

核电安全与技术丛书



中国核电 经济性研究

郝东秦 汤紫德 朱清源 主编

上海科学技术出版社

核电安全与技术丛书

中国核电经济性研究

郝东秦

汤紫德 主编

朱清源

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书遵循我国“在安全的基础上高效发展核电”的方针，通过全面研究国内外核电造价现状和趋势、核电成本、上网电价机制以及我国第三代核电经济性，探讨核电在我国建设安全高效、清洁低碳能源体系中的重要地位。同时联系实际，重点介绍了当今世界主要国家核电经济性现状及其电价机制，有益于合理控制项目投资、降低工程造价、减少发电成本、维护核电安全高效发展，为科学认识核电经济性提供支撑和依据。本书可供核电相关企事业单位人员、技术人员、高校和科研机构研究人员以及对核电感兴趣的读者阅读。

图书在版编目（C I P）数据

中国核电经济性研究 / 郝东秦，汤紫德，朱清源主
编. — 上海：上海科学技术出版社，2021.4
（核电安全与技术）
ISBN 978-7-5478-5282-8

I. ①中… II. ①郝… ②汤… ③朱… III. ①核电工
业—工业经济—研究—中国 IV. ①F426.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第065791号

中国核电经济性研究

郝东秦 汤紫德 朱清源 主编

丛书顾问：林诚格 郁祖盛

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 7.5

字数 103千字

2021年4月第1版 2021年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5282-8/F·27

定价：78.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题，请向工厂联系调换

前言 | Foreword

为了解决化石能源大量使用带来的环境、生态和气候变化等一系列问题，世界各国正在加快推动能源转型发展，形成新一轮能源革命大潮。全球发达经济体、新兴国家乃至一些发展中小国都在大力发展清洁能源，去碳化、分布式、数字化成为能源发展的普遍趋势。福岛核事故后，世界核电仍将继续发展的大趋势没有改变，核电仍是三大主力电源的性质没有改变。当前，全球核电正处于福岛核事故后的缓慢复苏和调整阶段。技术由二代全面向三代技术跨越，四代堆、空间堆、新材料研发成为新的技术制高点；功能和应用更加多元化，小堆开发与多功能应用、海洋核动力平台的研发和应用越来越受到关注，供热、供汽、制氢等新的用能方式不断出现；发展重心由西方发达国家向以中国为代表的新兴经济体转移，德国、意大利等少数国家已宣布放弃核电，法国下调国内核电占比，美国国内真正建设开工核电的意愿不强，俄罗斯继续壮大核能产业，积极推动核电技术出口，印度、土耳其、南非、沙特阿拉伯、巴西、阿根廷等地区强国发展核能意愿十分强烈，阿拉伯联合酋长国、白俄罗斯、孟加拉国已经开始建设国内首座核电站。

我国能源体系在供给侧结构性改革及能源“四个革命、一个合作”推动下，朝着更加清洁低碳、安全高效方向发展。根据应对气候变化协定，到2030年，我国非化石能源占比要占一次能源消费的20%以上。核能作为可大规模替代煤电的清洁低碳、安全高效能源，是大国强国技术，其能源特性和战略属性决定了核能将在我国能源转型中发挥重要作

用，发展核电既有广阔的市场空间，也是现实需要。需要引起重视的是，福岛核事故引发了全球对核电安全的进一步思考，推动了核电安全标准和技术水平进一步提高，同时也推高了核电的造价，三代核电技术由于安全投入大、装备研发成本高，较二代核电技术成本显著上升。近年来风电、光伏等新能源发展速度和规模远高于核电，随着发电成本大幅下降，正在挤压核电发展的空间。核电的经济性已成为制约其发展的重要因素。

