



# 新形势下中国核能安全利用的 中长期发展战略研究

核能安全利用的中长期发展战略研究编写组

 科学出版社

# 新形势下中国核能安全利用的 中长期发展战略研究

核能安全利用的中长期发展战略研究编写组

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书基于国家自然科学基金委员会和中国科学院联合学科战略研究项目,介绍了几代核反应堆的技术和发展现状,结合国际形势,分析与判断我国在世界范围核能安全利用领域的地位和影响。本书还根据核能安全中长期发展趋势,提炼了其中若干重大科学问题,结合国家需求,提出到2030年或更长时间内核能安全利用的发展战略建议。

本书可供核物理、核能以及相关领域的科研工作者学习参考、了解本学科前沿动态,也可以供相关科研管理者决策参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

新形势下中国核能安全利用的中长期发展战略研究/核能安全利用的中长期发展战略研究编写组编. —北京:科学出版社,2019.6  
ISBN 978-7-03-061282-3

I. ①新… II. ①核… III. ①核安全-发展战略-研究-中国  
IV. ①TL7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第098562号

---

责任编辑:钱俊 周涵 孔晓慧 / 责任校对:杨然  
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本:720×1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:492 000

定价:168.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# “新形势下我国核能安全利用的中长期发展 战略研究”课题主要成员名单

## 组 长

王乃彦 院 士 中国原子能科学研究院

## 成 员

詹文龙 院 士 中国科学院

王大中 院 士 清华大学

杜祥琬 院 士 中国工程物理研究院

张焕乔 院 士 中国原子能科学研究院

潘自强 院 士 中国核工业集团有限公司

阮可强 院 士 中国核工业集团有限公司

郑建超 院 士 中国广东核电集团有限公司

李冠兴 院 士 中国核工业集团有限公司

周邦新 院 士 上海大学材料研究所

叶奇蓁 院 士 中国核工业集团有限公司

徐 銖 院 士 中国原子能科学研究院

陈 达 院 士 南京航空航天大学

张作义 教 授 清华大学

徐瑚珊 研究员 中国科学院近代物理研究所

张东辉 研究员 中国原子能科学研究院

喻 宏 研究员 中国原子能科学研究院

## 项目秘书

任丽霞 研究员 中国原子能科学研究院

马新勇 主 任 中国科学院学部工作局

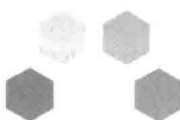
高洁雯 业务主管 中国科学院学部工作局

## 执 笔 人

- |        |     |     |     |     |     |     |  |  |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| 第 1 章  | 苏 昱 | 刘少帅 | 郭 晴 |     |     |     |  |  |
| 第 2 章  | 刘新建 | 杨 波 | 苏 昱 | 毛亚蔚 |     |     |  |  |
| 第 3 章  | 张 萌 | 苏 昱 | 周红波 | 郭 晴 |     |     |  |  |
| 第 4 章  | 苏 昱 | 马如冰 | 元一单 | 赵 博 | 霍小东 |     |  |  |
| 第 5 章  | 柴国早 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 6 章  | 喻 宏 | 胡 赟 |     |     |     |     |  |  |
| 第 7 章  | 顾忠茂 | 晏太红 | 胡 赟 | 郑卫芳 |     |     |  |  |
| 第 8 章  | 邓国清 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 9 章  | 王 健 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 10 章 | 吴宗鑫 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 11 章 | 宋丹戎 | 秦 忠 |     |     |     |     |  |  |
| 第 12 章 | 程 旭 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 13 章 | 徐瑚珊 | 骆 鹏 |     |     |     |     |  |  |
| 第 14 章 | 蔡翔舟 |     |     |     |     |     |  |  |
| 第 15 章 | 刘森林 | 李静晶 |     |     |     |     |  |  |
| 第 16 章 | 张生栋 | 王建晨 | 刘丽君 |     |     |     |  |  |
| 第 17 章 | 顾忠茂 | 王 驹 | 范 仲 | 罗上庚 | 张生栋 | 张振涛 |  |  |

