

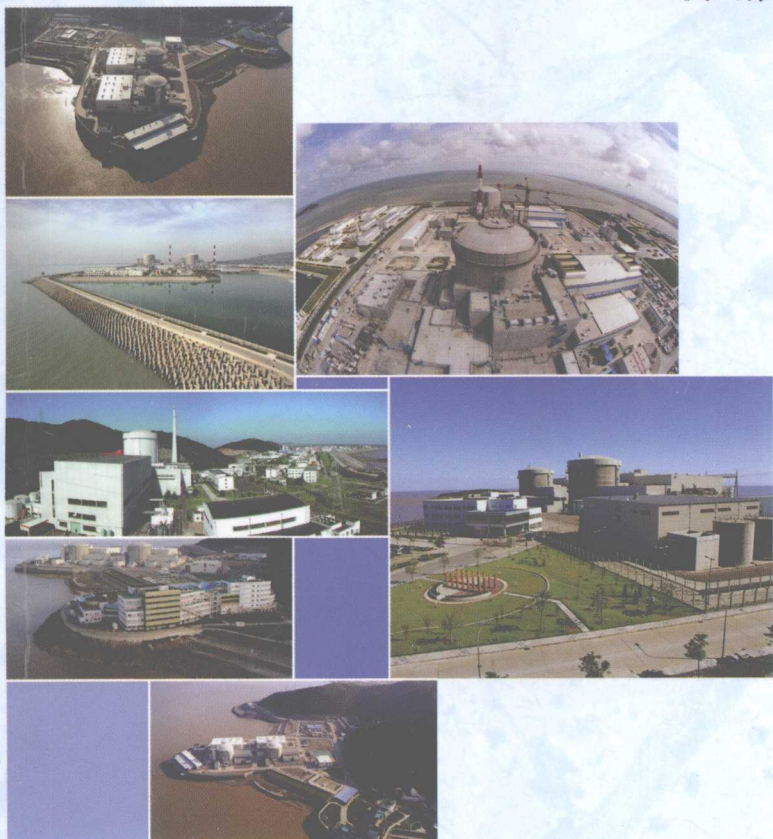
世界核电复兴的里程碑

中国核电发展前沿报告

A Milestone of the Nuclear Power Renaissance in the World

王秀清 编著

沉默观望的欧洲 雄心勃勃俄罗斯
准备复兴的美国 曙光乍现的亚洲



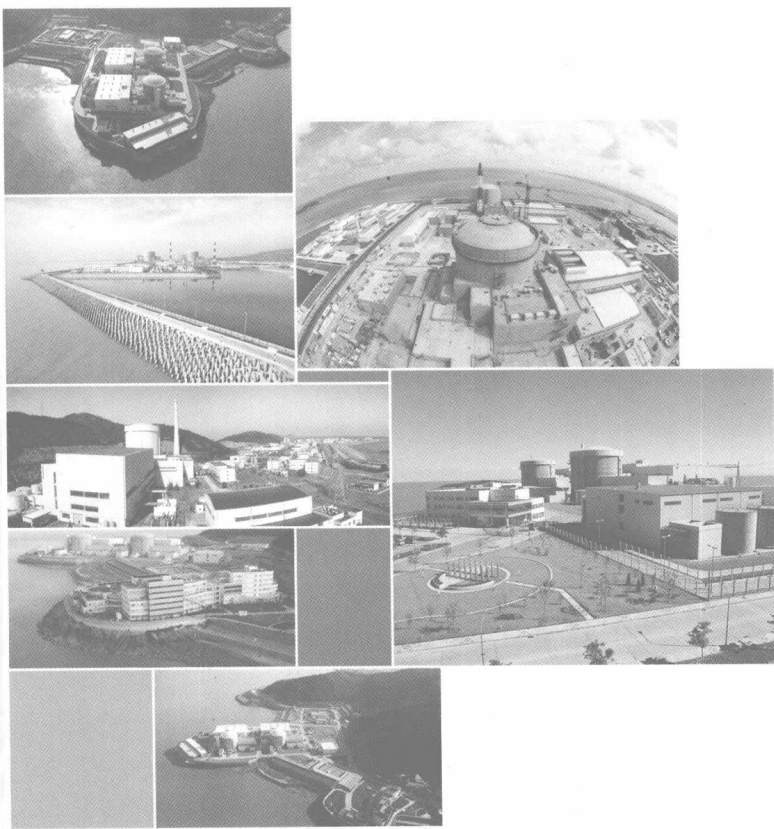
科学出版社
www.sciencep.com

世界核电复兴的里程碑

中国核电发展前沿报告

A Milestone of the Nuclear Power Renaissance in the World

王秀清 编著



科学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

世界核电复兴的里程碑——中国核电发展前沿报告/王秀清编著.
—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020312-0

I. 世… II. 王… III. 原子能工业-经济发展战略-研究-中国
IV. F426.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第020592号

