

# 核电 —

## 未来中国清洁能源之脊梁

阮大伟 编著



中国原子能出版社

# 核电——未来中国 清洁能源之脊梁

阮大伟 编著

中国原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

核电:未来中国清洁能源之脊梁 / 阮大伟编著.  
—北京:中国原子能出版社,2013.6  
ISBN 978-7-5022-5652-4

I. ①核… II. ①阮… III. ①核电工业—工业发展—  
中国 IV. ①F426.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 184411 号

## 内 容 简 介

本书通过对核电、水电、风电、太阳能等可再生能源优缺点的分析比较,阐述了核电在能源结构调整和确保我国能源安全等方面不可替代的重要作用;并在借鉴世界核电发展经验及归纳总结我国核电建设的基础上,重点分析核电技术自主化、铀资源保障、核电厂址选择、核电设备供应、核电人才培养、核电投资主体多元化、核电企业管理信息化等方面应对“安全高效发展核电”的促进作用及存在的问题,希望我国早日实现由“核电大国”到“核电强国”的转变,实现我国以清洁能源为主的理想。

## 核电——未来中国清洁能源之脊梁

---

|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| 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 | 王 丹                                |
| 责任校对 | 冯莲凤                                |
| 责任印制 | 潘玉玲                                |
| 印 刷  | 保定市中国画美凯印刷有限公司                     |
| 经 销  | 全国新华书店                             |
| 开 本  | 850mm×1168mm 1/32                  |
| 印 张  | 9 字 数 240 千字                       |
| 版 次  | 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷  |
| 书 号  | ISBN 978-7-5022-5652-4 定 价 36.00 元 |

---

网址:<http://www.aep.com.cn>

发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

# 序

自1954年6月世界第一座核电站——苏联奥布宁斯克5兆瓦核电站发电以来,经过半个多世纪的发展,核电已经成为世界能源结构的重要组成部分。虽然在核电发展历史上,先后发生过美国三哩岛、苏联切尔诺贝利和日本福岛三次较大的核事故,但是核电作为清洁、安全、高效和经济的大规模能源,作为能源结构的重要组成部分具有宽广的发展前景和不可替代性,随着科技进步和技术革新,将会在未来发挥越来越大的作用。

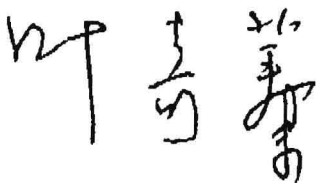
我国核电自秦山一期核电站起步,截至目前装机规模已经超过1200万千瓦。运行的核电站总体安全,从未发生过国际核事件分级2级及以上的运行事件,运行水平均处于国际中上水平。在建核电站进展良好、质量受控,通过经验反馈、科技更新和设计改进,提高了安全水平,设备国产化率逐步提高。未来,我国将坚持“安全高效发展核电”的产业政策,继续推进三代核电机组的建设,持续提高核电在电力装机容量中的比例。

《核电——未来中国清洁能源之脊梁》一书介绍了核电的优势及特点,分析了我国核电发展的形势、国产化方式、铀资源保障;作者结合实际工作经验,论述了核电厂厂址选择、核电厂设备供应、核电管理信息化和核电专业人才培养等方面的内容,提出了核电投资主体多元化的建议,具有很大的参考

价值。

我衷心祝贺《核电——未来中国清洁能源之脊梁》的出版发行,并向广大读者推荐本书。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of three main characters: '王' (Wang), '康' (Kang), and '强' (Qiang), which together mean 'Wang Kang'.

2013 年 6 月

# 前 言

为应对全球气候变化,我国政府已向全世界庄严承诺:争取到2020年非化石能源占一次性能源消费比重达到15%左右。单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。我国要实现2020年预定的清洁能源比重目标和减排目标,核电和可再生能源无疑将“挑大梁”。

自2007年《核电中长期发展规划(2005—2020年)》正式颁布以来,我国核电进入了快速发展阶段。截至2013年6月,我国大陆现役的核电机组有17个,装机容量超过1400万kW,已开工在建机组接近30台、装机容量超过3000万kW,占世界在建核电机组的40%,在建核电机组规模位居世界第一,我国已是全球核电在建规模最大的国家。即便如此,核电在我国能源消费结构中所占的比例仍然较低,与世界水平仍然存在着较大的差距。全球核电占电能的比重平均为17%,已有17个国家的核电在本国发电量中的比重超过25%。我国核电发电量占全国发电总量不足2%,远低于法国的85%、美国的30%,在多核电国家中的排名倒数第一。