## 审 稿 人

- |       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 第 一 篇 | 杜祥琬 | 叶奇蓁 |
| 第 二 篇 | 徐 銖 | 李冠兴 |
| 第 三 篇 | 赵志祥 | 张作义 |
| 第 四 篇 | 潘自强 | 张焕乔 |



# 序 言

---

日本福岛核事故后，我国核能发展面临着前所未有的外部形势：一方面，我国面临的大气环境压力和能源结构调整对大力发展规模化绿色低碳能源的需求，使得核能发展显然将会在绿色低碳能源结构中发挥重大作用，同时我国制造业向中高端发展也迫切需要核能行业的发展，可以说，我国的能源发展和经济发展战略需求正逐渐推动着核能利用向前发展，核能发展面临着新的历史机遇；另一方面，日本福岛核事故这一核电发展历史上的第三次严重事故，再一次引起了国际社会对于核电潜在风险的关注，国际上尤其是欧洲的一些国家取消或缩减了核电发展计划，国内外对核电发展提出了更新更高的安全要求，国内公众也提高了对核电站安全的关注度。可以说，核能的安全发展面临着新的挑战。

我国核电技术发展本身也出现了一些新的态势：第一，我国核电的主力堆型压水堆核电站装机容量已经达到 21.4 千兆瓦，预期 2020 年将达到 58 千兆瓦，保证压水堆核电站安全可靠运行将是我们面临的主要任务。第三代压水堆核电技术已经实现国产化，在“走出去”战略的指引下，我们将大力推进核电技术出口。第二，快堆核电技术获得重大突破。中国实验快堆已实现运行，标志着我国在核电技术方面已积累了进一步发展的技术、人才和经验。我国政府已批准建造示范快堆电站，为实现压水堆—快堆—聚变堆的三步走战略又向前迈出了实质性步伐。已规划商用后处理厂项目，并启动了中法合作，近期又将核燃料后处理示范工程纳入下一阶段工作重点，我国后处理产业发展正逐步驶入快车道。快堆及其闭式燃料循环的发展战略正在逐步实施。第三，聚变能研究取得进展。第四，其他先进堆型和核能前沿技术正在蓬勃发展。高温气冷堆核电站示范工程项目预计于 2019 年建成并网发电，高温气冷堆的发展对于我国的压水堆—快堆—聚变堆的三步走战略将起到重要的补充作用，在特殊地点、特殊应用下发挥特有的作用。针对我国核能技术的未来发展和应用，也对超临界水冷堆技术、熔盐堆技术以及 ADS 嬗变技术开展了前期技术研究。

基于我国能源安全、核安全发展以及环境安全的需要，新形势下我国核能安全利用的中长期发展战略应考虑：①加强我国核电主力堆型压水堆核电站的安全运行和安全监管，确保压水堆核电站的稳定安全运行，减小对环境的影响，做好

核安全的公众沟通；②进一步提升压水堆核电技术的更新换代和国产化，做大做强三代压水堆核电站技术；③加快第四代快堆技术及其闭式燃料循环技术的发展，实现三代压水堆技术向第四代快堆技术的平稳过渡，实现压水堆—快堆—闭式燃料循环技术的工业化验证；④作为核能技术利用的重要补充，稳固发展高温气冷堆的应用开发；⑤支持先进核能技术的发展，在压水堆—快堆—聚变堆的三步走战略下，进一步支持聚变能技术研究，以推动早期实现聚变能利用。跟踪和支持国际上较为先进的超临界水堆、ADS 嬗变系统以及熔盐堆等前沿核能技术的研究。

本书的出版是来源于中国科学院学部咨询评议工作委员会和国家自然科学基金委员会联合批准设立的“新形势下我国核能安全利用的中长期发展战略研究”咨询项目，要求从科学技术的角度，研究在保证安全的基础上，实现高效发展核电建设中的若干关键问题。主要研究内容涉及：①日本福岛核事故后，全球核电发展的态势，分析和判断我国在世界范围内核能安全利用领域中的地位和影响；②我国核电形势及未来发展；③实现 2020 年规划目标面临的挑战，其中包括技术路线的选择和国产化问题、核电站的合理布局和内陆核电站、核燃料和燃料循环问题及实行“走出去”战略中存在的问题；④我国核能发展的长远目标；⑤建议。