责任编辑:侯俊琳 宋 旭/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/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>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

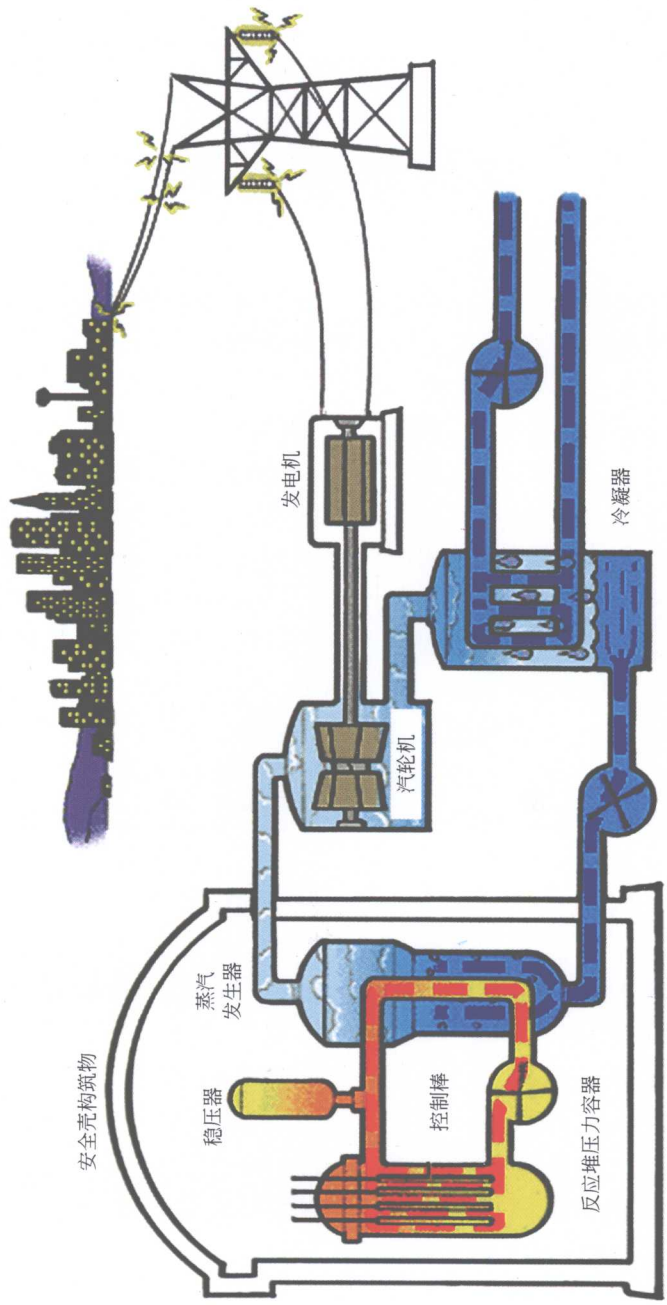
2008年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年2月第一次印刷 印张:20 1/2 插页:2

印数:1—3 000 字数:403 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈长虹〉)



核电站把核裂变产生的热能变成电

资料来源：U.S.NRC. View an Animated Image of a Pressurized Reactor

核能发电简介

反应堆压力容器：压力容器内，反应堆堆芯核燃料铀²³⁵裂变链式反应产生的热量，由流经堆芯的冷却剂输送出压力容器。堆芯内，控制棒维持或终止核链式反应，控制堆芯热量生成。

