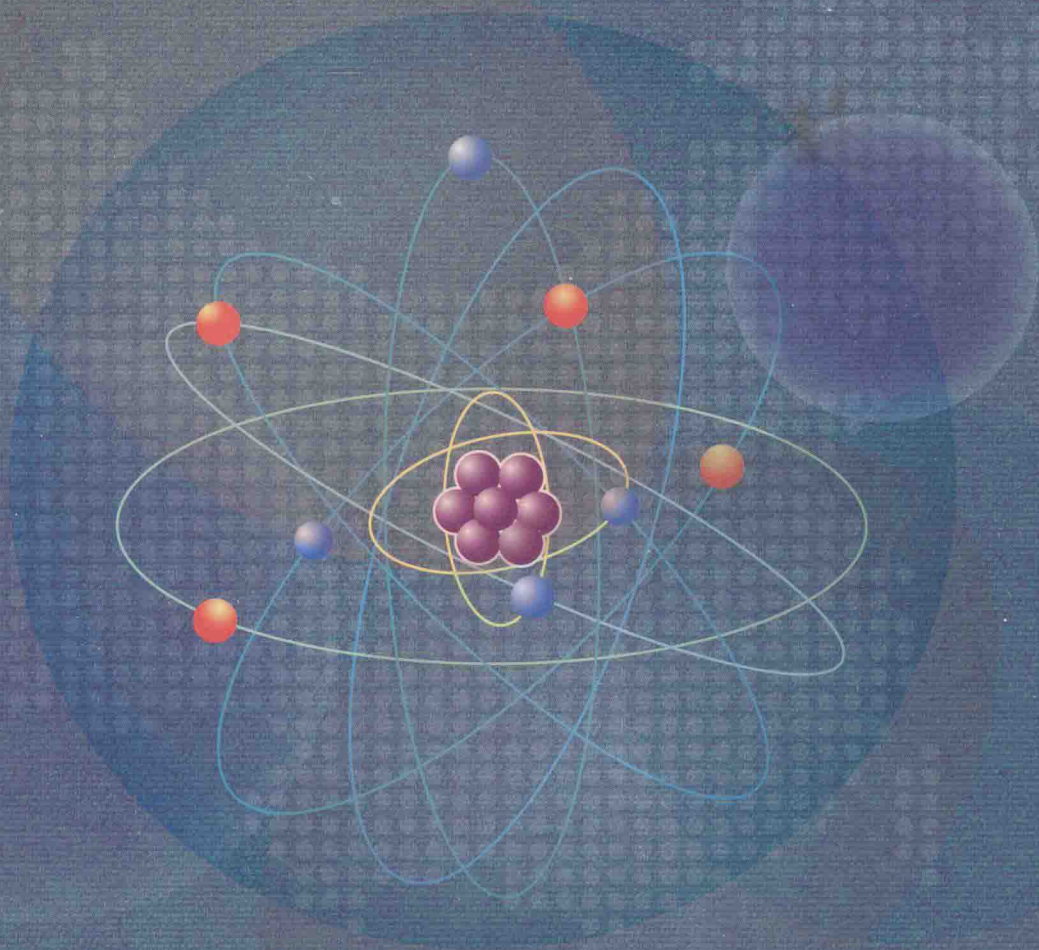


中国工程院“我国核能发展的再研究”项目组

我国核能发展的再研究



清华大学出版社

中国工程院“我国核能发展的再研究”项目组

我国核能发展的再研究

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是中国工程院“我国核能发展的再研究”重大咨询项目研究成果。

福岛核事故后,为及时总结经验和教训,中国工程院及时开设了“我国核能发展的再研究”咨询项目。项目组在已有研究成果的基础上,研究了福岛核事故出现的新问题和新形势,分析了对世界及我国核能发展的影响,得出世界核电发展趋势的基本判断。从保障我国能源可持续发展和能源安全的战略高度,对我国核电发展的安全性、必要性、支撑能力以及核安全保障体系建设进行了战略评估,定性提出了“战略必争、确保安全、稳步高效”的核电发展战略定位和指导方针,并且给出了我国核电近期、中长期的发展目标,最后提出了具体的保障措施建议。

本书适合政府、能源领域企业和研究机构中高层管理人员及研究人员、大专院校能源相关专业师生,以及其他对我国能源问题尤其是核能问题感兴趣的社会公众阅读和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

我国核能发展的再研究/中国工程院“我国核能发展的再研究”项目组.--北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-39408-2