未来二三十年,我国社会经济发展对能源,特别是电力能源的需求将保持十分旺盛的势头,减排二氧化碳的压力迫使我国需要尽快改变过分依赖煤炭、石油等化石燃料的局面。因此,核电必将成为优化我国能源结构和确保我国能源安全的“主力军”。到2020年,中国的核电运行装机容量将达到8000万kW左右,占电力总装机容量的5%以上。据估计,2030年我国核电比例将达到约10%,2050年将可能超过40000万kW,比目前全世界核电装机容量的总和还要多,核电必将与火电、水电成为我国电力的三

大支柱。简而言之,加快推进核电建设是我国今后能源发展战略的重点。我国核电面临着大好的发展机遇,国家各有关部门和单位正在按规划要求,充分利用我国已积累的核电技术和经验,并充分吸取国际先进技术和经验,既自主设计和建造一定数量的第二代改进型核电机组,再进入第三代先进核电技术发展阶段,并自主创新地创建具有自主知识产权的大型先进压水堆核电机组和高温气冷堆核电机组,更安全、更经济地优质高效发展核电。预计到2020年,我国在核电发展方面的成就将使我国成为自主创新型国家的标志之一,我国核能利用的发展前景将越来越广阔。

作 者

2013年6月

# 目 录

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| <b>第一章 核电将成为未来中国清洁能源之脊梁</b> ..... | (1)   |
| 1.1 发展核电的优势 .....                 | (1)   |
| 1.2 发展风电存在的问题.....                | (32)  |
| 1.3 发展太阳能发电存在的问题.....             | (37)  |
| 1.4 发展水电存在的问题.....                | (44)  |
| <b>第二章 我国核电技术自主化之路</b> .....      | (50)  |
| 2.1 第一步:外方为主,我方全面参与.....          | (52)  |
| 2.2 第二步:我方为主,外方支持.....            | (54)  |
| 2.3 第三步:全面自主创新 .....              | (56)  |
| 2.4 我国参与第四代核能利用研究.....            | (58)  |
| <b>第三章 核电的铀资源保障</b> .....         | (61)  |
| 3.1 我国核电发展对铀资源的需求分析.....          | (61)  |
| 3.2 国内外铀资源及天然铀供应情况分析.....         | (67)  |
| 3.3 保障铀资源安全供应的措施.....             | (80)  |
| 3.4 结论和建议.....                    | (90)  |
| <b>第四章 核电厂址选择</b> .....           | (92)  |
| 4.1 我国现役和在建核电厂址情况.....            | (92)  |
| 4.2 国外内陆核电厂建设和运行的情况.....          | (93)  |
| 4.3 我国内陆核电厂选址需要特别关注的问题 .....      | (114) |
| 4.4 不同类型核电机组在内陆厂址的适宜性分析 .....     | (136) |
| 4.5 结论和建议 .....                   | (156) |
| <b>第五章 核电设备供应</b> .....           | (158) |
| 5.1 我国已形成较完整的核电设备供应体系 .....       | (158) |
| 5.2 核电设备自主化研发情况 .....             | (164) |



|            |                         |              |
|------------|-------------------------|--------------|
| 5.3        | 结论和建议 .....             | (192)        |
| <b>第六章</b> | <b>核电人才培养 .....</b>     | <b>(196)</b> |
| 6.1        | 我国核电人才现状分析 .....        | (196)        |
| 6.2        | 核电发展对核电人才的需求分析 .....    | (201)        |
| 6.3        | 核电人才培养机制分析 .....        | (204)        |
| 6.4        | 核电人才培养已成当务之急 .....      | (208)        |
| 6.5        | 国外核电人才培养情况 .....        | (209)        |
| 6.6        | 结论和建议 .....             | (211)        |
| <b>第七章</b> | <b>核电投资主体多元化 .....</b>  | <b>(216)</b> |
| 7.1        | 我国核电投资主体现状 .....        | (216)        |
| 7.2        | 国外核电投资主体情况 .....        | (218)        |
| 7.3        | 我国核电发展存在的问题 .....       | (221)        |
| 7.4        | 核电投资主体多元化的必要性 .....     | (224)        |
| 7.5        | 核电产业基金的建立与运作分析 .....    | (226)        |
| 7.6        | 结论和建议 .....             | (229)        |
| <b>第八章</b> | <b>关于核电厂的安全问题 .....</b> | <b>(231)</b> |
| 8.1        | 核电安全的基本概念 .....         | (231)        |
| 8.2        | 核电厂的安全目标 .....          | (238)        |
| 8.3        | 核安全“十二五”规划 .....        | (243)        |
| 8.4        | 核电安全规划 .....            | (245)        |
| <b>第九章</b> | <b>核电厂管理信息化 .....</b>   | <b>(247)</b> |
| 9.1        | 核电厂管理信息化的概念 .....       | (248)        |
| 9.2        | 核电厂管理信息化的特点 .....       | (249)        |
| 9.3        | 核电厂管理信息化的应用范围 .....     | (250)        |
| 9.4        | 核电厂管理信息化的规划 .....       | (268)        |
| 9.5        | 结论和建议 .....             | (270)        |
| <b>第十章</b> | <b>总结 .....</b>         | <b>(272)</b> |
|            | <b>参考文献 .....</b>       | <b>(275)</b> |