反应堆冷却剂系统（一回路；红黄色）：如图，包括反应堆压力容器、冷却剂泵、蒸汽发生器、管道，接到一个环路上用于控制系统压力的电加热式稳压器。反应堆冷却剂泵唧送冷却剂通过堆芯，把核裂变产生的热量带出。加热的冷却剂从反应堆压力容器出来，经过冷却剂环路的管道送到蒸汽发生器。反应堆冷却剂热量通过传热管的管壁传给二回路水以产生蒸汽。然后反应堆冷却剂通向反应堆冷却剂泵入口由泵唧送到反应堆压力容器，完成循环。

动力转换系统（二回路；蓝色）：如图，动力转换系统始于蒸汽发生器壳侧，二回路给水与热的蒸汽发生器传热管接触得到热量而沸腾。U型传热管在一回路和二回路之间同时起屏蔽作用，是反应堆冷却剂系统压力边界。在蒸汽发生器壳侧产生的饱和蒸汽经过蒸汽管线通向主汽轮机，释放能量后进入主冷凝器。汽轮机驱动安装在同一个轴上主发电机。发电机产生电能输送给电力公司的配电网或高压输电网。在冷凝器中，乏蒸汽在冷凝管外表面冷凝成水，冷却用的电厂循环水从冷凝管内通过。冷凝水集中于冷凝器热阱内，冷凝水被升压泵升压成为给水，主给水泵再把它送往蒸汽发生器，给水在蒸汽发生器内沸腾，产生蒸汽，开始第二次循环。

清洁能源：核能是不产生温室气体的清洁能源。燃料元件、压力容器和安全壳是核电站防御放射性，为人员、社会和环境提供有效保护的三道屏障。

前 言

核电作为能源，在很多国家已被证明具有强大的生命力。2002年，全世界核电装机容量达到 363.8 GWe，核电提供了世界电力的 16.0%，核电站在 30 个国家安全运行。压水型核反应堆是全世界核电站主导堆型，也是中国已经运行和正在建造核电站的唯一反应堆堆型。本书第一章通过浏览世界各国压水型核反应堆的历史和现状，简述了压水堆核电技术发展背景。

到 2002 年全世界核电站已经累积了 10 803 堆·年的运行经验，很多国家为了进一步改进现有核电站性能和开发先进核电站设计，正在利用核电站积累的经验和科学技术的进步，推进核电项目的研究和开发。这种研究和开发面向全部核反应堆类型：水冷核反应堆、气冷核反应堆和液态金属冷却核反应堆。其目的是使核电在全球未来能源供应中发挥更重要的作用。

国际原子能机构（IAEA）在形势报告、座谈会与研讨会会议文集内，定期报告先进核反应堆设计和技术开发的全球趋势，向所有 IAEA 成员国提供关于核电站技术先进性的公正和客观信息。本书第二章部分内容引自上述文集的相关论述，并且把先进压水堆核电机组作为探讨中国未来核电技术路线的中心内容，重点讨论未来压水堆核电机组的发展。

本书在第三章，说明非能动型先进压水堆核电机组设计特点与其相关评价。第四章重点介绍美国政府复兴核电的新能源政策，以及美国政府和工业界合作开发轻水堆（ALWR）的战略大纲。在此基础上最后论述，AP1000 第三代加（Generation III +）非能动型先进压水堆核电站在我国具有发展优势，并提出我国未来核电发展的技术选择和建议。

本书的结论和建议代表了中国未来核电发展技术路线学术争论的一方观点。

由来已久的中国核电发展技术路线的学术争论，随着 2006 年 12 月 16 日中美两国政府签署《中华人民共和国和美利坚合众国政府关于在中国合作建设先进压水堆核电项目及相关技术转让的谅解备忘