I. ①我… II. ①中… III. ①核电工业—发展—研究—中国 IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031500 号

责任编辑:冯 昕

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:25

字 数:607 千字

版 次:2015 年 3 月第 1 版

印 次:2015 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:138.00 元

产品编号:062959-01

项目组主要成员名单

项目顾问：

钱正英	全国政协原副主席，中国工程院院士
徐匡迪	全国政协原副主席，中国工程院主席团名誉主席、院士
周 济	中国工程院院长、院士

项目组长：

杜祥琬	中国工程院原副院长、院士
-----	--------------

项目副组长：

潘自强	中国工程院院士，中国核工业集团公司
叶奇蓁	中国工程院院士，中国核工业集团公司
陈念念	中国工程院院士，核工业理化工程研究院
王大中	中国科学院院士，清华大学

主要成员：

万元熙	中国工程院院士，中科院等离子体物理研究所
方守贤	中国科学院院士，中科院高能物理所
王乃彦	中国科学院院士，中国原子能科学研究院
阮可强	中国工程院院士，中国核工业集团公司
严陆光	中国科学院院士，中国科学院电工研究所
宋家树	中国科学院院士，中国工程物理研究院
陆佑楣	中国工程院院士，中国长江三峡工程开发总公司
郑健超	中国工程院院士，中国广东核电集团公司
胡思得	中国工程院院士，中国工程物理研究院
柴之芳	中国科学院院士，中科院高能物理所
钱绍钧	中国工程院院士，总装备部
徐大懋	中国工程院院士，中国广东核电集团公司
徐 铎	中国工程院院士，中国原子能科学研究院
彭先觉	中国工程院院士，中国工程物理研究院
魏宝文	中国科学院院士，中科院近代物理所
何建坤	清华大学教授
祁恩兰	电力规划设计总院研究员
刘森林	中国原子能科学研究院研究员
吴宗鑫	清华大学教授
薛大知	清华大学教授

沈文权	国家核电技术公司研究员
辛殿华	核工业第四研究设计院研究员
周大地	国家发改委能源研究所研究员
郁祖盛	国家核电技术公司研究员
郑玉辉	中国核能行业协会研究员
赵成昆	中国核能行业协会副理事长、研究员
俞 军	环保部核安全司副司长
扈黎光	环保部核安全司处长
彭 旭	中国广东核电集团公司处长
殷德健	环保部核安全司处长
王振海	中国工程院一局副局长
苏 罡	中国核电工程有限公司研究员
陈 荣	中国核能行业协会研究员
薛 妍	核工业理化工程研究院研究员
童节娟	清华大学副研究员

“内陆核电厂及核能发展中的几个重要安全、环境问题” 分课题组成员名单

课题组组长：

潘自强 院士 中国核工业集团公司

课题组成员：

阮可强	院士	中国核工业集团公司
胡思得	院士	中国工程物理研究院
钱绍钧	院士	总装备部
孙玉发	院士	中国核动力研究设计院
于俊崇	院士	中国核动力研究设计院
徐 銖	院士	中国原子能科学研究院
钮新强	院士	长江水利委员会长江设计院
刘 华	核安全总工程师	环境保护部
周大地	研究员	国家发改委能源研究所
俞 军	副司长	环保部核安全司
邓 戈	研究员	国家核安保技术中心
王 俊	研究员	国家核电技术公司
刘森林	研究员	中国原子能科学研究院
叶国安	研究员	中国原子能科学研究院
杨华庭	研究员	中国辐射防护研究院
吴宜灿	研究员	中国科学院核能安全技术研究所
柴国旱	研究员	环保部核与辐射安全中心
王 驹	研究员	核工业北京地质研究院
扈黎光	处长	环保部核安全司
陈晓秋	研究员	环保部核与辐射安全中心
赵 博	研究员级高工	中国核电工程有限公司
刘卫东	研究员	核工业第五研究设计院
孙庆红	研究员	中国辐射防护研究院
周培德	研究员	中国原子能科学研究院
殷德健	处长	环保部核安全司
常向东	研究员	环保部核与辐射安全中心
刘新华	研究员	环保部核与辐射安全中心
张爱玲	高工	环保部核与辐射安全中心
徐志侠	研究员级高工	中国水利水电科学研究院