项目组由 26 位专家组成(其中 15 名院士)，专门设立了由工作在第一线的中青年专家组成的撰写组，项目组下设 17 个小组，在深入地研究讨论的基础上分别负责 17 章的撰写工作，所以实际参加研究讨论的专家超过百人，每章成文后，再由两位最熟悉该专业领域的院士专家进行函评，函评意见反馈给撰写人进行修改后才最后定稿。可以说本书是上百位专家经过两年多共同努力的劳动成果。虽然付出了巨大的努力，但也难免还存在一些疏漏和不妥之处，诚恳地希望读者给以批评指正。

王乃彦

2017 年 12 月



# 目 录

## 序言

## 第一篇 我国核电发展路线及安全形势

第 1 章 我国核电发展技术路线研究.....	3
1.1 核能发展技术路线.....	3
1.1.1 反应堆类型——堆型.....	4
1.1.2 核能发电机组类型——机型.....	5
1.1.3 小结.....	9
1.2 核电先进国家堆型与机型选择.....	9
1.2.1 各国核电技术路线发展历程分类.....	9
1.2.2 堆型与机型的选择.....	10
1.2.3 国际经验对我国堆型与机型选择的启示.....	14
1.3 我国核电技术路线的发展历程与经验教训.....	16
1.3.1 早期探索阶段确定了发展压水堆堆型.....	16
1.3.2 以自主开发和引进+国产化模式发展两种机型.....	17
1.3.3 自主开发“华龙一号”和 CAP1400 两种机型.....	18
1.4 研究结论.....	18
参考文献.....	19
第 2 章 我国核电站布局和内陆核电站研究.....	20
2.1 发展核电有利于减排改善环境，实现绿色低碳发展.....	20
2.2 内陆核电是否建设关系到核电发展长远布局.....	21
2.3 我国核电厂选址的基本情况.....	23
2.4 我国内陆核电建设论证成果.....	24
2.5 国际内陆核电建设情况.....	26
2.5.1 国外内陆在运核电机组.....	26

2.5.2	国外内陆在建核电机组.....	27
2.6	内陆核电建设特殊性.....	28
2.6.1	内陆核电实质是外部事故的成因不同.....	28
2.6.2	内陆核电实质是环境条件及容量不同.....	28
2.6.3	需要关注的方向.....	29
2.7	内陆推动要靠市场牵引、创新驱动.....	30
2.7.1	按照能源需求、环境容量及资源禀赋划分用户.....	30
2.7.2	建议湘鄂赣三省建设示范工程解决电力需求.....	30
2.7.3	建议内陆建设核能供热示范工程解决供热.....	30
2.7.4	因地制宜探索与可再生能源协调发展.....	33
	参考文献.....	33
<b>第3章</b>	<b>我国核电“走出去”研究.....</b>	<b>34</b>
3.1	国际核电市场态势分析.....	34
3.1.1	国际核电发展前景预测.....	34
3.1.2	国际核电市场竞争环境分析.....	37
3.1.3	世界主要核电国家开拓国际市场的做法和经验.....	39
3.2	我国核电“走出去”现状及面临的挑战.....	47
3.2.1	我国核电“走出去”现状.....	47
3.2.2	我国核电“走出去”已经具备的基本条件.....	48
3.2.3	我国核电“走出去”面临的挑战.....	51
3.3	核电“走出去”科技及产业发展方向.....	52
3.3.1	完善大型先进压水堆核电技术自主创新体系建设.....	52
3.3.2	提升核电装备制造自主水平,提供产业链的核电系统解决方案.....	56
3.3.3	配套核燃料循环技术与产能协调发展,创新模式共同走出去.....	57
3.3.4	提升安全监管和运行维修技术,保障全寿期服务能力建设.....	58
	参考文献.....	59
<b>第4章</b>	<b>我国压水堆技术发展路线研究.....</b>	<b>60</b>
4.1	世界压水堆核电发展现状及趋势.....	60
4.1.1	世界压水堆核电发展现状及预测.....	60
4.1.2	核电产业发展特点及趋势.....	61
4.2	我国压水堆核电发展现状.....	62