录》，画上了完美的句号。

1973年，世界性石油危机爆发，促使了以美国为首的西方国家核电工业的兴起。20世纪80年代全世界共有218台核电机组投产，平均每17天就有一台核电机组建成。然而由于种种原因，从20世纪80年代中后期开始，世界核电站建设进入了萧条时期。以美国为例，至今没有建造新核电站，现有核电站也逐步达到设计寿期，核电工业在美国被形容为“一条腿和脚已经跨进坟墓”。

进入21世纪，世界核协会（WNA）认为，2015年世界能源需求将是1980年的两倍。为了保护环境，避免石化能源发电从而减少温室气体排放，核电是世界各国清洁能源的理想选择。世界核协会预言2015年全世界平均每5天将有一台1000 MWe核电机组投产。

谅解备忘录的签署标志着世界先进压水堆核电站规模化建设高潮的到来，中国为世界应用新一代压水堆核电机组开了先河。

根据国家发展和改革委员会的中国核电发展规划，2020年中国将新建30台1000MWe核电机组。从现在开始中国每年将至少有3至4台新核电机组开工建设，世界核电复兴首先在中国出现。

虽然美国政府在21世纪初，就提出了核电复兴政策，但是在美国核电复兴迟迟没有到来。今天在世界东方的中国，则露出核电复兴的曙光，本书论述了世界核电复兴在中国出现的理由。

让我们张开怀抱迎接全球核能发电新纪元的到来！

目 录

前言

第一章 世界压水堆核电站概览	1
第一节 压水堆核电站的分类	3
一、PWR	6
二、WWER	6
三、PHWR	10
四、GMLWR	10
第二节 各国发展压水堆核电站的技术路线	12
一、美国	13
(一) 核能技术发展历程	13
(二) 运行核电站现状	15
(三) 运行核电站监督	23
二、法国	30
(一) 压水堆核电站现状	30
(二) 压水堆核电站运行管理	35
三、日本	41
(一) 核能政策	41
(二) 压水堆核电站的发展和现状	43
四、韩国	50
(一) 核电发展历程	50
(二) 核电站现状	51
五、加拿大	53
(一) CANDU 堆型发展概况	53
(二) CANDU 堆型核电站特点	54
六、俄罗斯	56
(一) 核电站概况	56
(二) 苏联核电站设计简介	61
七、中国	67
(一) 秦山核电站	67