# 第一章

## 核电将成为未来中国 清洁能源之脊梁

### 1.1 发展核电的优势

#### 1.1.1 什么是核电

世界上一切物质都是由原子构成的,原子又是由原子核和它周围的电子构成的。轻原子核的融合和重原子核的分裂都能释放出能量,分别称为核聚变能和核裂变能,简称核能,现在通常说的核能是指核裂变能。

1939年,德国科学家奥托·哈恩发现铀-235的原子核在中子的撞击下可以分裂成若干原子量较低的原子核,同时释放出2~3个中子和大量的能量,释放出的能量比化学反应中释放出的能量大得多,这种反应就是原子核的“裂变反应”。释放出的能量就是核裂变能,也就是人们所说的核能。目前大多数核电厂的主要燃料是铀-235,铀是一种重金属元素,一个铀-235原子有92个电子,其原子核由92个质子和143个中子组成。50万个原子排列起来相当于一根头发的直径,如果把原子比作一个巨大的宫殿,其原子核的大小只是一颗黄豆,而电子相当于一根大头针的针尖。天然铀由3种同位素组成:铀-235在天然铀中含量占0.71%,铀-238含量占99.28%,铀-234含量占0.0058%。铀-235是自然界存在



的易于发生裂变的唯一核素,它有一个特性,即当一个中子轰击它的原子核时,它能分裂成两个质量较小的原子核(这些裂变碎片一般具有放射性,这就是核电厂辐射的主要来源),同时产生 $2\sim 3$ 个中子和 $\beta$ 、 $\gamma$ 等射线,并释放出约 $200\text{ MeV}$ 的能量(相当于 $3.2\times 10^{-11}\text{ J}$ )。也就是 $1\text{ kg}$ 铀-235全部裂变大约释放出相当于 $2\,700\text{ t}$ 标准煤燃烧放出的能量(一个 $30\text{ 万 kW}$ 电功率的核电厂,每天仅消耗约 $1.1\text{ kg}$ 铀-235)。我们能够利用核能,是因为铀-235原子核在发生裂变时还同时放出 $2\sim 3$ 个中子(平均 $2.43$ 个),如果由一个新产生的中子,再去轰击另一个铀-235原子核,便引起新的裂变,以此类推,这样就使裂变反应不断地持续下去,这就是裂变链式反应,以用一种“自持式链式反应”来维持连续的裂变反应,核能就连续不断地释放出来。核电厂就是利用可控的“链式反应”获得能量用来发电的。

核电厂就是实现核裂变能转变为电能的装置,它与火电厂最大的不同是蒸汽供应系统。核电厂利用核能产生蒸汽推动汽轮发电机组工作,经过核能—热能—电能的能量转换来发电。核电厂的反应堆和蒸汽发生器起到了相当于火电厂的化石燃料和锅炉的作用,即核电厂与火电厂的主要区别是核电厂用反应堆替代了火电厂的锅炉。

反应堆是核电厂的心脏,它是使原子核裂变的链式反应能够有控制地持续进行的装置,从而实现核能转换成热能的装置。1942年,美国芝加哥大学建成了世界上第一座自持的链式反应装置,从此开辟了核能利用的新纪元。反应堆中有控制棒,是保证反应堆安全的重要部件,它是由能强烈吸收中子的材料制成的,主要材料有硼和镉。

核电厂的类型包括了压水堆、沸水堆、重水堆(如加拿大的CANDU堆)、气冷堆(如英国的GCR和一些国家目前正在开发的高温气冷堆)、钠冷快中子增殖堆等多种堆型,但应用最广泛的是压水