4.2.1	我国核电发展总体情况	62
4.2.2	我国核电发展各领域现状	62
4.3	我国压水堆核电技术发展原则探讨	67
4.3.1	安全是核电的生命线	67
4.3.2	经济性决定产业发展前景	68
4.3.3	核电产业发展应由国产化向自主化提升	68
4.3.4	探索核能一体化模式, 落实核安全责任	69
4.4	最新的 IAEA 设计法规明确发展趋势	69
4.4.1	新一代核电厂设计的安全要求	69
4.4.2	减缓场外应急, 提出相应的安全目标和措施	71
4.4.3	设计上实现“实际消除”的通用技术措施	73
4.5	“华龙一号”和 CAP1400 技术特点	76
4.5.1	“华龙一号”: 能动与非能动相结合的先进核电厂	76
4.5.2	CAP1400 的总体设计和技术创新	78
4.6	我国自主核电技术能够满足“设计上实现实际消除大规模释放”	79
4.6.1	“华龙一号”设计上实现“实际消除”的通用技术措施	79
4.6.2	CAP1400 设计上实现“实际消除”的通用技术措施	83
4.7	进一步提升安全性和经济性的关键技术方向	84
4.7.1	耐事故燃料元件(事故容错燃料元件)研发	84
4.7.2	严重事故机理及预防缓解措施研究	86
4.8	在役核电站运维技术研究	90
4.8.1	在役核电站运行和维修安全技术和管理研究	90
4.8.2	数字化核电站研究	90
4.8.3	先进的设备状态监测检修及评价技术	91
	参考文献	92
<b>第 5 章</b>	<b>核能安全利用</b>	<b>94</b>
5.1	福岛核事故后全球核电发展态势	94
5.1.1	核电发展史上历次严重事故及其启示	94
5.1.2	福岛核事故后各国核电计划发展变化和态势	102
5.1.3	福岛核事故后全球核电安全发展变化和态势	107
5.1.4	福岛核事故后我国核电安全发展变化和态势	109
5.1.5	福岛核事故后我国核电发展面临的新形势	112

5.1.6	小结	115
5.2	我国核电形势及未来发展	115
5.2.1	核电发展的安全问题和安全要求	115
5.2.2	理性认知核安全	118
5.2.3	核电安全是发展中的安全	118
5.2.4	四位一体,改善核电的公众接受性	119
5.3	实现 2020 年规划目标面临的挑战	119
5.3.1	实际消除大规模放射性释放的问题	119
5.3.2	正常运行的近零排放问题	121
	参考文献	127

## 第二篇 快堆及其闭式燃料循环

第 6 章	我国快堆发展情况	131
6.1	快堆发展情况介绍	131
6.1.1	国际发展情况	131
6.1.2	我国快堆发展概况	134
6.1.3	发展趋势分析	138
6.1.4	我国快堆发展差距和亟待解决的问题	139
6.2	我国快堆发展思路与目标	141
6.2.1	发展思路	141
6.2.2	发展目标	141
6.3	我国快堆发展方向与重大行动计划	142
6.4	措施建议	143
第 7 章	我国快堆闭式核燃料循环技术	144
7.1	核燃料循环的两种方式——一次通过和闭式循环	144
7.1.1	核燃料循环概念	144
7.1.2	核燃料一次通过循环与闭式循环方式的比较	144
7.2	热堆与快堆闭式核燃料循环初步分析	149
7.2.1	热堆核燃料循环方式的特点	149
7.2.2	快堆闭式核燃料循环的特点	150
7.3	国内外核燃料循环后段技术发展现状与趋势分析	152
7.3.1	国际上核燃料循环后段技术发展现状与趋势分析	152

