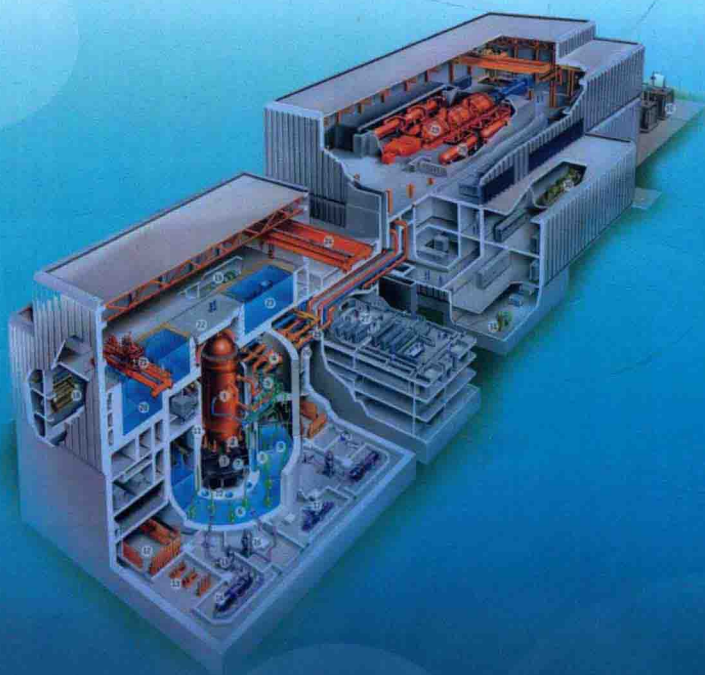


先进核电厂结构与动力设备

秋穗正 苏光辉 田文喜等 编著



中国原子能出版社

先进核电厂结构与动力设备

秋穗正 苏光辉 田文喜 张大林
巫英伟 张亚培 陈荣华

编著



中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

先进核电厂结构与动力设备 / 秋穗正等编著. —北京: 中国原子能出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5022-7061-2

I. ①先… II. ①秋… III. ①反应堆结构-研究
IV. ①TL35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 024503 号

先进核电厂结构与动力设备

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 朋
装帧设计 马世玉
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 18.125 字 数 452 千字
版 次 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-7061-2 定 价 45.00 元

序

1998年西安交通大学核反应堆工程教研室编写了《核反应堆结构与动力设备》讲义教材,供核工程专业本科专业课程教学使用,前后使用10余年,取得了较好的教学效果。但随着核能形式的不断发展,特别是本世纪以来核能在全世界范围内迎来了大发展的春天,一些创新性的堆芯和核电厂系统设计理念不断涌现。原有教材和讲义内容较为陈旧,已不能满足目前课程教学和人才培养的需要,且国内缺少先进核反应堆结构原理方面的教材,相关的资料散落在各种专业报告、论文等资料中。因此,西安交通大学核科学与技术学院于2012年在原有《核反应堆结构与动力设备》讲义基础上,适当缩减原讲义中关于第二代反应堆的内容,添加AP1000、ABWR等第三代反应堆的内容,新加入SCWR、MSR、VHTR等第四代反应堆的结构原理等内容,同时简单介绍一些概念设计新颖的堆型,包括小型模块式反应堆、球床式水冷堆、行波堆、聚变裂变混合堆及国际热核聚变堆等,形成了《先进核电厂结构与动力设备》讲义教材,旨在使读者能够较为全面地掌握先进核能系统发展历程和前沿。新讲义使用3年以来,收效良好。因此,编者有意将之正式出版,让该讲义更好地服务于我国核教育事业,让更多的读者从中获益。

本教材主要内容包括:核能的发展历史,核反应堆和核电厂工作原理,典型二代压水堆堆芯及一回路主系统结构,沸水堆和重水堆等水冷反应堆,AP1000等第三代核反应堆,Nuscale、IRIS、ABV-6M、SMART、CAREM、西屋SMR、俄罗斯SVBR及4S等小型模块式反应堆,超临界水冷堆、钠冷快堆、熔盐堆、铅铋冷却快堆、气冷快堆、超高温气冷堆等第四代核能系统概念,行波堆及核聚变反应堆原理等。通过本教材的学习,可以初步掌握各种核反应堆结构及设计原理、先进核能系统发展历程及前沿。

西安交通大学核反应堆热工水力实验室(XJTU-NuThEL)近年来承担了包括国家科技重大专项、国家自然科学基金、国家磁约束核聚变能发展研究专项、国防科工局核能开发项目等在内的多项科研课题,相关课题内容为本书稿的形成提供了大量的素材。实验室历届研究生对本书稿内容的更新和制图做出了大量辛勤的工作,包括李昕、朱大欢、王伟伟、陈勇征、邓阳斌、戈剑、黄思洋、赵晓晗和王明军等。该书稿讲义在十余年本科教学中,很多本科生也对书稿内容提出了很好的建议,在此编者表示感谢。