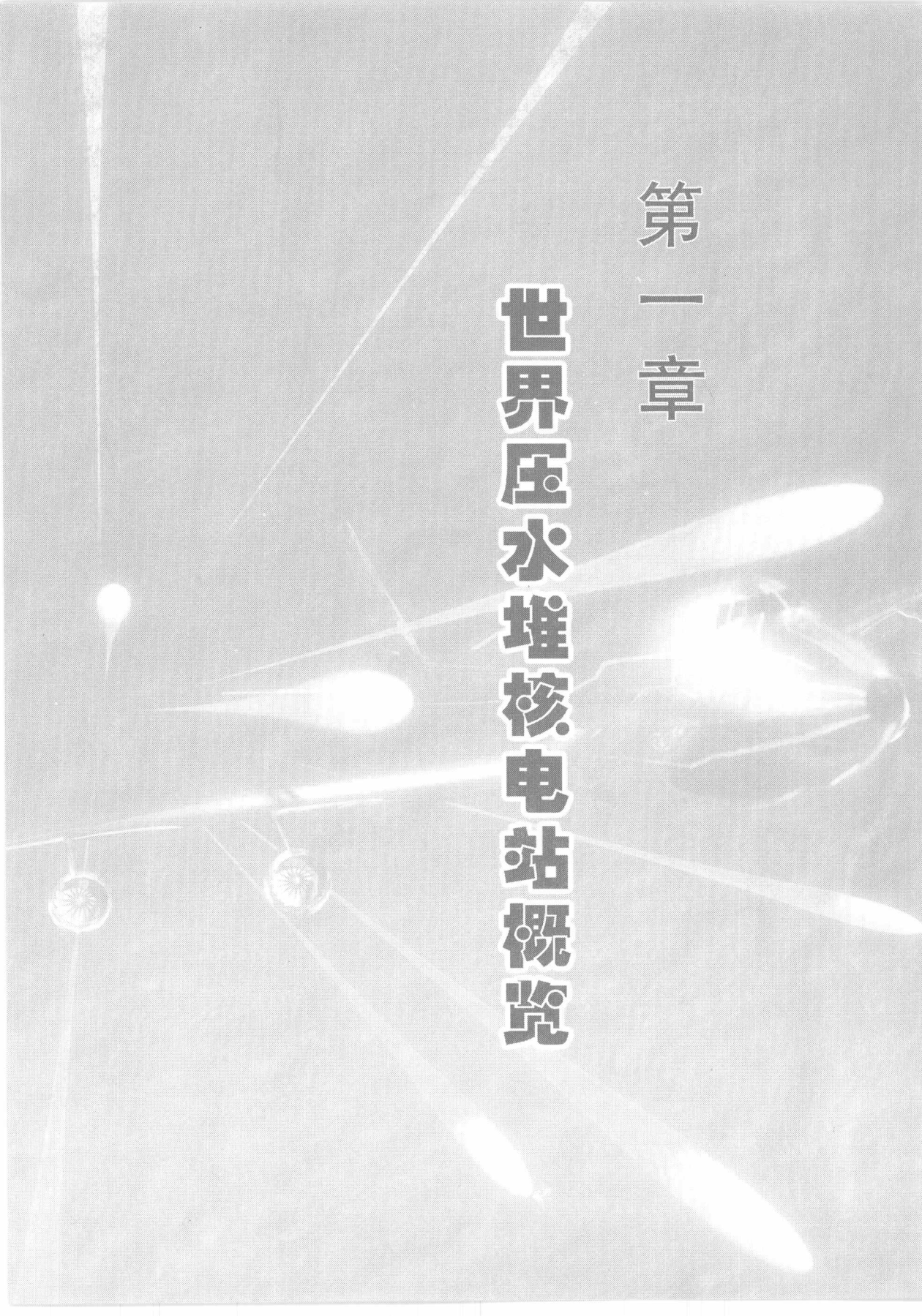
(二) 秦山二期核电站	68
(三) 秦山三期核电站	69
(四) 大亚湾核电站	69
(五) 岭澳核电站	70
(六) 田湾核电站	70
(七) 核电站现状分析	72
第二章 先进压水堆核电站开发综合分析	75
第一节 引论	77
一、未来核电站开发目标	77
(一) 使未来核电站具有经济竞争性	77
(二) 使未来核电站具有更高安全水平	78
二、全球开发先进核电站设计的总体展望	79
(一) 先进设计	80
(二) 改进型设计	80
(三) 革新型设计	81
第二节 核电当前状况和未来潜力	81
一、核电应用现状	81
二、核能未来展望	82
三、技术储备	83
四、经济竞争性	84
五、核电和持续开发	84
六、公众可接受性	85
第三节 先进压水堆设计和技术发展趋势	85
一、先进压水堆设计开发	85
二、革新型轻水堆开发展望	88
三、降低建造成本和缩短建造时间	89
(一) 降低成本和缩短建造时间的常用方式	89
(二) 减少建造周期的重要性	89
(三) 标准化和建造系列化能做到显著节约成本	90
第四节 先进轻水堆安全目标和用户要求	91
一、IAEA 的安全目标和要求	91
二、先进轻水堆的用户要求	96

(一) 用户要求文件产生的历史回顾	96
(二) EPRI 用户要求文件 (URD)	96
(三) 欧洲用户要求文件 (EUR)	98
(四) 日本用户要求文件 (JURD)	99
(五) 韩国用户要求文件 (KURD)	99
(六) 中国改进型核电站用户要求文件 (CURD)	99
(七) 高端用户要求	100
第五节 不同类型先进压水堆的开发	106
一、改进型 (evolutionary) 先进压水堆核电机组	106
(一) 美国 System 80 +	106
(二) 法国 EPR	111
(三) 日本 APWR	117
(四) 日本 APWR +	128
(五) 韩国 KSNP +	133
(六) 韩国 APR1400	138
二、非能动型 (passive) 先进压水堆核电机组	148
(一) 概述	148
(二) 先进非能动型系统	157
(三) 非能动型系统提高安全性	159
第三章 非能动型先进压水堆核电站设计分析评价	161
第一节 设计简述	163
一、设计准则、运行特点和安全考虑	165
(一) 核电站总体设计	165
(二) 反应堆冷却剂系统设计	167
(三) 蒸汽和动力转换系统设计	170
(四) 辅助流体系统设计	171
(五) 电力和控制系统设计	172
(六) 核电站布置和建造	174
二、厂址	175
(一) 厂址特点	175
(二) 厂址平面图	175
三、核电站布置	177
四、核岛	178
(一) 安全壳厂房	178