反应堆。压水堆是以普通水作冷却剂和慢化剂,它是从军用堆基础上发展起来的最成熟、最成功的动力堆堆型。压水堆核电站目前占据世界核电领域的主要部分,我国已明确以压水堆为主的核电发展技术路线。压水堆的名称来源于冷却堆芯的轻水是采用高压过冷的方式,轻水既是冷却剂又是慢化剂。最初发展压水堆型是为了服务于船舶核动力,由于其技术成熟很快转移到民用领域。国际上技术最为成熟的核岛设计多采用压水式反应堆,我国也不例外。图 1.1、图 1.2 是压水堆、沸水堆两种反应堆的核电站结构图。

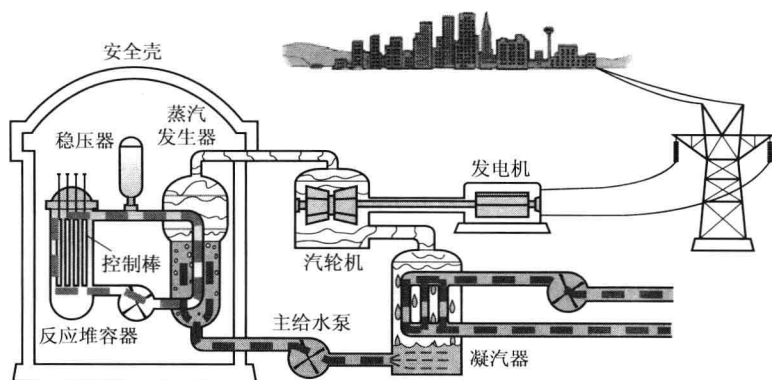


图 1.1 压水堆核电站

目前大多数压水堆核电站用的燃料是铀-235,一般将其制成金属氧化物等形式,把小指头大的烧结二氧化铀芯块装到锆合金管中,将 300 多根装有芯块的锆合金管组装在一起,成为燃料组件。大多数组件中都有一束控制棒,控制着链式反应的强度和反应的开始与终止。核电厂中的能量转换一般借助于三个循环来实现。反应堆冷却剂在主泵的驱动下进入反应堆,流经堆芯后从反应堆容器的出口管流出,进入蒸汽发生器,然后回到主泵,这就是反应堆冷却剂的循环流程,也称一回路循环。在循环流动过程中,

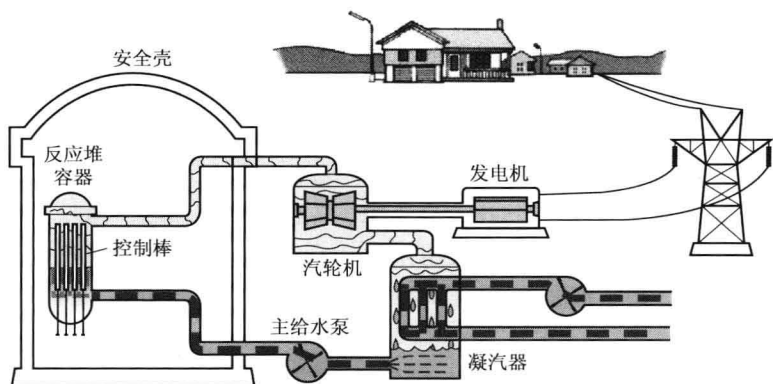


图 1.2 沸水堆核电厂

反应堆冷却剂从堆芯带走核反应产生的热量，并且在蒸汽发生器中、在实体隔离的条件下将热量传递给二回路的水。二回路水被加热，生成蒸汽，蒸汽再去驱动汽轮机，带动与汽轮机同轴的发电机发电。做功后的乏蒸汽在冷凝器中被海水或河水、湖水等三回路水冷凝为水，再补充到蒸汽发生器中。以海水为介质的三回路的作用是把乏蒸汽冷凝为水，同时带走核电厂的弃热。简单地说，新型核电厂大体分为两部分：一部分是利用核能生产蒸汽的“核岛”，包括反应堆装置和一回路系统；另一部分是利用蒸汽发电的“常规岛”，包括汽轮发电机系统。核燃料在“反应堆”内发生裂变而产生大量热能，再用处于高压力下的水把热能带出，在蒸汽发生器内产生蒸汽，蒸汽推动汽轮机带着发电机一起旋转，电就源源不断地产生出来，并通过电网输送到四面八方。一座百万千瓦级的核电厂每年只需要补充 30 t 左右的核燃料，而同样规模的烧煤电厂每年要烧 300 万 t 煤。同时由于核电厂和燃煤火电厂燃料的不同，导致了核电厂存在一种火电厂没有的潜在危害——核辐射。这也是为什么核电厂需要辐射防护和应急管理的原因。由于核电