核反应堆结构及设备教材涉及学科多,题材广泛,加之编者学识水平有限,经验不足,书中难免有不妥之处,恳切希望本教材的使用者给予批评指正。

编 者

二零一五年八月

于西安交通大学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 核能在能源结构中的地位与作用	1
§ 1.2 核能的发展及现状	3
§ 1.3 核能在我国能源发展中的战略地位	8
第二章 核反应堆与核电厂基本原理	12
§ 2.1 核反应堆工作原理	12
§ 2.2 核反应堆的分类	14
§ 2.3 核电厂基本工作原理	15
参考文献	19
第三章 典型压水反应堆压力容器及堆芯结构	20
§ 3.1 压水堆本体结构概述	20
§ 3.1.1 压水堆本体结构	20
§ 3.1.2 核反应堆内冷却剂的流动	22
§ 3.2 反应堆压力容器	23
§ 3.2.1 概述	23
§ 3.2.2 反应堆压力容器结构	24
§ 3.2.3 反应堆压力容器的运行	27
§ 3.3 堆内构件	28
§ 3.3.1 概述	28
§ 3.3.2 堆芯下部支撑结构	30
§ 3.3.3 堆芯上部支撑结构	32
§ 3.4 压水堆堆芯	33
§ 3.4.1 概述	33
§ 3.4.2 燃料组件	35
§ 3.4.3 控制棒组件	43
§ 3.4.4 堆芯相关组件	45
§ 3.5 控制棒驱动机构	49
§ 3.5.1 概述	49
§ 3.5.2 控制棒驱动机构的结构	50
§ 3.5.3 控制棒驱动机构的运行	52
§ 3.6 堆内测量支承结构	53
§ 3.7 反应堆设计变更论证及评价	55
参考文献	57

第四章 压水堆核电厂一回路系统及其重要设备	58
§ 4.1 压水堆核电厂一回路系统	58
§ 4.2 蒸汽发生器	60
§ 4.2.1 概述	60
§ 4.2.2 立式自然循环蒸汽发生器	61
§ 4.2.3 直流式蒸汽发生器	66
§ 4.3 反应堆冷却剂泵	67
§ 4.3.1 概述	67
§ 4.3.2 反应堆冷却剂泵的结构	69
§ 4.4 稳压器	73
§ 4.4.1 概述	73
§ 4.4.2 稳压器结构及工作原理	74
§ 4.5 反应堆冷却剂管道和保温层	80
§ 4.5.1 反应堆冷却剂管道	80
§ 4.5.2 保温层	82
参考文献	84
第五章 沸水堆和重水堆等水冷反应堆	85
§ 5.1 沸水堆	85
§ 5.1.1 概述	85
§ 5.1.2 沸水堆堆芯及本体结构	85
§ 5.1.3 沸水堆核电厂的系统组成、工作原理及特点	87
§ 5.1.4 沸水堆安全壳结构	90
§ 5.1.5 沸水堆的改进与发展	91
§ 5.2 重水反应堆	95
§ 5.2.1 概述	95
§ 5.2.2 重水反应堆的基本结构和特点	97
§ 5.2.3 重水反应堆燃料棒及本体结构	98
§ 5.2.4 重水反应堆的演变	103
参考文献	109
第六章 第三代核反应堆 AP1000	110
§ 6.1 AP1000 概述	110
§ 6.2 AP1000 堆芯及主回路系统结构	114
§ 6.2.1 反应堆本体	114
§ 6.2.2 蒸汽发生器	115
§ 6.2.3 稳压器	117
§ 6.2.4 反应堆冷却剂泵	118
§ 6.2.5 主管道	119
§ 6.3 AP1000 非能动堆芯冷却系统	119
§ 6.3.1 非能动余热排出系统	119

§ 6.3.2 非能动安全注入系统	121
§ 6.3.3 自动降压系统	125
参考文献	125
第七章 小型模块式反应堆	127
§ 7.1 小型模块式反应堆概述	127
§ 7.2 Nuscale 堆	128
§ 7.2.1 NuScale 堆概况	128
§ 7.2.2 NuScale 堆的主要系统	129
§ 7.2.3 NuScale 堆安全性	130
§ 7.2.4 NuScale 堆试验	135
§ 7.3 国际革新安全反应堆(IRIS)	136
§ 7.3.1 IRIS 设计特点和主要设计参数	137
§ 7.3.2 IRIS 堆芯设计	138
§ 7.3.3 IRIS 主冷却剂系统	139
§ 7.3.4 控制棒驱动机构 CRDM	141
§ 7.3.5 IRIS 堆的安全性	141
§ 7.4 ABV-6M 堆	145
§ 7.4.1 ABV-6M 设计概述	145
§ 7.4.2 ABV-6M 总体结构及主要设备部件	146
§ 7.4.3 ABV-6M 核辅助系统	146
§ 7.4.4 ABV 一体化压水堆的特点	147
§ 7.5 系统一体化模块反应堆(SMART)	148
§ 7.5.1 SMART 结构参数和设计特点	148
§ 7.5.2 SMART 安全特性	150
§ 7.6 CAREM 堆	152
§ 7.6.1 CAREM 设计特点和主要设计参数	152
§ 7.6.2 CAREM 安全特性	154
§ 7.6.3 CAREM 严重事故分析	155
§ 7.6.4 CAREM 设计优势	156
§ 7.7 Westinghouse SMR 反应堆	156
§ 7.7.1 Westinghouse SMR 反应堆主要参数	156
§ 7.7.2 Westinghouse SMR 反应堆特点	157
§ 7.7.3 核系统描述	158
§ 7.7.4 Westinghouse SMR 反应堆安全性分析	158
§ 7.7.5 事故工分析	161
§ 7.8 俄罗斯模块式铅铋快堆 (SVBR)	163
§ 7.8.1 事故工况分析	164
§ 7.8.2 燃料选择	165
§ 7.8.3 堆芯设计	166