宋 刚	研究员级高工	中国科学院核能安全技术研究所
诸旭辉	研究员级高工	中国核工业集团公司
任丽霞	副研究员	中国原子能科学研究院
王长东	研究员级高工	中国核电工程有限公司
王旭宏	研究员级高工	中国核电工程有限公司
毛亚蔚	研究员级高工	中国核电工程有限公司
马如冰	工程师	中国核电工程有限公司
伍浩松	高工	中国核科技信息与经济研究院
郁祖盛	研究员	国家核电技术公司
周如明	研究员级高工	苏州热工研究院
上官志洪	研究员级高工	苏州热工研究院
张雅丽	处长	中国核工业集团公司

执 笔 人

摘 要	潘自强	
前 言	潘自强	
第 1 章	执笔：殷德健	审稿：刘 华 俞 军
第 2 章	执笔：扈黎光	审稿：陈晓秋
第 3 章	执笔：张爱玲	审稿：刘新华
第 4 章	执笔：赵 博	审稿：周如明
第 5 章	执笔：孙庆红	审稿：潘自强
第 6 章	执笔：周培德	审稿：徐 銖
第 7 章	执笔：刘卫东	审稿：邓 戈
协调人：	扈黎光	

“核电技术发展和展望”分课题组成员名单

课题组组长：

叶奇蓁 院士 中国核工业集团公司

课题组成员：

杜祥琬	院士	中国工程院
阮可强	院士	中国核工业集团公司
严陆光	院士	中国科学院电工研究所
王乃彦	院士	中国原子能科学研究院
徐大懋	院士	中国广东核电集团公司
徐 铄	院士	中国原子能科学研究院
赵成昆	副理事长	中国核能行业协会
周大地	研究员	国家发改委能源研究所
俞 军	副司长	环保部核安全司
柴国旱	研究员	环保部核与辐射安全中心
沈文权	研究员	国家核电技术公司
祁恩兰	研究员	电力规划设计总院
刘建桥	研究员	中国核工业集团公司
邢 继	研究员	中国核电工程有限公司
张 涛	研究员	中核核电运行管理有限公司
徐元辉	研究员	中核能源科技有限公司
王晓航	研究员	中国电力投资集团公司
徐洪杰	研究员	中国科学院上海应用物理研究所
周红波	研究员	中核能源科技有限公司
王长东	研究员	中国核电工程有限公司
赵 博	研究员	中国核电工程有限公司
苏 罡	研究员	中国核电工程有限公司
康晓文	助理研究员	国家发改委能源研究所

“我国核电发展支撑能力评估”分课题组成员名单

课题组组长：

陈念念	院士	核工业理化工程研究院
-----	----	------------

课题副组长：

郑健超	院士	中国广东核电集团公司
-----	----	------------

课题组成员：

钱绍钧	院士	总装备部
阮可强	院士	中国核工业集团公司
周大地	研究员	国家发改委能源研究所
郑玉辉	研究员	中国核能行业协会
郝东秦	研究员	国家核电技术公司
温鸿钧	研究员	中国核工业集团公司
丁晓明	研究员	中国核科技信息与经济研究院
张金带	研究员	中国核工业集团公司
辛殿华	研究员	核工业第四研究设计院
陈跃辉	研究员	中国核工业集团公司
顾忠茂	研究员	中国原子能科学研究院
齐占顺	研究员	中国核工业集团公司
隋永滨	研究员	中国机械工业联合会
左 民	研究员	中国核电工程公司
沈文权	研究员	国家核电技术公司
郑明光	研究员	上海核工程研究设计院
马 一	研究员	中国核电工程公司
诸旭辉	研究员	中国核工业集团公司
冯家举	研究员	中国核工业建设集团公司
陈少敏	教授	清华大学
郝 英	副教授	清华大学
彭 旭	处长	中国广东核电集团公司
陈 荣	研究员	中国核能行业协会
薛 妍	研究员	核工业理化工程研究院

“关于我国核电发展的战略建议”分课题组成员名单

课题组组长：

王大中	院士	清华大学
-----	----	------

课题组成员：

阮可强	院士	中国核工业集团公司
严陆光	院士	中国科学院电工研究所
彭先觉	院士	中国工程物理研究院
王乃彦	院士	中国原子能科学研究院
何建坤	研究员	清华大学
吴宗鑫	研究员	清华大学
汤 搏	研究员	环保部核安全司
赵成昆	研究员	中国核能行业协会
薛大知	研究员	清华大学
周大地	研究员	国家发改委能源研究所
林诚格	研究员	国家核电技术公司
王 俊	研究员	国家核电技术公司
郁祖盛	研究员	国家核电技术公司
徐玉明	研究员	中国核能行业协会
张 健	研究员	环境保护部核与辐射安全中心
扈黎光	处长	环保部核安全司
殷德健	处长	环保部核安全司
孙玉良	研究员	清华大学
童节娟	副研究员	清华大学
张立国	工程师	清华大学
房 超	副研究员	清华大学