厂的核裂变反应主要集中在堆芯所在的一回路,故这种潜在危害主要集中在一回路及相关的系统和厂房(核岛),而核电厂二回路及相关的系统和厂房(常规岛)与火电厂大同小异,故一般在常规岛部分没有这种潜在危害。

另外,谈到核事故,有人总会与原子弹爆炸相联系,但两者有很大的区别。铀-235 是核燃料中的有效成分,也是原子弹的主要成分,但核燃料中的铀-235 含量约为 3%,而原子弹中铀-235 的含量却高达 90%以上,就像啤酒和白酒都含有酒精,白酒因酒精含量高可以点燃,而啤酒则因酒精含量低却不能点燃一样,核电厂也不会像原子弹那样发生核爆炸。另外,核电厂里是不可能形成原子弹核爆炸所要求的非常苛刻的条件的。核电厂对事故的防范是极其严密的,无论从设计还是运营都是以安全为第一要素。核电厂因设备故障或人为差错等导致事故的可能性已经非常低,但依然设计核事故应急响应作为核安全“纵深防御”的最后一道屏障,可在万一发生核事故时减轻事故的后果(主要指放射性对工作人员、公众和环境造成的危害)。许多国家已经以立法或颁布条例的形式明确了核事故应急准备的要求。

### 1.1.2 世界核电发展回顾

1942 年,美国建成了世界上第一座人工核反应堆,开创了核能利用的新纪元。到了 20 世纪 50~60 年代,美国、苏联等工业发达国家在进行军备竞赛的同时也竞相发展核电。1954 年,苏联建成一座电功率为 5 000 kW 的实验性核电厂,反应堆采用的是石墨压水堆。1957 年,美国建成一座电功率为 9 万 kW 的压水堆原型核电厂,它是在核潜艇所用压水堆的技术基础上开发出来的。英国也在 1956 年利用其石墨气冷堆(即生产军用钚)发电,建成两座军民两用堆核电机组,单机电功率为 4.6 万 kW。随后,苏联、美国、法国、比利时、德国、英国、日本、加拿大等发达国家相继建造



了大量核电厂。日本是仅次于美国、法国的世界第三核电大国。2010年,日本核电发电量约占全国总发电量的三分之一。截至2011年3月10日,日本核电反应堆情况:18座核电厂55台核电机组运行,总装机容量4 734.8万kW,其中沸水堆30台,压水堆24台,快堆1台(文殊核电厂,于2010年5月重新启动,现又停堆检修);2台反应堆(沸水堆)在建,总装机容量275.6万kW。目前,日本受9.0级大地震和海啸影响发生核泄漏的为福岛第一核电厂。

20世纪70年代,工业发达国家受到两次石油危机的冲击,以核代油的选择使核电进入发展高潮,此时的核电发展速度要大于火电和水电发展速度,但是由于80年代以后受经济发展趋缓的影响,电力需求增速随之放缓,再加上1979年和1986年的美国三哩岛核事故和苏联切尔诺贝利核事故,核电发展陷入了长达20多年的低谷期。此后,人们对核电的安全性提出了新的要求,不断增加新的规则和技术标准。同时也相应地增加了建设与维护投资,使核电厂的建设与运营成本增加。虽然,人们对核电利用的安全性仍存在一定的疑虑,且核电厂的建设成本不断提高,但各国出于能源安全的种种考虑,仍然把核电放在重要的能源发展位置,并使其在本国能源结构中占有重要位置。

进入21世纪,随着对能源需求的增加、环境保护的压力、科学技术的不断进步,以及核电技术的发展和核电产业的充分认识,核电越来越受到希望增加能源供应多样性、保障能源安全的国家的青睐,世界上最大的3个煤炭消费大国中国、美国和印度都推出了积极的核电发展计划(见图1.3)。截止到2011年3月,世界上共有443台核电机组在运行,63台核电机组正在建设中,核电的发电量将达6 545.4万kW。其中,美国有103个核电机组,占其总发电量的19%;法国59台机组,占80%;日本核电发电量占总发电量的33.3%;韩国占28%。核电使用广泛,大型化、标准化和系列化趋势明显。目前,在全球的发电量中,热电(煤炭、天然气和石