§ 7.8.4	主要设备	168
§ 7.8.5	模块化设计	168
§ 7.8.6	SVBR-75/100 的安全性	169
§ 7.9	超小型安全反应堆(Super-Safe Small and Simple)	170
§ 7.9.1	设计特点和主要参数	171
§ 7.9.2	4S 的堆芯设计	173
§ 7.9.3	压力容器内热传递过程	174
§ 7.9.4	安全概念和设计理念	175
§ 7.9.5	设计基准事故和超基准事故分析	176
参考文献		177
第八章	第四代核反应堆结构原理	179
§ 8.1	第四代核反应堆概述	179
§ 8.2	超临界水冷堆	184
§ 8.2.1	SCWR 系统设计	185
§ 8.2.2	反应堆压力容器	187
§ 8.2.3	堆芯及燃料组件	188
§ 8.2.4	堆内构件	189
§ 8.2.5	冷却剂系统	189
§ 8.2.6	控制系统	190
§ 8.2.7	安全壳	191
§ 8.3	钠冷快堆	192
§ 8.3.1	概述	192
§ 8.3.2	快中子增殖反应堆的基本结构和特点	195
§ 8.3.3	SFR 电厂系统及主要设备	199
§ 8.4	铝合金冷却快堆	205
§ 8.4.1	概述	205
§ 8.4.2	几种铅冷快堆介绍	206
§ 8.5	气冷快堆	214
§ 8.5.1	概述	214
§ 8.5.2	气冷快堆冷却系统	215
§ 8.6	超高温气冷堆	220
§ 8.6.1	概述	220
§ 8.6.2	高温气冷堆的基本结构和特点	222
§ 8.6.3	高温气冷堆堆芯	226
§ 8.6.4	高温气冷堆冷却系统及蒸汽发生器设备	227
§ 8.6.5	高温气冷堆压力容器	229
§ 8.6.6	高温气冷堆的主要关键技术	230
§ 8.7	熔盐堆	231
§ 8.7.1	概述	231

§ 8.7.2 熔盐堆的基本结构和特点	235
§ 8.7.3 熔盐堆新概念设计	242
参考文献.....	244
第九章 其他先进核反应堆简介	248
§ 9.1 球床式水冷堆(PBWR)	248
§ 9.1.1 概述	248
§ 9.1.2 球床式水冷堆的基本结构和特点	249
§ 9.2 行波堆	251
§ 9.2.1 概述	251
§ 9.2.2 CANDLE 燃耗策略.....	254
§ 9.2.3 泰拉能源行波堆工程计划	257
§ 9.3 聚变裂变混合堆	261
§ 9.3.1 概述	261
§ 9.3.2 混合堆概念介绍	262
§ 9.3.3 混合堆分类	263
§ 9.3.4 混合核能源对我国核能发展战略的意义	266
§ 9.4 国际热核聚变堆(ITER).....	267
§ 9.4.1 聚变核能	267
§ 9.4.2 ITER 结构与设备	268
§ 9.4.3 ITER 安全与环境评估	276
参考文献.....	276

第一章 绪 论

§ 1.1 核能在能源结构中的地位与作用

能源是指能提供能量的自然资源，是人类生存和发展的重要资源之一，也是人类生产，国家发展和人民生活水平提高的重要物质基础。它不仅直接关系到国民经济的发展，人民生活的改善，同时还影响到社会的进步和稳定。

