对信息进行了分析和研究。为了及时将现有信息传递给核安全相关方面的专业人员,以用于学习和反馈,也便于公众了解福岛核事故,增进对核安全的了解,特编制了本书。整本书旨在全面系统描述福岛核事故的相关情况,总结对福岛核事故的经验反馈。

《日本福岛核事故》一书共分为三个部分,第一部分为福岛核事故综述,第二部分为国际主要核电国家针对福岛核事故采取的行动,第三部分为福岛核事故的若干专题。其中第一部分全面介绍了福岛核事故的相关情况,该部分共包括九章,其中详细描述了福岛核事故前日本核电厂的安全监管、受“3·11”地震海啸影响的核电厂、“3·11”地震海啸及其影响、福岛核事故的发生和演变、日本的场外应急响应和环境监测、福岛核事故的放射性物质释放、日本福岛核事故的后续处理、日本加强核安全的措施和国际社会针对福岛核事故的响应与对策。第二部分主要阐述了主要核电国家和相关组织针对福岛核事故总结的经验教训和采取的改进行动,并分别按照外部事件、设计事项、严重事故管理与场内恢复、国家组织、应急准备和响应及事故后管理、国际合作等六个领域进行了梳理、分析和归纳。第三部分针对福岛核事故经验反馈方面的重要内容进行了专题研究,该部分共包括六个专题,分别为关于 NRC 超设计基准外部事件缓解策略要求进行许可证修改命令的专题、关于美国应对超设计基准外部事件 FLEX 策略的专题、关于美国提高乏燃料水池仪表可靠性相关的许可证修改命令的专题、关于西欧核安全监管协会发布的《新建核电厂设计安全规定》的专题、关于日本轻水堆核电厂新安全要求的专题、关于福岛第一核电厂氢气爆炸的专题。需要说明的是,本书相关信息截止到 2013 年 7 月,书中关于福岛核事故情况介绍的部分采用了日本标准时间。

《日本福岛核事故》的出版得到了环境保护部(国家核安全局)的大力支持,环境保护部副部长兼国家核安全局局长李干杰同志为本书撰写了序言,环境保护部核与辐射安全中心科技委专家、以及其他特邀的国内知名专家在本书的编审过程中付出了辛勤的劳动,在此表示衷心感谢!另外,本书在出版过程中得到了国家核安全局韦力、彭俊、王崇翔等同志的大力支持,在此一并表示感谢!

本书各章节的编写人员如下:

第一部分

第 1 章由孙国臣、焦峰编写;第 2 章由焦峰、张浩编写;第 3 章由陶书生、焦峰编写;第 4 章由孙国臣、焦峰编写;第 5 章由张浩、赵力、王娅琦编写;第 6 章由赵力、车树伟、夏雨齐编写;第 7 章由孙国臣、赵力、孙颀编写;第 8 章由郑丽馨、孙国臣、张泽宇编写;第 9 章由郑丽馨、刘时贤、安洪振编写。

第二部分

第 10 章由周红、孙国臣编写；第 11 章由李华升、陶书生编写；第 12 章由张浩、郑丽馨编写；第 13 章由张增庆、杨未东编写；第 14 章由褚倩倩、孙树海编写；第 15 章由许友龙、胡江编写。

第三部分

第 16 章由吴彦农、孙国臣编写；第 17 章由郑丽馨、张加军、车树伟编写；第 18 章由焦峰、肖志编写；第 19 章由陈睿、王娅琦编写；第 20 章由杨未东、陶书生编写；第 21 章由侯秦脉、马国强编写。

由于我们的学识水平有限，报告中难免存在诸多不足，深切希望关注核安全的社会各界人士、专家以及对本书有兴趣的读者不吝赐教、批评指正。

编 者
2013 年 12 月

目 录

第一部分 福岛核事故综述

第 1 章 福岛核事故前日本核电厂的安全监管	3
1.1 日本核电概况	3
1.2 日本核安全法规体系	4
1.3 日本核安全监管体系	7
参考文献	8
第 2 章 受“3·11”地震和海啸影响的核电厂	9
2.1 沸水堆简介	9
2.1.1 沸水堆的发展	10
2.1.2 沸水堆核电厂的基本结构	11
2.1.3 BWR-3&4 型沸水堆的主要保护系统	13
2.1.4 沸水堆与压水堆的比较	16
2.2 福岛第一核电厂简介	19
2.2.1 福岛第一核电厂 1 号机组	20
2.2.2 福岛第一核电厂 2 号机组	20
2.2.3 福岛第一核电厂 3 号机组	21
2.2.4 福岛第一核电厂 4 号机组	21
2.2.5 福岛第一核电厂 5 号机组	21
2.2.6 福岛第一核电厂 6 号机组	21
2.2.7 共用乏燃料贮存水池	22
2.2.8 乏燃料干式贮存容器及贮存厂房	22
2.3 其他受灾害影响的核电厂	23
2.3.1 福岛第二核电厂	23
2.3.2 东海第二核电厂	23
2.3.3 女川核电厂	23
参考文献	23
第 3 章 “3·11”地震和海啸及其影响	24
3.1 地震和海啸的情况	24
3.2 地震和海啸对核电厂的影响	26
3.2.1 地震和海啸对福岛第一核电厂的影响	26