(二) 屏蔽厂房	180
(三) 辅助厂房	182
五、附属厂房	184
(一) 厂房特点	184
(二) 民用建筑特点	184
六、柴油发电机厂房	184
(一) 厂房功能	184
(二) 民用建筑特点	185
七、放射性废物厂房	185
(一) 厂房功能	185
(二) 民用建筑特点	185
八、汽轮机厂房	185
(一) 厂房功能	185
(二) 民用建筑特点	186
第二节 与常规压水堆核电站参数比较	186
第三节 法规要求符合性的分析评价	190
一、法规和导则	190
(一) 管理导则分册 1 动力反应堆	191
(二) 管理导则分册 4 环境和厂址	191
(三) 管理导则分册 5 材料和电站防护	191
(四) 管理导则分册 8 职业保健	191
二、三哩岛问题的处理	192
(一) 主回路功能保护	192
(二) 安全保护系统	196
(三) 管理程序	207
三、未解决安全问题和通用安全问题的处理	210
(一) 未解决安全问题和通用安全问题的 NRC 清单审查和选 用原则	210
(二) 未解决安全问题和通用安全问题的选用和解决的项目 清单	211
四、先进轻水堆许可证问题	213
(一) 反应堆安全顾问委员会 (SECY-90-016) 的问题	213
(二) 其他改进型和非能动型设计问题	216
(三) 非能动型设计问题	217

(四) 附加的许可证申请问题	218
第四节 两种类型先进压水堆核电站综合评价	219
一、革新项目和性能指标	219
二、改进型和非能动型	220
(一) 两种不同的设计理念	220
(二) 安全系统特点不同	221
(三) 成熟技术	231
三、综合分析评价	232
(一) 世界进入建造先进压水堆核电站的时代	232
(二) 改进型和非能动型代表不同功率级别	233
四、AP1000 是具有发展前景的第三代压水堆核电站	233
第四章 中国压水堆核电站选型和开发	237
第一节 核反应堆代别划分与发展	239
第二节 美国、日本开发先进轻水堆战略规划	243
一、美国	243
(一) 政府面临建设新核电站的挑战	243
(二) 轻水反应堆研究和开发战略大纲	253
(三) 政府建设新核电站的近期举措	266
(四) 核电工业界新的建造项目	268
(五) 近期几个先进反应堆设计	269
二、日本	281
(一) 先进轻水反应堆开发	282
(二) 三菱重工先进反应堆开发规划	283
(三) IMR 项目	284
第三节 中国未来核电站发展的建议	287
一、压水堆核电站技术现状	287
二、AP1000 在我国具有发展的优势	288
(一) 美国核电复兴的主要障碍	288
(二) AP1000 在我国具有发展的优势	290
三、未来核电站堆型选择考虑的因素	294
(一) 第三代核电站	294
(二) 标准化原则	294
(三) 国际合作开发先进轻水堆核电站	294
(四) 开发未来先进轻水堆的两条技术路线	295

四、根据国情选择适合发展的堆型	295
五、中国未来核电站发展的建议	297
(一) 近期和远期目标	297
(二) 政府指导	298
(三) 国际合作	299
(四) 组建先进核电站开发公司	299
参考文献	301
附录 核电中长期发展规划 (2005 ~ 2020 年)	305
后记	318

The background of the page is a dark, textured grey with several bright, glowing light trails and circular patterns. These elements are arranged in a way that suggests a complex, interconnected system, possibly representing a network or a data flow. The light trails are of varying lengths and orientations, some appearing as straight lines and others as curved paths. The circular patterns are also of varying sizes and are scattered across the page, some appearing as solid circles and others as faint, glowing outlines. The overall effect is one of dynamic energy and technological sophistication.