随着人类社会的发展，能源结构已经历了三次重大的演变：18 世纪 60 年代的产业革命促进了工业的大发展，同时也促使世界能源结构发生了第一次大转变，即煤炭逐步替代了木柴，促进了煤炭工业的发展。到 19 世纪中叶，煤炭已逐渐占主导地位，这个时期工业和社会劳动生产率有了极大的提高。从 20 世纪 20 年代开始，随着石油资源的发现和石油工业的发展，世界能源结构发生了第二次转变，即从煤炭转向石油和天然气。随着科技、经济的发展，石油和天然气在一次能源结构中的比例开始不断增加，并于 20 世纪 60 年代超过煤炭，逐渐取代煤炭成为主导能源，动摇了煤炭自工业革命以来 200 年在能源中的主宰地位。由于石油和天然气的热值高，加工、转换、运输、贮存和使用的方便，对促进世界工业与经济的繁荣发展起了非常重要的作用，创造了人类历史上空前的物质财富。但是，20 世纪 70 年代以来两次石油危机的爆发，开始动摇了石油在能源中的支配地位。20 世纪末，能源结构开始经历第三次转变，即从以石油为中心的能源系统开始向以煤、核能和再生能源等多种能源结构的转变。国内外许多专家指出，现行的能源生产、使用方式是不可持续的，化石燃料的不可再生和引发的不断恶化的生态环境后果也促使人们努力开发新的能源技术。现今新能源和可再生能源技术的开发已日益受到重视，以化石燃料为主体的世界能源格局将转化为以核能、太阳能和生物质能等可新能源和再生能源为主体的新的世界能源格局，化石燃料将失去世界能源主体的地位。当然，能源结构从化石能源为主转为以新能源、可再生能源为主的这一革命性变革需要一段较长的技术准备和过渡时期。新能源和可再生能源要大量取代化石能源是一项十分艰巨的任务，绝非一朝一夕可以实现，况且与化石能源相比，目前非水可再生能源依然昂贵。世界能源理事会和国际应用系统分析研究所合作完成的研究认为：在 21 世纪上半叶，石油、煤炭和天然气等化石燃料仍将是世界一次能源构成的主体。

目前，世界上消耗的能源主要来自石油、天然气和煤三大资源。据英国石油公司 (British Petroleum, BP) 发布的世界能源统计回顾显示：2006 年世界一次商品能源消费中石油占 35.8%，居第 1 位；煤炭占 28.4%，居第 2 位；天然气占 23.7%，居第 3 位；其次为水能和核能，分别占 6.3% 和 5.8%。据国际能源资料统计：全世界已探明适合于经济地开采的石油和天然气资源约有三四十年储藏量。世界上煤的储藏量比较大，消耗也没有石油多，估计可采 300 年。

然而,按目前能源消耗的增加速度和这么大的消耗量,如果继续依靠有机燃料来发电的话,那就给人们带来两个深为忧虑的问题。

第一,大量有机燃料的消耗给自然环境带来严重污染。以一座发电量为 1 000 MW 的燃煤火电厂为例,每天要烧约 8 000 t 的优质煤。同时,向大气层倾吐出 300 t 二氧化硫、二氧化碳和烟灰等有害物质,造成严重的空气污染。

第二,煤和石油等是化学工业、轻纺工业的宝贵原料,作为燃料烧掉是十分可惜的。例如:现代石油化工厂就是依靠石油作原料为纺织、化工提供大量各种宝贵原料。若用大量石油来发电,不仅浪费而且会将地球上宝贵的工业原料消耗尽。因此,为了更合理地利用有机燃料,必须开发和利用更有效的能源资源。

自然界中除有机燃料外,核能、水力、风力、太阳能、地热和潮汐能也都是巨大的能源。水力是较为理想的自然资源,但是,投资的时间比较长,大型水电从动工兴建到开始运转,一般需要 10 年左右的时间,我国的水力大多分布在西南部地区,而经济比较发达地区却分布在沿海,还得建造配套的远距离输电工程。至于太阳能、潮汐能、风力及地热发电,目前虽然经过研究试验已开始应用,但要大规模地用于工业还受到很多条件的限制。目前,比较成熟并已在工业上大规模应用的是核裂变能。核能不仅单位能量大,而且资源丰富,据初步统计地球上已勘探到的铀矿和钍矿资源,按蕴藏的能量计算,相当于地壳中有机燃料的 20 倍。如果进一步实现受控聚变反应,则海水中的氘,也可成为有用的燃料,1 t 海水中的氘用来聚变反应所释放的能量就相当于 350 t 煤,则能量资源更为丰富。如果海水中的氘,地球上的锂和铀、钍所蕴藏能量充分利用,人类将不必为能源供应问题担忧了。

从环境保护角度看,核能是一种清洁能源,核能对于 SO_2 和 CO_2 等的污染的排放量近于零。同时,由于核能不排放 CO_2 ,因而利用核能可以避免温室效应。发展核能是改善环境的重要途径。实际上,有限的核电利用已给环境净化带来了效益。以法国为例,从 1980 年到 1986 年短短 7 年的时间法国总发电量中核电比例由 24% 上升到 70%,至今一直维持在 70% 以上的水平,在此期间法国的发电量增加 40%,而 SO_2 的排放量却减少了 56%, NO_x 的排放量减少 9%,尘埃减少了 36%,大气质量有了明显改善,法国的核电政策已经证明了使用核能可以解决大气的污染问题。

从经济性角度来看,核能也具有无与伦比的优越性。虽然核能与其他能源相比,其进入商用阶段的时间并不长,但对世界各国核电经济性分析表明,目前绝大多数发展核电国家和地区的核电成本已低于火电。