出于安全高效发展核电的目标，参与和关心核电技术经济性研究的工作人员越来越多，但系统介绍本学科的专业书籍市场鲜见，有必要借本书出版开辟业内沟通渠道，扩大交流平台。同时，也有利于广大关心核电技术经济性的读者理顺思路，同心协力促进我国核电健康有序发展。鉴于此，本书围绕核电经济性，系统地梳理了核电技术经济相关问题，以参考价值强、内容新为依托，重点分析了当今世界主要国家核电经济性现状及其电价机制、我国核电的经济性和上网电价形成机制，并联系实际，遵循我国“在安全的基础上高效发展核电”方针，针对具体项目开展核电经济性研究和实测分析，事例清晰、数据详实，对合理控制项目投资、降低工程造价、减少发电成本、维护核电安全高效发展十分有益。本书最后分析了我国核电发展面临的机遇和挑战，通过总结国外发展经验，为促进核电发展提供建议。此外，随着我国社会与经济发展进入新常态，在国内新一轮电力体制改革期间，由于缺乏对核电技术经济性的深入了解，出现了一些对核电的质疑，结合核电经济性相关问题研究，本书作者也给出一些自己的看法。

我们衷心希望能够通过本书为我国核电的发展提供一些有益的参考和借鉴，更希望广大读者就核电的经济性进行广泛的讨论，为我国核电发展贡献一份力量。

目录 | Contents

第 1 章	全球核电发展现状与特征	1
1.1	全球核电装机规模及发电量	2
1.1.1	装机规模及发电量	2
1.1.2	各国核电装机规模及发电量	3
1.2	全球核电机组运行状态分析	5
1.2.1	在建核电机组数量及规模	5
1.2.2	在运核电机组数量及规模	7
1.2.3	永久关闭核电机组数量及规模	8
1.3	全球核电机组调峰运行现状	9
1.3.1	机组能力因子	10
1.3.2	能量可利用因子	10
1.3.3	负荷因子	11
1.3.4	非计划能量损失	13
1.3.5	参与调峰情况	13
第 2 章	核电经济性概况	20
2.1	核电的特征	21
2.1.1	稳定可持续	21
2.1.2	清洁低碳	22
2.1.3	安全高效	22

2.2	核电的经济性效益	23
2.2.1	环境效益	23
2.2.2	社会效益	25
第3章	核电经济性分析	30
3.1	主要核电国家的核电经济性	31
3.1.1	核电工程投资造价研究	31
3.1.2	核电发电成本研究	35
3.2	我国核电经济性	41
3.2.1	我国核电安全性与经济性提升情况	41
3.2.2	影响核电经济性的主要因素	42
3.2.3	核电进出口经济性研究	50
第4章	核电上网电价形成机制研究	53
4.1	核电电价形成机制演进历程	54
4.1.1	电价机制改革	54
4.1.2	核电电价形成机制	55
4.1.3	核电电价机制形成趋势	57
4.2	核电机组电价实测与分析	57
4.2.1	核电电价实测的原则、方法与参数	57
4.2.2	实测结果与规律	60
4.3	我国核电上网电价机制研究与建议	61
4.3.1	电价机制研究原则	61
4.3.2	核电发达国家电价机制与启示	63
4.3.3	我国核电运营电价实况与经验	66
4.3.4	推荐核电标杆电价方案	70

第5章	核电经济发展面临的机遇与挑战.....	74
5.1	机遇.....	75
5.1.1	发展核电对我国和全球能源转型意义重大.....	75
5.1.2	风电、光伏发展无法挑战核电的基荷电源优势	76
5.1.3	与其他清洁电力相比，核电保持着较强的经济竞争力.....	78
5.1.4	从发电到供暖、制氢，新应用场景创造核能发展新空间.....	79
5.1.5	核电建设有效带动产业结构升级和地区经济发展	81
5.2	挑战.....	82
5.2.1	新建核电成本逐年上升，原有经济性优势逐渐削弱.....	82
5.2.2	乏燃料处理技术及产业化发展缓慢.....	84
5.2.3	政策摇摆不定，开工规模大起大落，不利于核电稳定发展.....	84
5.2.4	安全性担忧制约核电发展，“邻避效应”成为难题.....	85
5.2.5	地缘政治因素影响核电技术推广、创新及应用进程.....	86
第6章	国外支持核电发展的政策及经验.....	87
6.1	美国.....	88
6.2	英国.....	89
6.3	俄罗斯	89
6.4	启示与思考	90
第7章	弘扬核电技术经济优越性专题篇.....	92
7.1	核电站事故不能与原子弹相比较.....	93
7.1.1	比较核电站事故与原子弹要从实际出发.....	93
7.1.2	核电站事故与原子弹爆炸有天壤之别	94
7.1.3	鉴别核电站事故与原子弹爆炸差异的主要数据.....	95
7.1.4	250倍的来历与解读.....	96