FOREWORD

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,发生震惊世界的核事故。它和美国三哩岛核事故、苏联切尔诺贝利核事故一起,成为世界核能发展道路上影响深远的警示碑。

日本福岛核事故的发生重新引发了全球对核能安全利用的高度关注,并再次延缓了世界核电发展。例如国际原子能机构调整了对全球核电发展的预期,将2035年核电装机从原设想的6.5亿kW下调到4.7亿kW。福岛核事故也使得我国的核电建设陷入了暂时的停顿。中国是否要继续发展核电的争论,一时间不但成为新闻热点,实际上也对我国近期能源发展部署的决策产生了影响。

在我国核能发展的这个关键时期,中国工程院在前期已完成的我国核能发展战略研究的基础上,及时启动了“中国核能发展的再研究”重大咨询项目,其意义重大。

我国经济社会发展对能源的需求持续增长,面临国内资源环境制约日趋强化和应对全球气候变化减缓CO₂排放的双重挑战。核能对我国突破资源环境的瓶颈性制约、保障能源安全、减缓CO₂排放、实现绿色低碳发展具有不可替代的作用,是我国未来可持续能源体系中的重要支柱。与此同时,核电投资大,研发和建设周期长,风险特征也有其不容忽视的特殊性,因此核能的发展需要更为有序且稳定的长期战略部署和规划。而且,要实现我国从核电大国转型为核电强国,核电中长期发展尚有很多关键问题需要切实解决,如核安全水平的要求、核燃料资源的保障、厂址资源和布局、自主化能力、全产业链的协调配套发展等。

本咨询项目根据新的形势,对我国核电的安全性、核电发展的速度和规模、核电发展的支撑能力、我国核能的战略定位、核安全保障体系建设以及核能的长期可持续发展等问题,开展了深入研究和论证。项目下设4个专题研究组,20多位院士、百余名专家参加了项目的研究工作,并获得了相关领导、政府部门、企事业单位、科研机构等的大力支持。经过两年多的工作,项目组完成了项目综合报告和各专题研究报告,取得了一系列重要的研究成果。本书来自对各报告的整理与提炼,共包括:综合篇“我国核能发展的再研究项目综合概要报告”;第1篇“内陆核电厂及核能发展中的几个重要安全、环境问题”;第2篇“核电技术发展和展望”;第3篇“我国核电发展支撑能力评估”;第4篇

“关于我国核电发展的战略建议”。并以附录的形式,给出了钠冷快堆、高温气冷堆、熔盐堆、商用乏燃料后处理技术、核电厂放射性废物处置、自主研发的先进核电技术等专题技术的最新研究进展。

本书提出了以下主要的战略建议:

(1) 确立我国核电“战略必争、确保安全、稳步高效”的发展战略方针。

(2) 切实吸取“福岛”等事故的经验教训和各国有益经验,进一步提高核电的安全性。两年多来,我国已陆续出台了相关文件,安全法规、要求已是当前全球先进的安全标准,重在落实和执行。

(3) 我国核电只有逐步发展到相当规模才有战略意义,同时,又要把握好发展的节奏。建议国家在核电发展战略的指导下,制定核电可持续发展的中长期规划和政策。在对燃料可供性、经济性和技术进展进行科学评估的基础上,确定发展的规模和步骤。

(4) 建议在做好安全论证、环境评价和社会风险评价的基础上,稳步启动内陆核电站建设,几个内陆核电示范项目的启动条件已比较成熟。

(5) 高度重视我国核电全产业链各环节的协调、配套、统筹发展,包括乏燃料储存、处理和放射性废物的最终处置问题,须尽早研究、筹划、落实安排。

(6) 切实加强我国核电科学技术研究,统筹产、学、研的研发力量,使我国核电的基础性、前沿性和应用性科技水平,逐步提升到国际先进乃至领先水平。

(7) 深化改革,理顺我国核电管理体制和产业体制,使国家利益最大化。

(8) 转变核电发展方式,建立政府主导,公众、企业、专家共同参与项目酝酿、论证的工作程序,完善科学、民主、信息透明的决策程序。加强核电科学普及工作,积极与公众进行沟通,理性凝聚全社会对核电发展的共识,提升公众对核电的信心。