为了确保核电厂安全运行,在设计方面,采取了许多安全保护措施。因而使核电厂的结构更复杂,使用的贵重材料更多,对各部件的制造加工要求更高,质量检查也更严格。这使整个核电厂的基建费用高于相同规模的火电厂 1.5~2 倍。表 1-1 给出了目前核电厂建设比投资表。核电总成本主要由基建费、燃料费和运行费三项费用来决定,虽然核电厂的基建费用高,但燃料费用低于燃煤电厂。对煤和石油资源缺乏的国家及核电起步较早的某些国家,核电总成本一般低于火电成本 20%~50%。

燃料的涨价对煤电成本影响较大,而核电受燃料价格的影响小得多;加之反应堆功率密度的增加,燃料加深,热效率的提高,核电厂逐渐标准化以及核电厂的运行率逐年上升等使核电更具吸引力。

以上分析表明，无论是以核能在缓解能源危机的角度还是以环境保护和其安全性、经济性来看，核能都将成为未来能源格局中的重要组成。

表 1-1 核电建设项目比投资比较表

项目	机型	比投资	容量	信息来源
中国辽宁红沿河	二代改进	1 530 美元/千瓦	4×108 万千瓦	WNA 资料，2009.1
中国福建宁德	二代改进	1 786 美元/千瓦	4×108 万千瓦	WNA 资料，2009.1
中国广东阳江	二代改进	1 565 美元/千瓦	6×108 万千瓦	WNN 2008.12.17
中国浙江方家山	二代改进	1 760 美元/千瓦	2×108 万千瓦	WNN 2008.12.27
俄罗斯沃罗涅日二厂 1 号、2 号	AES-2006	2 341 美元/千瓦	2×107 万千瓦	WNN 2008.10.27
俄罗斯列宁格勒二厂 1 号、2 号	AES-2006	2 426 美元/千瓦	2×117 万千瓦	WNN 2008.10.27
白俄罗斯第一核电厂	AES-2006	3 750 美元/千瓦	2×120 万千瓦	WNN 2011.10.11
保加利亚 Belene	AES-92	2 800 美元/千瓦， 未含首炉燃料	2×100 万千瓦	WNA 资料，2009.1
美国南德克萨斯	ABWR	3 700~5 000 美元/千瓦	2×135 万千瓦	WNA 资料，2009.1
罗马尼亚切尔纳沃达核电厂	CANDU6 重水堆	3 570 美元/千瓦	2×70 万千瓦	WNN 2010.2.9
阿联酋	APR1400	3 643 美元/千瓦	4×140 万千瓦	NEI 2010.1.4
美国卡拉威尔	US-EPR	6 125 美元/千瓦	160 万千瓦	WNA 资料，2009.1
法国弗拉芒维尔 3 号	EPR	5 200~7 000 美元/千瓦	160 万千瓦	WNN 2011.7.20
美国乔治亚州 Vogtle	AP1000	6 360 美元/千瓦	2×110 万千瓦	WNA 资料，2009.1
美国佛罗里达州土耳其点	AP1000	5 780~8 071 美元/千瓦	2×110 万千瓦	WNA 资料，2009.1
美国佛罗里达州征费县 Levy	AP1000	7 400 美元/千瓦	2×110 万千瓦	WNN 2010.5.7

§ 1.2 核能的发展及现状

迄今核能的利用主要是以核电为主，自从 1954 年苏联第一座功率为 5 000 kW 的试验性核电厂投入运行以来，迄今 60 年内，核电厂已得到相当规模的发展。1.4 万多堆·年的运行经验表明，核电技术已经成熟，目前已经成为一种清洁、经济、安全和可靠的能源。统计数据显示：截至 2010 年 12 月 31 日，全世界共有 441 个在运行的反应堆，总装机容量 3.75 亿千瓦，核电年发电量相当于 1960 年全球发电量的总和，提供了全球 15% 的电力需求。

核电的发展大体可分为四个阶段。

1954—1960 年为第一个阶段，即试验阶段，这期间只有工业发达的美、苏、英、法等四个国家建成了 10 座核电厂，机组容量为 3~210 MW，总容量为 859 MW。

1961—1969 年为第二阶段，即实用化阶段，除上述四国外，其他一些发达国家如西德、日本、加拿大、比利时和瑞典等国也加入了发展核电的行列，最大机组容量达 608 MW，总容量已增至 12 230 MW。

1969 年至 20 世纪 70 年代末为第三阶段，即大发展阶段，当时核能发展深受世界各国的普遍重视，核能被一些工业发达国家视为迅速取代石油能源的希望。以美国为首的一些发达国家竞相发展核电，都制订了庞大的核电长远规划。核电技术本身也日趋成熟，尤其是轻水堆（压水堆和沸水堆）电厂获得更大规模的发展，成为核电的主导力量。这一时期基本上形成了以轻水堆为代表的当代的核电水平和规模。