7.2 我国已投产核电为何都建在沿海	98
7.2.1 主要原因.....	98
7.2.2 沿海建设核电的有利因素	99
7.2.3 偏离负荷中心建设核电站，长距离送电的不利因素.....	101
7.2.4 内陆地区建设核电条件已经成熟，启动内陆核电 指日可待.....	102
7.3 核电调峰对安全性和经济性的影响	104
7.3.1 关于核电调峰.....	104
7.3.2 核电火电增减发电量比较	105
7.3.3 调峰对核电的影响	106
7.3.4 国外核电参与调峰情况	106
7.3.5 结语	106
主要参考文献.....	109
索引.....	110

第1章

全球核电发展现状与特征

福岛核事故引发了全球对核电安全的进一步思考，部分国家核电发展信心受挫，各国对全球核电发展走势判断差异较大。德国、意大利等国家已宣布放弃核电，法国也表示逐年下调国内核电占比，而印度、土耳其、南非等国家发展核电意愿仍然强烈，但受制于国内政治稳定度和经济承受力。随着能源转型的不可逆，核能作为清洁低碳能源符合低碳发展方向，核能仍将是未来能源体系的重要组成部分，但是发展速度将放缓。

1.1 全球核电装机规模及发电量

1.1.1 装机规模及发电量

自1951年人类首次利用核能发电、1954年第一座核电站并网至今，核电发展已有60多年的历史，大致可划分为验证示范阶段（约1950—1970年）、高速发展阶段（约1970—1990年）、滞缓发展阶段（约1990—2010年）和发展复苏阶段（约2010年至今）。1990年后，全球核电装机规模相对稳定，具体如图1-1所示。

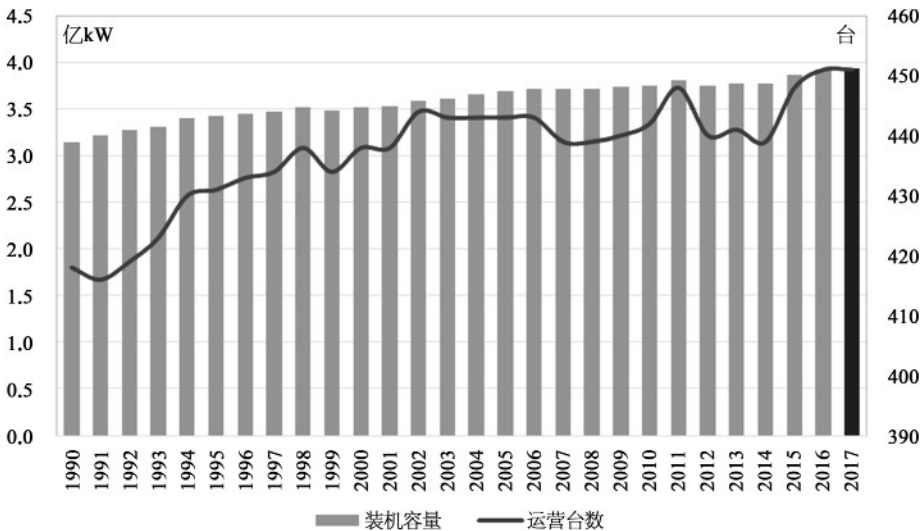


图1-1 全球核电装机规模变化趋势（1990—2017年）

从图1-1可以看出，1990—2017年期间，全球核电运营机组数量不断攀升，运营机组容量不断扩大，2017年机组数量和装机规模均为历史最高值。2017年核电机组运营数量为451台，装机规模达到3.94亿kW。1990—2017年全球核电发电量及其在全球发电结构中所占比例如图1-2所示。