第一章

世界压水堆核电站概览

本章重点讨论美国、法国、日本、韩国的压水核反应堆的发展历程及其运行管理方式，用以阐明世界压水堆核电站的现状。

第一节 压水堆核电站的分类

广义压水堆核电站的核反应堆可以解释为用加压水（轻水或重水）冷却的核反应堆。压水堆核电站的类型区别，也仅在于核电站一回路和反应堆堆芯结构的不同。经历了五十年的发展和改进，目前全世界商业运行压水堆核电站主要有 PWR、WWER（VVER）、PHWR 和 LGR 四种类型。根据反应堆堆芯结构和设备的不同，前两种称为“压力壳式”核反应堆，后两种称为“压力管式”核反应堆。根据反应堆中子慢化剂类型的不同，西方模式 PWR 和苏联 WWER 称之为加压轻水堆 PLWR，或是称为加压轻水冷却、轻水慢化反应堆，统称压水堆 PWR；PHWR 为重水慢化重水冷却反应堆，称之为加压重水堆，简称重水堆；LGR 或 GMLWR 为轻水冷却石墨慢化反应堆，简称石墨慢化轻水堆。

压水堆核电站生产的电能和装机总容量在世界各种类型反应堆核电站中占的比例最大，装机容量约占世界核电站装机总容量的 2/3 以上。

核电技术是成熟的，并且在过去二十年取得了极大地进步，主要表现在核电站容量因子不断提高。容量因子（总）是一定时间段核电站总发电量（包括厂用电）与相同时间段核电站额定功率连续发电总量之比。容量因子是核电站设备性能、质量、运行、管理等诸多因素的综合反映。

核电站类型、各国核电机组、各国核电占发电量百分比和世界核电站平均

总容量因子如表 1-1、表 1-2、图 1-1a 和图 1-1b 所示。

表 1-1 世界核电机组堆型一览表

(截至 2002 年 12 月 31 日)

堆 型	运行机组	运行净功率/MWe	全部机组	全部净功率/MWe
压水堆(轻水)(PWR)	262	236 236	293	264 169
沸水堆(轻水)(BWR)*	93	81 071	98	87 467
各种气冷堆(GCR)*	30	10 614	30	10 614
各种重水堆(PHWR)	44	22 614	54	27 818
石墨慢化轻水堆(GMLWR/LGR)	13	12 545	14	13 470
液态金属快中子增殖堆(LMFBR)*	2	793	5	2 573
合计	444	363 844	494	406 136

* 非广义压水堆核电机组。

表 1-2 世界各国(地区)核电机组对照表

(截至 2002 年 12 月 31 日)

国家/地区	运行机组	运行净功率/MWe	全部机组	全部净功率/MWe
阿根廷	2	1 018	3	1 710
比利时	7	5 680	7	5 680
巴西	2	1 901	3	3 176
保加利亚	4	2 722	4	2 722
加拿大	22	15 113	22	15 113
中国	7	5 426	11	8 764
中国台湾	6	4 884	8	7 584
捷克	4	1 648	6	3 610
芬兰	4	2 656	4	2 656
法国	59	63 203	59	63 203
德国	20	22 594	20	22 594
匈牙利	4	1 755	4	1 755
印度	14	2 548	22	6 128
伊朗	0	0	1	915
日本	53	44 041	58	48 883
立陶宛	2	2 370	2	2 370
墨西哥	2	1 364	2	1 364
荷兰	1	452	1	452
朝鲜	0	0	2	2 000
巴基斯坦	2	425	2	425
罗马尼亚	1	655	5	3 135
俄罗斯	27	20 799	33	26 074
斯洛伐克	6	2 512	8	3 392
斯洛文尼亚	1	656	1	656
南非	2	1 800	2	1 800
韩国	18	14 970	22	18 970
西班牙	9	7 565	9	7 565