但是，自 20 世纪 80 年代以来直到 21 世纪初，世界核电发展却进入了另一阶段，即低潮阶段，衰退首先是从美国开始，出现衰退原因的一个方面是由于当时严重的经济危机使世界经济衰退，对电力在内的各种能源的需求减缓，造成电力容量过剩，核电和火电一样大批订货被取消。更重要的原因是 1979 年美国三哩岛核电厂发生了严重核事故和 1986 年苏联切尔诺贝利核电厂发生了更严重的核事故。

1979 年 3 月 28 日，美国三哩岛核电厂 2 号机组发生严重核事故。事故时机组满功率运行，事故的起因是主给水泵和汽轮机停运，阻断了主回路系统的热量输出，控制系统自动停止核反应堆，并在 15 秒后启动三台辅助给水泵。但两台辅助给水泵出口阀两天前检修时被关闭，结果没有冷却水带走反应堆传给蒸汽发生器的热量，造成蒸汽发生器烧干之后，核反应堆开始升温升压，为保护主回路不受损害，卸压阀自动启跳，排汽减压。但反应堆泄压阀卸压后没有回坐，造成反应堆失水，这一状态持续了 2.5 小时。在失水工况下安全注射系统自动投入，但操纵员误判主回路水量过多，2 分钟以后关闭了这个系统。由于堆芯长时间失水，燃料棒裸露，包壳材料锆合金在高温下熔化，并和水发生锆水反应，产生氢气，造成氢爆的潜在风险，最后堆芯大部分损毁。三哩岛核事故引起公众极大惊慌，一时间有数以十万计的居民被通知撤离或驾车逃离。实际上，这次事故由于安全壳的屏障作用，释放到厂区以外的放射性物质是很有限的。80 km 半径内，人群集体剂量估计为 $33 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ ，这一剂量可能在事故后 30 年内仅引起一例癌症致死。三哩岛事故说明压水堆安全壳设计是非常成功的，作为防止放射性外逸的最后一道屏障，起到了重要作用。

相比之下，1988 年 4 月 26 日切尔诺贝利核事故要严重得多。切尔诺贝利核电厂 4 号机组是石墨慢化沸水冷却压力管式反应堆，电功率为 1 000 MW，为苏联所独有。该堆型在设计上存在一定缺陷，在一定运行工况区间内堆芯功率与温度存在正反馈特征。事故由例行试验所触发，由于操作员操作不当，最终造成反应堆功率骤增，在几秒钟的时间中反应堆和整座建筑物被摧毁，大约 8 t 强放射性物质直接排放到大气中。这次事故使大量居民受到大剂量照射，5 km 半径内 45 000 人撤离，30 km 以内 90 000 人撤离。撤离人员医学检查表明，集体剂量为 $16 \text{ 000 人} \cdot \text{Sv}$ 。欧洲有关国家集体剂量总数估计为 $1.8 \times 10^{15} \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ ，苏联 $5 \times 10^5 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 。事故造成核电厂周围 6 万 km^2 土地受到直接污染，320 万人受到辐射影响。

美国三哩岛核电厂虽未造成重大伤亡，但却带来了巨大的心理与社会舆论的冲击。而

切尔诺贝利核事故造成了人员伤亡及大面积环境污染,更增加了恐核情绪,核电遭到一些国家公众的非议,许多国家取消或减缓了核电发展计划。20世纪70年代末期以来,美国约有100座总装机容量近1亿kW的核电订货被取消。不少人对核电前景产生怀疑,核电发展暂时进入了低潮。

虽然,1979年以来核电进入低潮,但并不是像一些人们所误解的那样,认为核电发展已经是停滞不前或倒退了。统计数字否定了这种说法。总的来说,情况恰恰相反,在这个时期不但核电在世界能源中的比重和地位仍然在逐步提高,而且在各种能源中增长速度是最快的,只不过是增长速度比前一阶段减慢了。从1979—1987年间世界一次能源的总消费量以及各种能源的消费量和相对比例的变化情况看,1987年世界一次能源总消费量达78.11亿t油当量,比1986年增加2.8%;各种能源中,核电增长最快,年增长率达7.2%,与石油输出国组织提高油价前的1979年比较,1987年世界能源消费量增加了12.3%,其中煤增加了21.2%,而核电则增加了160%,其增长幅度是最大的。

同时,20世纪70年代开始的核能发展的减缓并不等于它在世界范围的普遍衰落。一些国家,如法国、日本、韩国等仍坚持发展核电。1973年美国核电厂订货大批退货时,法国政府却决定,1976年后只建核电厂不再建火电厂。此后法国核电高速发展,核电占总发电量的比例迅速增长,1990年核电已占总发电量的74.5%,韩国1978年建成第一座600 MW压水堆核电厂后,到1991年核电容量已超过7200 MW,占总发电量的47.5%。两次核事故虽大大影响了核动力的发展,但从事故以后全世界仍建成约98 GW的核电厂。从世界范围来看,这一时期,核电比例仍然稳步地增长。