如图1-2所示，20世纪90年代以来，全球核电发电量稳步增长，发电量峰值出现在2006年，当年全球核电发电总量达到2.66万亿kWh；

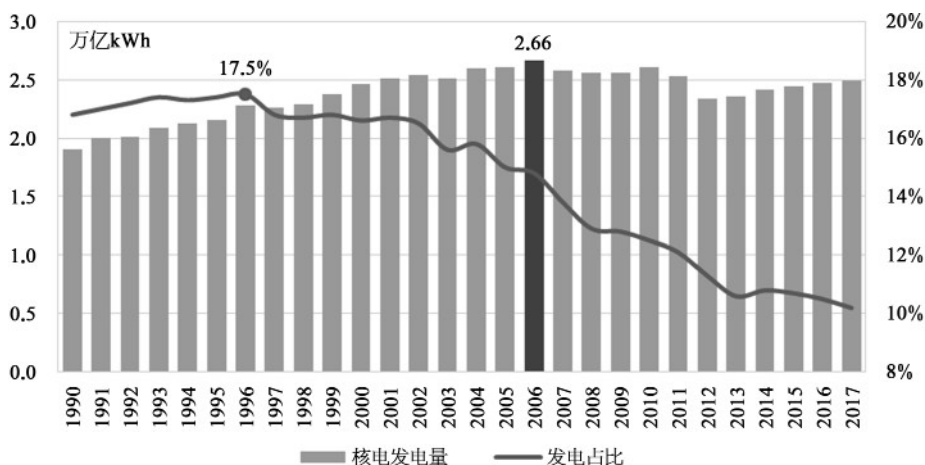


图 1-2 1990—2017 年全球核电发电量及占比

[数据来源：国际原子能机构（IAEA），英国石油公司（BP Amoco）]

但受 2011 年日本福岛核电站核泄漏事件影响，2012 年全球核电发电量下降约 2 000 亿 kWh，2012—2017 年全球核电发电量不断回暖，其主要贡献多来自发展中国家核电发展提速。从全球核电发电占比来看，受页岩气革命、可再生能源发展等多方面因素影响，全球核电发电占比不断下降，发电占比峰值出现在 1996 年，达到 17.5%，2017 年全球核电发电占比为 10% 左右。

1.1.2 各国核电装机规模及发电量

从各国在运核电反应堆累计装机容量来看，美国核电总装机容量最大，为 9 995.2 万 kW；法国、日本、中国、俄罗斯分列其后，核电累计装机容量分别为 6 313 万 kW、3 975 万 kW、3 451 万 kW 和 2 826 万 kW；排名靠后国家核电累计装机容量未超过千万千瓦级，如图 1-3 所示。

从 2017 年各国核电发电量来看，排名前 5 的国家分别为美国、法国、中国、俄罗斯和韩国，核电发电量分别为 8 056 亿 kWh、3 818 亿 kWh、2 328 亿 kWh、1 901 亿 kWh 和 1 413 亿 kWh，其他国家核电发电量如图 1-4 所示。