3.2.2	地震和海啸对福岛第二核电厂的影响	33
3.2.3	地震和海啸对女川核电厂的影响	37
3.2.4	地震和海啸对东海第二核电厂的影响	38
	参考文献	39
第4章	福岛核事故的发生和演变	40
4.1	福岛第一核电厂	41
4.1.1	1号机组事故序列	41
4.1.2	2号机组事故序列	45
4.1.3	3号机组事故序列	53
4.1.4	4号机组事故序列	59
4.1.5	福岛第一核电厂5、6号机组	62
4.1.6	乏燃料水池与干式贮存容器	66
4.1.7	福岛第一核电厂事故的事件树分析	68
4.2	福岛第二核电厂	70
4.3	东海第二核电厂	71
4.4	女川核电厂	71
	参考文献	72
第5章	日本的场外应急响应和环境监测	73
5.1	日本核应急准备和响应体系	73
5.2	福岛核事故的场外应急响应	74
5.2.1	概述	74
5.2.2	隐蔽和撤离	76
5.2.3	稳定碘预防	77
5.2.4	筛选和去污	79
5.3	福岛核事故的环境监测	79
5.3.1	概述	79
5.3.2	大气监测	82
5.3.3	土壤监测	95
5.3.4	水域监测	101
5.3.5	饮用水和食品监测	112
5.4	人员受照情况	115
5.4.1	放射性工作人员和其他相关人员的受照情况	115
5.4.2	周围地区居民受照情况	122
	参考文献	125
第6章	福岛核事故的放射性物质释放	127
6.1	放射性物质向大气的释放	127
6.2	福岛核事故分级	131
6.2.1	国际核与辐射事件分级(INES)	131

6.2.2	福岛核事故的定级	132
6.3.1	放射性污水的排放	134
6.3.2	放射性污水的泄漏	135
	参考文献	147
第 7 章	日本福岛核事故的后续处理	151
7.1	事故后的现场恢复	151
7.2	福岛核电厂 1~4 号机组的退役	164
7.2.1	概述	164
7.2.2	退役计划的实施	166
7.2.3	工作环境的改善	194
7.3	研发及人才培养	196
7.3.1	研发	196
7.3.2	推进 R&D 的基本理念	197
7.3.3	提高 R&D 的基础设施	197
7.3.4	来自中长期观点的人力资源发展和与大学、科研机构的合作	198
	参考文献	198
第 8 章	日本加强核安全的措施	199
8.1	紧急安全对策	199
8.2	压力测试	200
8.3	日本总结的初步经验教训	202
8.4	事故处理和应急响应方面的教训	206
8.4.1	事故处理和应急响应方面的问题	206
8.4.2	事故处理和应急响应方面的建议	211
8.5	提出的技术改进措施	217
8.6	日本采取的其他措施	218
	参考文献	221
第 9 章	国际社会针对福岛核事故的响应与对策	223
9.1	国际原子能机构	223
9.1.1	事故后的初期响应	223
9.1.2	经验教训总结及推荐行动	223
9.1.3	后续主要行动	226
9.1.4	对女川核电厂 SSC 的性能检查	234
9.1.5	对福岛第一核电厂 1~4 号机组退役路线图的审查	235
9.1.6	下一步的工作	236
9.2	其他国际组织	236
9.2.1	经合组织核能署(OECD/NEA)	236
9.2.2	西欧核监管协会(WENRA)	237
9.3	欧盟国家	237

9.3.1	欧洲压力测试	237
9.3.2	欧洲主要国家的响应与对策	240
9.4	美国	261
9.4.1	事故的初期响应	261
9.4.2	核电厂的安全检查	262
9.4.3	21世纪提高反应堆安全的建议	263
9.4.4	后续响应活动	264
9.5	中国	278
9.5.1	事故的初期响应	278
9.5.2	核安全综合大检查	281
9.5.3	对核电厂的改进要求和通用技术要求	285
9.5.4	核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标	289
9.5.5	核安全立法	290
9.5.6	“十二五”期间新建核电厂安全要求	290
9.6	其他国家	291
9.6.1	韩国	291
9.6.2	俄罗斯	292
9.6.3	加拿大	293
9.6.4	印度	294
9.6.5	巴基斯坦	295
9.6.6	阿拉伯联合酋长国(UAE)	295
9.6.7	南非	295
	参考文献	296