21世纪初,核电在世界范围内又迎来新的春天。2001年,美国牵头会同英国、瑞士、韩国、南非、日本、法国、加拿大、巴西和阿根廷10国及欧洲原子能共同体共同成立了第四代核能系统国际论坛(Generation IV International Forum, GIF)并签署了《宪章》,其宗旨是研究和发展第四代核能系统,预计在2030年前投入使用。上述10个国家正式成为GIF成员国。此外,国际原子能机构、经济合作与发展组织核能署是GIF观察员。在GIF成立之后,第一阶段工作主要是评估第四代核能系统的概念设计。2002年底,GIF和美国能源部联合发布了《第四代核能系统技术路线图》,选出超临界水冷堆、气冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆、钠冷快堆和超高温气冷堆六种堆型,作为GIF未来国际合作研究的重点。

2007年5月,由中、美、法、日、俄五国共同创立全球核能合作伙伴(Global Nuclear Energy Partnership, GNEP),旨在通过建立新的多边国际合作机制,采取安全、可靠、防止核扩散的方式,推动先进核能技术联合研发,促进核能在全球的发展。也就是由拥有核技术的国家为准备引进核技术的发展中国家等提供铀燃料并负责进行后期处理,其目的在于防止核物质的扩散。GNEP将积极面对20世纪后半叶阻碍核电全面发展的两个关键问题,即如何以负责任的方式在保障全球安全的条件下利用敏感技术和如何安全处理处置核废物,在保障能源安全、环境安全及世界范围内的核安全的基础上,推动核能在世界范围内的进一步发展与利用。GNEP关注的焦点是克服这些发展中的障碍,通过世界核能技术发达国家的合作,促进先进核反应堆及先进核燃料循环技术的进步,为“合作伙伴国”的核电发展提供安全的、有保障的反应堆技术及相应的核燃料服务,同时减少核扩散的风险。

2011年3月11日，日本福岛第一核电厂发生了严重的放射性外逸事故。事故的起因是强烈地震引发的海啸。高度达14 m的海水越过5.7 m的海堤，淹没了应急柴油机发电系统及其他冷却系统，核电厂处于全厂断电事故状态。虽然地震后反应堆实现了自动停堆，但堆芯内余热使堆芯温度上升，压力升高，卸压阀开启，排放蒸汽，液位下降，燃料棒裸露、熔毁。燃料棒温度达到1 000 ℃以上时，锆合金包壳与水发生锆水反应，释放氢气，这种放热反应进一步加热了堆芯。氢气混合有蒸汽从压力壳进入混凝土安全壳和上部的服务层的钢结构建筑物，产生了一系列的氢爆：1号机组3月12日发生两次氢爆，3月14日3号机组发生氢爆。2号反应堆的堆芯排出系统运行了较长时间，3月14日才停运，次日发生3次氢爆。由于反应堆三道安全屏障相继贯穿，放射性物质直接向大气排放，严重污染了厂区和周围地区的环境。

福岛核事故后，世界各国对核电发展态度不一。很多国家宣布对核电项目进行全面检查，包括德国在内一些欧洲国家宣布了放弃核电的计划，但更多的国家包括美国、法国和中国等仍然坚持发展核电。特别是美国核管理委员会（NRC）2012年2月9日宣布批准美国南方电力公司的 Vogtle 3 号和 4 号两台 AP1000 核电机组的建造和运行联合许可证（COL）。这是美国自三哩岛事故以后，34 年来首次批准建设新的反应堆，世界核能协会甚至称 2 月 9 日“当天是历史性的一天，将开启核能的新时代”。

目前世界范围内核电装机容量如表 1-2 所示。

表 1-2 世界各国核电装机容量表

国 家	机组数	总净电负荷/MW
阿根廷	3	1 627
阿美尼亚	1	375
比利时	7	5 921
巴西	2	1 884
保加利亚	2	1 926
加拿大	19	13 500
中国	33	28 057
捷克	6	3 904
芬兰	4	2 752
法国	58	63 130
德国	9	12 074
匈牙利	4	1 889
印度	21	5 308
伊朗	1	915
日本	43	40 290
韩国	24	21 677

续表

国 家	机组数	总净电负荷/MW
墨西哥	2	1 330
荷兰	1	482
巴基斯坦	3	690
罗马尼亚	2	1 300
俄罗斯	34	24 654
斯洛伐克	4	1 814
斯洛文尼亚	1	688
南非	2	1 860
西班牙	7	7 121
瑞典	10	9 651
瑞士	5	3 333
乌克兰	15	13 107
英国	16	9 373
美国	99	98 639
总计	438	379 261