本研究项目组的院士、专家和参加咨询研究与编撰工作的全体人员,虽然做出了极大的努力,但由于各种原因,书中仍可能有疏漏或不妥之处,请读者批评指正。

作 者

2015年2月

CONTENTS

综合篇

我国核能发展的再研究项目综合概要报告

一、我国核能发展的战略定位和指导方针	3
二、当前我国核能发展急需解决的若干重要问题	5
三、我国核能可持续和长远发展的相关问题	9

专题篇

第 1 篇 内陆核电厂及核能发展中的几个重要安全、环境问题

摘要	17
第 1 章 福岛核事故的经验教训及滨海核电厂的安全性	20
1.1 福岛核事故的主要特征和国际社会的响应	21
1.1.1 福岛核事故的主要特征	22
1.1.2 福岛核事故的辐射照射水平和影响	22
1.1.3 国际社会对福岛核事故的响应	24
1.2 对我国核电安全现状的基本评价	28
1.2.1 我国运行和在建核电厂的安全改进	28
1.2.2 我国核电厂地震海啸安全性分析	29
1.2.3 我国核电厂防洪能力评估	35
1.2.4 我国现有核电厂安全性综合评估	36
1.2.5 安全改进的领域和措施	37
1.2.6 新建核电厂的安全要求	38

1.3	关于加强我国核能安全的建议	39
1.3.1	管理领域	39
1.3.2	技术领域	41
1.4	结论	42
第2章	内陆核电厂的安全及环境问题	44
2.1	总论	44
2.1.1	核电是我国能源战略的必然选择	44
2.1.2	我国核电发展的厂址资源	44
2.1.3	世界内陆核电发展概况	45
2.1.4	核电厂周围的人口分布	46
2.1.5	内陆核电厂的大气弥散因子	47
2.2	我国内陆核电厂所考虑的主要安全要素	48
2.2.1	核电厂自然灾害抵抗力分析	48
2.2.2	长江流域的气候水文特点	48
2.2.3	内陆核电所需要考虑的安全要素	49
2.3	内陆核电厂对洪水的抵抗力分析	50
2.3.1	核电厂防洪设计标准与三峡电站校核标准相当	50
2.3.2	核电厂的设计基准洪水位考虑了洪水和溃坝的叠加	51
2.3.3	规划中的三座内陆核电厂的厂址条件	51
2.4	内陆核电厂对干旱的抵抗力分析	53
2.4.1	干旱不构成对核电安全的冲击性威胁	53
2.4.2	内陆核电厂的用水安全有保障	53
2.5	内陆核电厂正常运行状态的环境影响是可接受的	54
2.6	事故工况下,内陆核电厂放射性污染是可控的	55
2.7	结论	55
第3章	内陆核电厂液态流出物的放射性近零排放	57
3.1	放射性废液管理的技术路线	57
3.2	液态流出物放射性近零排放的概念	58
3.2.1	零排放和近零排放	58
3.2.2	放射性近零排放	59
3.3	液态流出物放射性近零排放评估	59
3.3.1	液态流出物为解控排放,对居民产生的辐射剂量通常低于天然 水体中和非核工业排放水中放射性物质产生的辐射剂量	59
3.3.2	与普通工业放射性排放量的比较	60
3.3.3	液态流出物解控水平评估	61
3.3.4	近零排放定量指标评估	62
3.3.5	与长江水系本底水平比较	63