**第二部分 国际主要核电国家针对
福岛核事故采取的行动**

第10章	外部事件	301
10.1	主要核电国家采取的具体行动	301
10.1.1	美国	301
10.1.2	法国	302
10.1.3	英国	303
10.1.4	德国	303
10.1.5	芬兰	304
10.1.6	加拿大	304
10.1.7	西班牙	304
10.1.8	韩国	304

10.1.9	日本	305
10.1.10	俄罗斯	305
10.1.11	中国	305
10.2	各国改进行动的主要关注点	306
10.2.1	外部事件执照基准适当性的再评估	306
10.2.2	考虑外部事件的组合	306
10.2.3	抵御外部事件安全裕度的评估和陡边效应的研究	306
10.2.4	进行电厂现场巡检	307
10.2.5	开展超设计基准外部事件影响的研究	307
10.2.6	开展对改进措施的技术研究	307
10.2.7	防洪能力的改进	307
10.2.8	抗震能力的改进	308
10.2.9	对超设计基准外部事件缓解能力的改进	308
10.2.10	加强应对外部事件的准备	308
10.2.11	外部事件方面法规要求的变化	308
10.2.12	加强对外部事件的定期审查	308
10.2.13	其他	308
	参考文献	308
第 11 章	设计事项	310
11.1	主要核电国家采取的具体行动	310
11.1.1	美国	310
11.1.2	法国	311
11.1.3	英国	312
11.1.4	德国	314
11.1.5	芬兰	314
11.1.6	加拿大	314
11.1.7	西班牙	315
11.1.8	韩国	316
11.1.9	日本	319
11.1.10	俄罗斯	320
11.1.11	中国	320
11.2	各国改进行动的主要关注点	320
11.2.1	全厂断电	321
11.2.2	最终热阱	321
11.2.3	堆芯和乏燃料池冷却	321
11.2.4	安全壳的完整性	322
11.2.5	消防	322
11.2.6	通信	322

参考文献	322
第 12 章 严重事故管理与场内恢复	323
12.1 主要核电国家采取的具体行动	323
12.1.1 美国	323
12.1.2 法国	324
12.1.3 英国	325
12.1.4 德国	326
12.1.5 芬兰	326
12.1.6 加拿大	327
12.1.7 西班牙	327
12.1.8 韩国	329
12.1.9 日本	329
12.1.10 俄罗斯	330
12.1.11 中国	330
12.2 各国改进行动的主要关注点	331
12.2.1 改进规程、规则、导则等相关文件	331
12.2.2 分析事故管理措施的理论工作	331
12.2.3 需改进或新安装的移动或固定系统和部件	332
12.2.4 需改进或增设的厂房	332
12.2.5 多机组严重事故问题	332
12.2.6 乏燃料水池问题	333
12.2.7 人员和组织机构方面	333
参考文献	333
第 13 章 国家组织	334
13.1 主要核电国家采取的具体行动	334
13.1.1 美国	334
13.1.2 法国	334
13.1.3 英国	335
13.1.4 芬兰	335
13.1.5 韩国	335
13.1.6 日本	336
13.1.7 俄罗斯	337
13.1.8 中国	337
13.2 各国改进行动的主要关注点	338
13.2.1 加强核安全监管机构的独立性	338
13.2.2 加强核安全监管能力建设	338
13.2.3 加强跨组织间的沟通合作	339
13.2.4 改进应急准备和响应组织	339

参考文献	339
第 14 章 应急准备和响应及事故后管理	340
14.1 主要核电国家采取的具体行动	340
14.1.1 美国	340
14.1.2 法国	341
14.1.3 英国	342
14.1.4 德国	343
14.1.5 芬兰	343
14.1.6 加拿大	345
14.1.7 西班牙	346
14.1.8 韩国	346
14.1.9 日本	348
14.1.10 俄罗斯	348
14.1.11 中国	349
14.2 各国改进行动的主要关注点	350
14.2.1 场外应急计划区的划分	350
14.2.2 应急物资的储备	350
14.2.3 通信的保证	351
14.2.4 加强人员培训和核应急演练	351
14.2.5 超设计基准自然灾害和多堆共发事故的应对	351
14.2.6 建立快速反应部队	351
14.2.7 开发放射性传播及分布模型	351
14.2.8 事故后辐射监测	351
14.2.9 事故后的医疗保障	352
14.2.10 放射性废物的处理	352
14.2.11 核安全法规的修改	352
参考文献	352
第 15 章 国际合作	353
15.1 主要核电国家采取的具体行动	353
15.1.1 美国	353
15.1.2 法国	353
15.1.3 英国	354
15.1.4 德国	354
15.1.5 芬兰	355
15.1.6 加拿大	355
15.1.7 西班牙	356
15.1.8 韩国	356
15.1.9 日本	356