注：数据截至 2015 年 7 月 1 日，数据来源：国际原子能机构 IAEA 动力堆信息系统。

国际原子能机构（IAEA）每年发布关于核电发展的低值和高值预测。他们考虑了未来几十年内所有运行中反应堆可能的牌照续期、计划停堆和合理性建设项目等相关情况。他们根据每个项目的具体情况分别进行低值预测和高值预测，最终得到完整的预测结果。发布的 2011 年年度预测数据（如图 1-1 所示）将日本福岛核事故产生的影响也考虑了进去。在低值预测中，世界核电装机容量将从目前的 3.67 亿千瓦增长到 2030 年的 5.01 亿千瓦，较 2010 年的预测值降低 8%。在高值预测中，世界核电装机容量到 2030 年将增长到 7.46 亿千瓦，较 2010 年预测值降低 7%。在低值预测中，世界在运核电机组数量将在 2010 年底 441 台基础上到 2030 年共增加 87 台（新建 254 台，退役 167 台）。在高值预测中，世界在运核电机组数量到 2030 年将增加 348 台（新建 440 台，退役 92 台）。其中大部分新建机组来自已经拥有核电厂的国家。

预测增长最快的地区是远东地区。在低值预测中，远东地区核电装机容量从 2010 年底的 0.81 亿千瓦增长到 2030 年的 1.80 亿千瓦，在高值预测中到 2030 年将增长到 2.55 亿千瓦。这一数据较 2010 年的预测值分别降低了 0.17 亿千瓦和 0.12 亿千瓦。

低值预测假设现有发展趋势得到持续，影响核电发展的政策没有较大变化。但是这并不意味着所有国家核电发展目标都能实现，这是一个“谨慎但较为合理”的预测。高值预测假设经济危机将在较短时间内得到缓解，并且经济增长和电力需求得到恢复，尤其是在远东地区。同时还假设了更为严格的全球减缓气候变化相关政策。

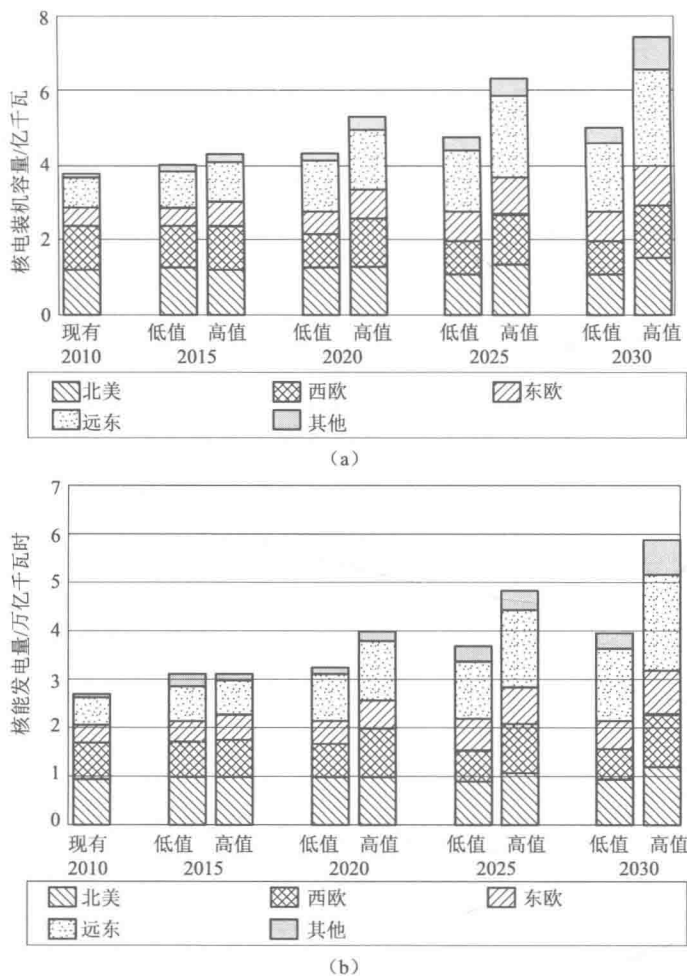


图 1-1 国际原子能机构 (IAEA) 关于核电发展预测
(a) 高值预测; (b) 低值预测

§ 1.3 核能在我国能源发展中的战略地位

与世界能源状况相比，我国能源有其特殊的矛盾和特点。这主要表现在两个方面：一是在能源结构方面，突出特点是以煤为主体，油和天然气资源不丰富。在一次能源消费中，历年来都是煤占绝对主导地位，约占能源消费量的 70% 以上，是世界平均值的 2.5 倍，美国的 3.3 倍。表 1-3 给出了 2011 年我国现状。可以发现电力能源结构也是以煤为主，煤电约占发电总量的 83%。第二个特点是能源分布与工业布局的不平衡，而且正好相反。根据技术、经济发展和地理条件，可把我国划分为东、中、西三大地带。能源资源主要集中在西部。煤炭主要在西北部，京广线以西，从秦岭到大别山以北占全国总量的 88%，尤其是集中在黄土高原和鄂尔多斯高原（晋、陕、蒙），占全国 2/3。水能资源则 2/3 集中在西南地区。而东部沿海地带包括辽宁、河北、山东、江苏、浙江、福建、广