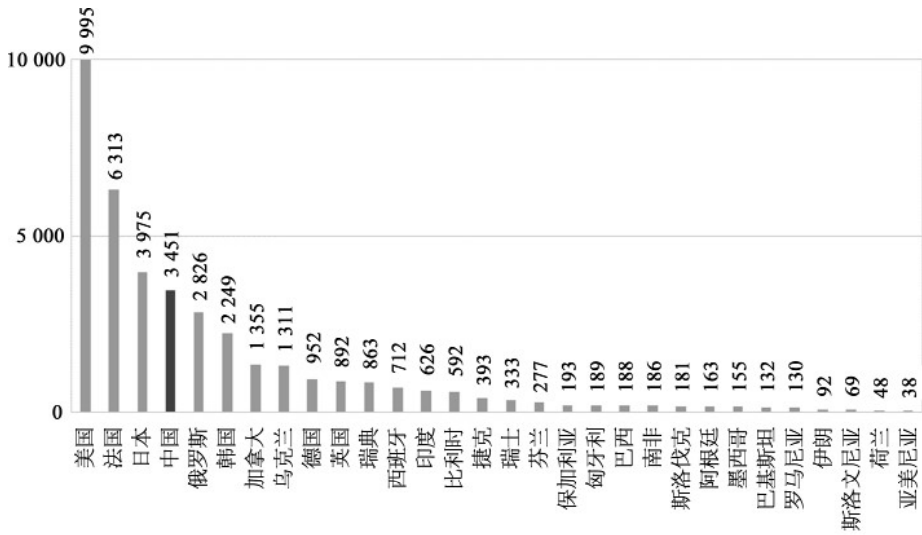


图 1-3 各国核电累计装机容量/万 kW

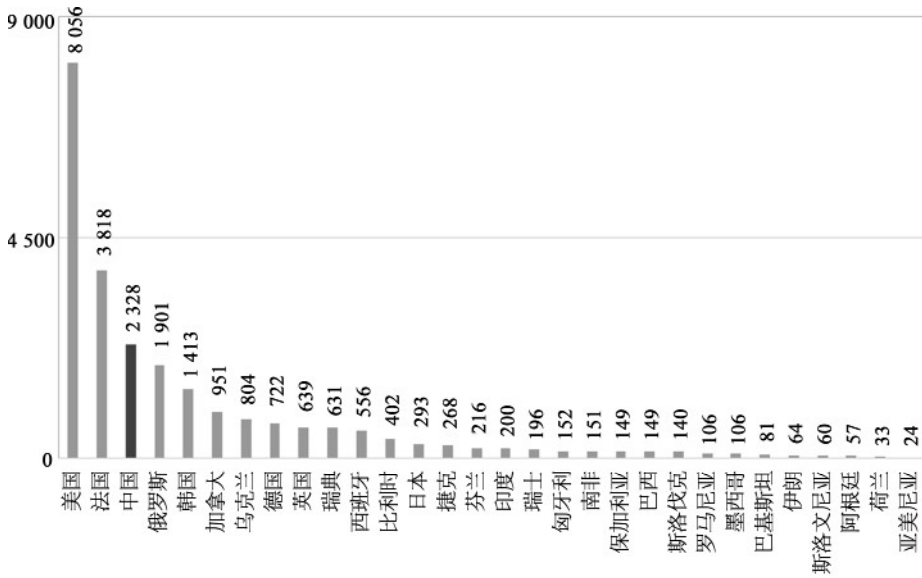


图 1-4 2017 年各国核电发电量/亿 kWh

2017 年各国核电发电量在电力结构中的占比如图 1-5 所示，法国核电发电量占比最高，约为 72%；乌克兰、斯洛伐克、匈牙利、比利时核电发电量占比均超过 50%；中国核电发电量仅占总发电量的 3.94%，处