7.3.2	我国核燃料循环后段技术现状	160
7.4	我国快堆核燃料循环技术发展战略初步构想	164
7.4.1	我国核裂变能发展前景	164
7.4.2	我国核燃料循环方案考虑及技术发展路线图设想	164
7.5	我国快堆核燃料循环中的关键技术问题	168
7.5.1	乏燃料后处理技术研究	168
7.5.2	快堆燃料制造技术研究	169
7.5.3	高效废物处理技术研究	171
7.6	我国快堆乏燃料后处理技术方案建议	172
7.6.1	快堆 MOX 乏燃料水法后处理方案	172
7.6.2	快堆金属乏燃料干法后处理方案	175
7.7	政策建议	176
<b>第 8 章</b>	<b>动力堆乏燃料后处理工程技术</b>	<b>178</b>
8.1	动力堆乏燃料后处理概述	178
8.1.1	核燃料后处理的任务及意义	178
8.1.2	核燃料后处理主要过程及特点	180
8.1.3	动力堆核燃料后处理厂须重点关注的问题	183
8.2	核燃料后处理产业发展现状与形势分析	186
8.2.1	国外后处理产业发展现状	186
8.2.2	我国后处理产业发展现状及趋势	186
8.3	后处理厂关键工程技术现状及发展情况	188
8.3.1	后处理关键工艺设备	188
8.3.2	后处理核与辐射安全技术	196
8.3.3	过程监测和控制技术	198
8.3.4	后处理工艺分析测试技术	199
8.3.5	后处理厂三废管理	201
8.4	后处理产业发展重点案例	205
8.4.1	法国后处理产业发展概述	205
8.4.2	乏燃料连续溶解器研发案例	207
8.4.3	玻璃固化研发案例	208
8.5	存在的问题及建议	209

第 9 章 核燃料后处理厂的建造、调试和运行	213
9.1 引言	213
9.2 后处理厂的建造	214
9.3 后处理厂的调试	214
9.3.1 调试目的	214
9.3.2 调试的基本原则	215
9.3.3 调试文件和调试质量的监督与控制	216
9.3.4 调试阶段的划分	216
9.3.5 调试主要内容	217
9.4 后处理厂的运行	221
9.5 我国后处理中试厂概况	222
9.6 本章小结	223

### 第三篇 新型反应堆技术

第 10 章 高温气冷堆	227
10.1 高温气冷堆型特点	227
10.2 模块式高温气冷堆具有良好的安全特性	229
10.3 模块式高温气冷堆的潜在应用领域	230
10.3.1 发电	230
10.3.2 工艺热/热电联供	230
10.3.3 制氢	231
10.4 我国高温气冷堆技术研发进展	233
10.5 我国高温气冷堆未来的发展	234
10.6 本章小结	236
第 11 章 小型模块化反应堆	237
11.1 发展现状	237
11.1.1 国际发展现状	237
11.1.2 国内发展现状	241
11.2 技术特点	244
11.3 安全特点及问题	245
11.4 应用	245
11.5 未来发展情景	245

11.5.1	老旧小火电机组替代	245
11.5.2	工业工艺供热	246
11.5.3	核能海水淡化	246
11.5.4	核能城市区域供热	247
11.5.5	中小电网供电	247
11.5.6	岛礁及军事基地热电水保障	248
<b>第 12 章</b>	<b>超临界水冷堆</b>	<b>249</b>
12.1	超临界水冷堆的特点和挑战性	249
12.1.1	超临界水冷堆的特点	249
12.1.2	超临界水冷堆的挑战性	251
12.2	超临界水冷堆的研发现状	252
12.2.1	国际现状	252
12.2.2	系统与堆芯	252
12.2.3	国内现状	255
12.3	超临界水冷堆实现工程化的挑战性	261
12.3.1	堆芯与组件设计	261
12.3.2	安全系统	262
12.3.3	材料	262
12.3.4	热工水力及安全相关实验技术	262
12.3.5	设计工具的开发和验证	263
12.4	未来的建议	263
12.4.1	关键技术	263
12.4.2	实验堆	263
12.4.3	国内的协调、集中优势、重点攻关	263
12.4.4	联合国际伙伴	264
<b>第 13 章</b>	<b>加速器驱动次临界系统</b>	<b>265</b>
13.1	核能发展的关键问题	265
13.1.1	我国核能的发展趋势	265
13.1.2	核燃料循环模式	266
13.2	加速器驱动次临界系统 (ADS)	267
13.2.1	ADS 概念的发展	267
13.2.2	ADS 的构成与原理	268