3.4	美国内陆核电厂液态流出物排放控制	64
3.4.1	排放管理规定和排放限值	64
3.4.2	内陆核电厂实际排放情况	65
3.5	液态流出物近零排放的措施	66
3.6	结论	68
第4章	严重事故工况下内陆核电厂放射性污染可控	69
4.1	核电厂发生严重事故的可能性很低	69
4.2	严重事故对环境和公众健康的影响	69
4.2.1	历史上三起严重事故的影响	69
4.2.2	核电厂的环境风险分析	70
4.2.3	内陆核电厂的环境影响评估	70
4.2.4	我国核电厂的严重事故环境影响分析 ——以彭泽核电厂为例	71
4.3	严重事故工况下的水资源保护	72
4.3.1	福岛核事故的放射性废水处理经验	72
4.3.2	严重事故工况下废水量的估算	72
4.3.3	严重事故工况下确保水资源安全的应急预案	73
第5章	关于中水平放射性固体废物的中等深度处置	75
5.1	放射性废物中等深度处置	75
5.1.1	放射性废物实施分类处置	75
5.1.2	我国放射性废物处置现状	76
5.1.3	放射性废物的中等深度处置	77
5.2	中放废物中等深度处置是国际发展趋势	78
5.2.1	中等深度处置对象	78
5.2.2	工程概念和主要进展	78
5.3	结论	83
5.3.1	我国存在较大量需要中等深度处置场处置的放射性废物	83
5.3.2	我国开展放射性废物中等深度处置具有很强的必要性	84
5.3.3	我国应加快中等深度处置工程的落实	85
第6章	利用快堆嬗变次锕系核素的战略研究	86
6.1	我国核能发展战略	86
6.2	具有分离-嬗变功能的燃料循环模式	87
6.3	我国嬗变策略研究	89
6.3.1	我国核能发展技术路线	89
6.3.2	快堆嬗变技术特点	90
6.3.3	快堆嬗变情景分析	91
6.4	快堆嬗变路线图	93

6.4.1	总体思路	93
6.4.2	“三步走”的路线图	93
6.5	结论	94
第 7 章	核安保发展及对策研究	96
7.1	引言	96
7.2	核安保情况概述	97
7.2.1	核安保概念	97
7.2.2	核安保组成及特征	97
7.3	国际核安保现状	99
7.3.1	国际社会和 IAEA 的核安保体系框架	99
7.3.2	美国核安保情况	100
7.3.3	其他国家核安保情况	101
7.4	我国核安保现状分析及与国际的对比分析	103
7.4.1	我国核安保现状分析	104
7.4.2	与国际核安保的对比分析	107
7.5	结论	109
第 2 篇 核电技术发展和展望		
摘要		113
第 8 章	我国核能发展的战略定位	116
8.1	发展核电产业是在新形势下保持和提高国家核战略地位及核能力的需要	116
8.2	进一步发展核电有助于我国能源安全	116
8.3	进一步发展核电产业有助于改善环境和应对气候变化	117
8.4	加强核能科技研究,不断创新,从核电大国进到核电强国	118
第 9 章	核电需在安全高效的方针下,实现规模化、批量化发展	120
9.1	安全标准	120
9.2	核电经济性	121
9.3	核电必须立足于自主发展	124
9.4	核电出口状态	124
第 10 章	内陆核电建设应该关注的问题和解决措施	125
10.1	内陆核电建设的必要性	125
10.2	核电站废水排放标准	125
第 11 章	实现核燃料的增殖和核能利用的循环经济	129
11.1	积极安排下一代和未来核电快中子增殖堆的科研开发	129
11.2	我国快堆发展的规划	129
11.3	压水堆-快堆匹配能为国家提供核电发展的情景	131

11.4 重视核燃料循环建设和核废物最终处置	133
第 12 章 乏燃料后处理及核废料处置问题	135
12.1 加快商用后处理厂的建设	135
12.2 高放废物的处置	135
第 13 章 开展核科技前沿研究,保持核科技上的领先地位	137
13.1 高温气冷堆技术路线图	137
13.2 熔盐堆技术路线图	138
13.3 ADS(加速器驱动的次临界反应堆)	139
13.4 超临界水堆	139
13.5 结论	139
第 14 章 我国核电产业下一步发展中需解决的问题	140

第 3 篇 我国核电发展支撑能力评估

摘要	145
第 15 章 支撑能力评估	148
15.1 铀资源支撑能力评估	148
15.2 核燃料循环支撑能力评估	152
15.3 核电研发设计支撑能力评估	155
15.4 核电设备制造支撑能力评估	158
15.5 核电工程建设支撑能力评估	161
15.6 人才支撑能力评估	163
第 16 章 经济性评估	167
16.1 国外核电经济性比较分析	167
16.1.1 国外核发电成本比较分析	168
16.1.2 国外三代核电工程造价分析	173
16.2 我国核电经济性比较分析	174
16.2.1 我国二代核电的经济性	175
16.2.2 三代核电的经济性问题	177
16.3 影响核电厂经济性的因素	177
16.4 主要结论	180

第 4 篇 关于我国核电发展的战略建议

摘要	185
第 17 章 我国核电发展战略及政策	187
17.1 “安全稳步规模发展核电战略”应作为基本战略观点坚定执行	187
17.2 我国核电顶层发展政策和安全政策的最新进展	192
17.3 国际核电发展动态	193