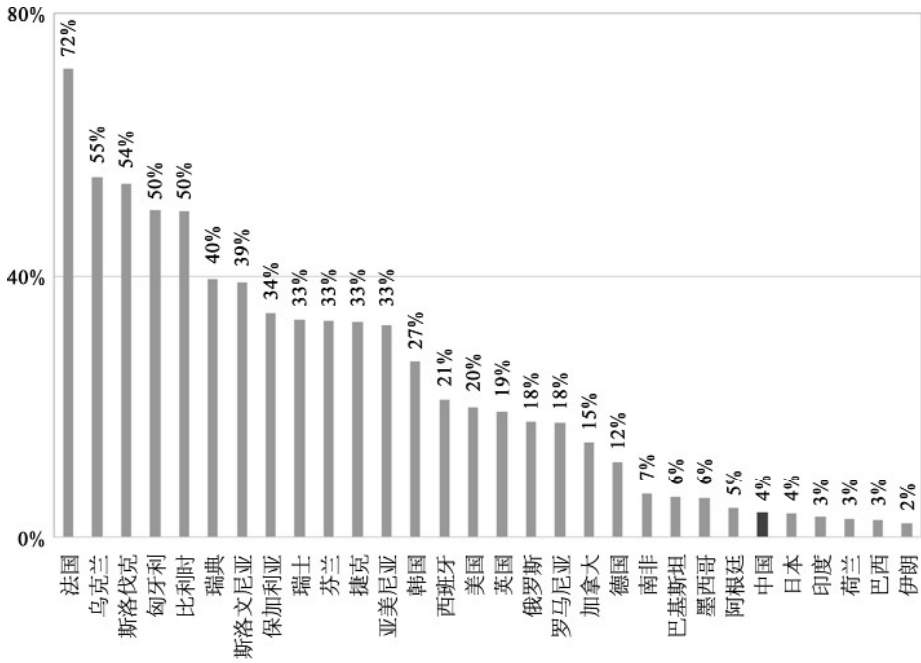


图1-5 2017年各国核电发电量占比

于较低水平。

1.2 全球核电机组运行状态分析

1.2.1 在建核电机组数量及规模

根据国际原子能机构统计数据显示，截至2018年12月，全球在建核电机组数量54台，装机规模5 501万kW，如表1-1所示。

表1-1 在建核电机组数量及装机规模

国家	在建数量/台	装机规模/万kW
中国	11	1 098.2
印度	7	482.4
俄罗斯	6	457.3

(续表)

国 家	在建数量/台	装机规模/万 kW
韩 国	5	670.0
阿拉伯联合酋长国	4	538.0
日 本	2	265.3
美 国	2	223.4
白俄罗斯	2	222.0
孟加拉国	2	216.0
乌克兰	2	207.0
巴基斯坦	2	202.8
斯洛伐克	2	88.0
法 国	1	163.0
芬 兰	1	160.0
巴 西	1	134.0
土耳其	1	111.4
阿根廷	1	2.5
共 计	58	5 971

受福岛核事故影响，德国、意大利等少数国家已宣布放弃核电，在国内能源转型政策影响下，法国将逐步下调国内核电占比，至2025年由现在的75%下调至50%。受持续攀升的造价影响，美国国内新开工建设核电意愿不强，通过核电延寿维持20%的核电发电量占比，截至2017年年底，美国99座核电机组有84座获得延寿许可。俄罗斯出于战略考虑仍将大力发展核电项目，目前国内在建6台，出口33台，印度、土耳其、南非、沙特阿拉伯、巴西、阿根廷等国发展核能的意愿强烈，阿拉伯联合酋长国、白俄罗斯、孟加拉国等国也在开始建设国内首座核电站。

1.2.2 在运核电机组数量及规模

根据国际原子能机构统计数据显示，截至2018年12月，全球在运核电机组数量共计454个，其中在运核电机组数量排名前5的国家分别是美国（98台）、法国（58台）、中国（46台）、日本（42台）和俄罗斯（37台）。各国在运核电机组数量和装机容量如图1-6所示。