15.1.10 俄罗斯	357
15.1.11 中国	357
15.2 各国改进行动的主要关注点	359
15.2.1 国家层面国际合作	359
15.2.2 国家监管机构层面国际合作	359
15.2.3 执照持有者层面国际合作	359
参考文献	359

第三部分 福岛核事故的若干专题

第 16 章 关于 NRC 超设计基准外部事件缓解策略要求进行许可证修改命令的专题	363
16.1 背景	363
16.1.1 美国 NRC 对福岛核事故的经验反馈	363
16.1.2 NRC 发布监管要求	364
16.2 EA-12-049 命令对运行执照和建造许可的修改要求	365
16.2.1 对于超设计基准外部事件的缓解策略要求	365
16.2.2 关于命令执行的要求	366
16.3 NRC 及相关方针对命令实施开展的行动	367
16.3.1 灵活多样性缓解策略执行指导(NEI-12-06)	367
16.3.2 NRC 临时指导(ISG,JLD-ISG-2012-01)	368
16.4 NTTF 建议 4 和 7、EA-12-049 以及 SBO 法规要求的对比	371
16.5 美国核电厂对命令 EA-12-049 的响应	373
16.5.1 初始状态报告	373
16.5.2 六个月后的状态报告升版	374
16.5.3 整体综合计划	375
16.6 小结	377
参考文献	378
第 17 章 关于美国应对超设计基准外部事件 FLEX 策略的专题	379
17.1 背景	379
17.2 FLEX 策略实施指南概述	380
17.2.1 FLEX 策略实施指南的目的	380
17.2.2 FLEX 策略的目标和指导原则	380
17.2.3 FLEX 策略的主要内容	381
17.2.4 与其他第一层次建议间的关联	382
17.3 FLEX 策略的实施过程	382
17.3.1 步骤 1:基本应对能力的建立	384
17.3.2 步骤 2:确定适用的极端外部灾害	392

17.3.3	步骤3:厂址特定 FLEX 能力的确定	402
17.4	管理大纲	403
17.5	对 AP1000 设计的指导	407
17.6	小结	411
	参考文献	414
第 18 章	关于美国提高乏燃料水池仪表可靠性相关的许可证修改	
	命令的专题	415
18.1	背景	415
18.1.1	福岛第一核电厂 4 号机组乏燃料水池补水的应急响应	415
18.1.2	美国 NRC 对福岛核事故的经验反馈	415
18.1.3	NRC 发布第一批监管要求	416
18.2	NRC 的乏燃料水池可靠仪表许可证修改命令的要求	417
18.2.1	对在役核电厂以及建造许可证持有者的可靠乏燃料池液位监测 仪表的要求	417
18.2.2	联合执照持有者可靠的乏燃料池液位测量仪表的要求	418
18.2.3	关于命令执行的要求	419
18.3	NRC 及相关方针对 Order EA-12-051 开展的行动	420
18.3.1	NEI 12-02《实施 Order EA-12-051 的工业界导则》	420
18.3.2	临时员工指导 (ISG)	427
18.4	运行许可证持有者、CP 持有者、COL 持有者对于 Order EA-12-051 的响应	428
18.4.1	美国运行核电厂的响应行动	429
18.4.2	AP1000 联合执照持有者的响应行动	436
18.5	小结	438
	参考文献	439
第 19 章	关于西欧核安全监管协会发布的《新建核电厂设计安全规定》的	
	专题	440
19.1	引言	440
19.2	WENRA 对新建核电厂的安全目标	441
19.3	选取的关键安全要点	441
19.3.1	见解一:新建核电厂的纵深防御方法	442
19.3.2	见解二:纵深防御各安全层次的独立性	445
19.3.3	见解三:多重故障事件	447
19.3.4	见解四:缓解堆芯熔化和放射性后果的措施	450
19.3.5	见解五:实际消除	453
19.3.6	见解六:外部灾害	455
19.3.7	见解七:商用飞机恶意撞击	459
19.4	福岛核事故的经验教训	459
19.4.1	外部灾害	460