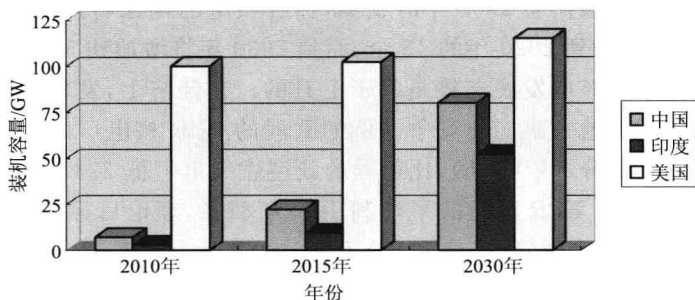


图 1.3 中国、印度和美国在 2005 年、  
2015 年和 2030 年的核电装机容量

油发电)占 65%，水电占 19%，而 31 个国家的 443 座反应堆生产的核电占全球发电量的 17%。现有核电的单机容量为 1 000 MW 以上的超过 60%，尤其以 1 200 MW 机组为多。法国 AREVA 公司目前已投产的单机最大容量为 1 450 MW 机组，由 1 个压力容器、4 个蒸汽发生器等组成，蒸汽发生器的出力达 380 MW，重 445 t，该公司已经开始规划设计 1 800 MW 机组。核电产业已成为许多国家重点扶持和发展的支柱产业。核电虽然提供了全球发电总量的 17%，但 83% 的核发电量都集中在工业化国家。16 个国家的核发电量占国内总发电量的 25% 以上，其中法国、立陶宛、比利时和斯洛伐克 4 国的核电超过 50%。现在，西欧和北美国家核电发展停滞衰退，而亚洲和东欧的一些国家核电正快速发展。发达的工业国家核电发展停滞，有生产力过剩和经济衰退的原因，有核废料处理的难题，也有受核电厂事故造成核泄漏，引发民众不满的因素。在世界更加重视环境保护，减少温室气体排放的今天，核能作为一种清洁安全并且有充分资源保证的能源，在今后世界能源结构中 will 占据更重要的地位和获得更快的发展是毋庸置疑的。





据世界核协会 2009 年的预测,拥有核电的国家将从 2008 年的 31 个增加到 2020 年的 43 个,而到 2030 年将增加到 54 个。未来的几十年核电发展态势是趋于上升的。在经济上,发电成本早已可以和其他一次能源竞争。例如欧洲的 EPR 核电厂的发电成本为 3.8 美分/(kW·h),比德国的新型燃气电厂低 22%,比燃煤电厂低 6%。EPR 运行的平均利用率为 87%,理论目标值 92%。10 台的系列建造成本(含利息)为 1 500 美元/(kW·h)。同时,利用更新的技术,EPR 还可扩容为 1 800 MW,发电成本降为 3.4 美分/(kW·h)。目前,EPR 最优化的目标是将发电成本降为 2.9 美分/(kW·h),折合同期人民币为 0.22 元/(kW·h),已经达到燃气发电成本曲线的最低点,使之更具竞争力。国际能源机构预测,2030 年世界对电力的需求将在现有基础上翻一番,全世界用于新建核电厂的总投资将超过 2 000 亿美元,其中设备投资约 1 000 亿美元。欧洲许多国家对发展核电都表现出了更为积极的态度。2003 年以来,全球石油需求增长加快,化石能源价格飞涨,世界各国对能源安全无不忧心忡忡。在能源供给日趋紧张的形势下,许多国家都认为核能将是今后解决能源危机的重要途径,不约而同开始重视核能的开发利用。2001 年,美国新的能源政策把扩大核能作为国家能源政策的主要组成部分,俄罗斯总统普京在世界新千年峰会上发出推动世界核电发展的倡议。之后的几年,不少国家都开始陆续加快核电建设,可以预见的是今后几十年全球将形成核电厂建设热潮。自 20 世纪我国开始建造核电厂以来,核电经济性越来越受到关注。核电经济性可从宏观和微观两个层面来观察,宏观上讲,核电经济性首先表现在核电对社会经济发展的影响,即核电在促进国家能源结构优化调整、保障能源安全,推动相关产业优化升级、促进国民经济发展方面发挥的作用。

日本福岛核事故使世界上已经有核电站的国家和正在计划发展核电的国家都开始重新审视核电继续发展的问題,在“首尔第二