13.2.3	ADS 技术挑战.....	268
13.3	ADS 的发展现状及趋势.....	269
13.3.1	国外的发展及趋势.....	269
13.3.2	我国的研究基础.....	270
13.3.3	我国 ADS 发展路线.....	271
13.4	ADS 研究进展及未来规划.....	272
13.4.1	ADS 研究进展.....	272
13.4.2	ADS 未来规划与展望.....	273
<b>第 14 章</b>	<b>熔盐堆.....</b>	<b>275</b>
14.1	熔盐堆和钍基核能.....	275
14.2	熔盐堆的起源和发展现状.....	277
14.3	熔盐堆原理与技术特点.....	280
14.4	中国 TMSR 发展战略和进展.....	284
14.5	展望.....	286
<b>第四篇 放射性废物管理</b>		
<b>第 15 章</b>	<b>法规标准与安全评价.....</b>	<b>291</b>
15.1	法规标准.....	291
15.1.1	法规.....	291
15.1.2	标准.....	293
15.2	安全评价.....	295
15.2.1	我国放射性废物管理安全评价的要求.....	295
15.2.2	IAEA 对于处置设施安全评价的要求.....	296
15.3	安全全过程系统分析.....	305
15.3.1	安全全过程系统分析的概念和作用.....	305
15.3.2	国外开展安全全过程系统分析的情况.....	306
15.3.3	我国放射性废物处置安全评价与 IAEA 安全全过程系统 分析要求的差距.....	309
15.4	政策建议.....	311
15.4.1	完善我国放射性废物管理法规标准的建议.....	311
15.4.2	开展放射性废物处置安全全过程系统分析的建议.....	312
	参考文献.....	313

第 16 章 放射性废物的处理与整备	315
16.1 引言	315
16.2 高放废液的来源、组成特点和处理方法	316
16.3 高放废液的分离	318
16.3.1 高放废液的分离要求	318
16.3.2 国内外高放废液分离技术研究现状	321
16.3.3 我国高放废液分离技术研究和发 展建议	327
16.4 高放废液玻璃固化	328
16.4.1 高放废液玻璃固化处理的重要性	328
16.4.2 玻璃固化技术国内外发展现状	329
16.4.3 我国高放废液玻璃固化处理的需求	336
16.4.4 我国玻璃固化技术今后发展趋势	338
16.4.5 我国玻璃固化技术的今后主要研究内容	339
16.4.6 高放废液玻璃固化技术研发存在的问题和政策建议	343
参考文献	345
第 17 章 放射性废物处置	348
17.1 引言	348
17.2 我国放射性废物处置的需求分析	349
17.2.1 我国核电站低、中放废物量预测	349
17.2.2 我国核燃料循环放射性废物处置的需求分析	351
17.3 国外放射性废物处置发展状况	353
17.3.1 国外低、中放废物处置现状	353
17.3.2 国外高放废物(乏燃料、超铀废物)处置的开发研究	360
17.4 国内放射性废物处置开展状况	366
17.4.1 国内低、中放废物处置	366
17.4.2 国内高放废物处置技术开发状况	367
17.5 存在问题与建议方案	368
17.5.1 低、中放废物的处置	368
17.5.2 高放废物(包括乏燃料和 $\alpha$ 废物)的处置	371
参考文献	372

## 第一篇

# 我国核电发展路线及安全形势

### 1.1 核电发展路线

核电作为一种清洁能源，在世界范围内得到了广泛的发展。我国核电发展路线是在国家能源发展战略的指导下，结合我国国情和核电技术特点，制定出的。我国核电发展路线的主要特点是：坚持自主创新，走具有中国特色的核电发展道路；坚持安全第一，确保核电安全稳定运行；坚持可持续发展，实现核电与经济社会协调发展。

我国核电发展路线的制定，是在充分考虑了我国能源需求、技术水平和安全形势的基础上，经过科学论证和广泛征求意见后形成的。我国核电发展路线的制定，体现了国家对核电发展的重视和支持，也为我国核电事业的健康发展提供了有力的政策保障。