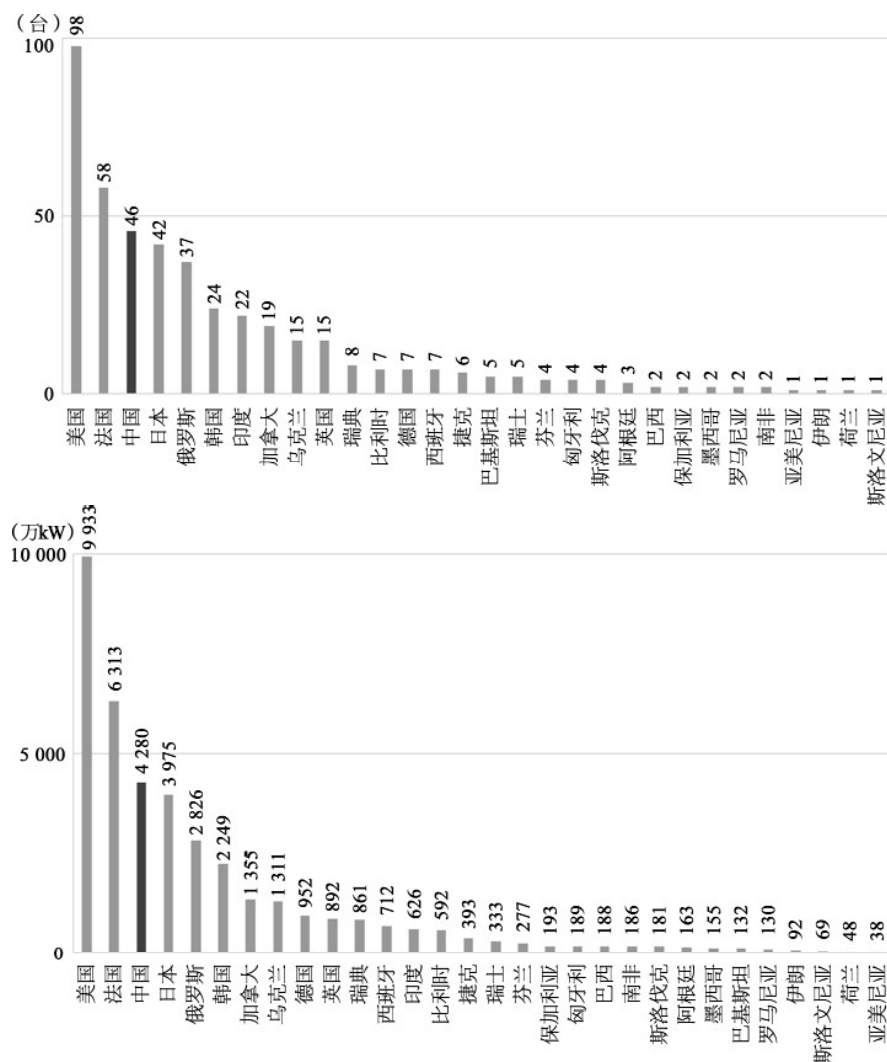


图1-6 在运核电机组数量及装机容量

1.2.3 永久关闭核电机组数量及规模

根据国际原子能机构统计数据显示，自20世纪70年代末开始，受核泄漏事故、能源结构调整、能源技术革新等多方面影响，截至2018年底，全球有169台机组（装机规模共约6 829万kW）永久关闭。其中，美国已陆续关闭35台核电机组，累计关停机组容量达1 504.6万kW，关停机组数量居全球首位；德国核电机组关停规模最大，达1 686万kW，共计29台机组。不同国家核电机组永久关闭数量及规模情况如表1-2所示。

表 1-2 不同国家核电机组永久关闭数量及规模

国 家	关闭机组/台	装机规模/万 kW
美 国	35	1 504.6
英 国	30	471.5
德 国	29	1 686.0
日 本	18	904.6
法 国	12	378.9
加拿大	6	214.3
俄罗斯	6	117.1
瑞 典	5	232.1
乌克兰	4	351.5
保加利亚	4	163.2
意大利	4	142.3
西班牙	3	106.7
斯洛伐克	3	90.9
立陶宛	2	237.0
韩 国	1	57.6