



高等院校理工类规划教材

Atomic Energy and
Nuclear Power Plants
核电与核能

◎ 朱 华 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

Atomic Energy and Nuclear Power Plants

核电与核能

朱 华 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内容简介

能源是人类生存与文明的基础,核能利用体现了国家经济、工业和科技的综合实力与水平。核电是一种有效的清洁能源,受到世界各国的重视。本书主要介绍了世界核电工业的现状和发展情况、核电厂工作原理、核反应堆的物理及工程基础知识、压水堆核电厂的系统和设备、核电厂的控制与运行、安全性、我国的核安全法规体系、核辐射防护基础知识、各种型式的核电厂和核供热厂的发展和改进、核能的其他应用技术等。

本书内容丰富系统,体系简明扼要,图文并茂、通俗易懂,既可以作为高校能源类及其他相关专业学生的核电课程教材,也可以为专业人员及其他有兴趣的读者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

核电与核能 / 朱华编著. —杭州:浙江大学出版社,
2009.10
(高等院校理工类系列教材)
ISBN 978-7-308-07065-2

I. 核… II. 朱… III. ①核电工业—高等学校—教材
②核能—高等学校—教材 IV. TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 170503 号

核电与核能

朱 华 编著

责任编辑 杜希武

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州好友排版工作室

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10

字 数 243 千

版 次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-07065-2

定 价 20.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

经济和社会的发展使人类对赖以生存的有效能源和清洁能源的需求日趋迫切。核能是一次能源的重要组成部分,并且存量丰富、极具规模。核电作为一种安全、有效的清洁能源,已为人类所驾驭,目前全球的核发电量已占世界总发电量的 $1/6$,有 16 个国家和地区的核电比例超过 $1/4$,最高接近 80%,世界核电站累计运行已超过 1 万堆·年,掌握核电技术的国家基本上都拥有较强的工业、经济和科技实力。

我国也已经建成和正在建设多座核电站,核电规模迅速扩大,成为我国能源工业的重要支柱之一,核电已进入了发展的“快车道”。为适应这一发展形势,培养与核电相关的管理、设计、制造、生产、控制、运行等各方面人材,向能源类学生和其他理工类、甚至人文管理类学生开设核电课程,使他们了解核电工业的发展情况、核电厂的工作原理、各种核发电和核供热系统的设备和运行、核安全知识、我国的核安全法规体系以及核能利用等相关知识内容,显得十分必要。

回顾 1983 年,我国秦山核电一期工程破土动工,作者也是从这段时间开始接触核电,跟随老师多次参观秦山核电工地和建成后的核电站,从学生到教师一步步走来,与核电共同成长。1994 年开始接手主讲核电课程,每年都有不少学生来选,少时四五十人,多时近百人,一门小小的专业选修课即使在核电发展的困难时期也受到了学生的支持和欢迎,令人倍受鼓舞和感动,时光荏苒,一晃竟已过了十六年。本书是在作者多年的授课讲稿和教学讲义的基础上逐渐丰富完善起来的,包含了近几年的一些新资料和新技术。

本书内容主要分七章:第一章介绍核电工业的地位与发展情况,包括各国核电状况、核能与核电发展史、核电站的基本原理、种类与特点等;第二章是核反应堆的物理、工程与热工基础,包括核物理基础、反应堆临界条件、功率分布、燃料燃耗、传热过程等;第三章是压水堆核电厂的主要设备与系统,包括一回路主要设备、一回路主要辅助系统、二回路主要设备与热力系统等;第四章是核电厂的控制和运行,包括反应堆控制原理、运行特性和运行模式、各种类型核电厂的控制等;第五章介绍核电厂的安全性,包括核辐射的种类、计量单位、辐射危害及其防护、安全措施与法规、保护、监测与检测系统、应急计划与事故分析、厂址选择、三废处理等;第六章介绍各种型式的核电厂和核供热厂,包括先进的压水堆、沸水堆、重水堆、高温气冷堆、快堆、供热堆和聚变堆等;第七章介绍一些核能的其他应用技术,旨在拓展学生眼界,丰富有关知识,包括一些核分析技术和应用技术,如勘探、加工、工业仪表、医用技术、农业应用、核动力和武器、核电池和微型核电站等。

在本书完成之际,作者首先要感谢尊敬的老师屠传经教授,是他引导作者跨入了核电的

门槛,以他丰富的教学经验、专业的核电造诣、高超的学术水平以及严谨的治学态度全方位传道授业,使作者获益良多,是他开设了核电课程,经过多年讲授后又亲手将这门课的教鞭传授给作者,使作者在较早的时期就有幸涉入该领域。同时也要感谢浙大出版社的支持和杜希武编辑辛勤而细致的工作,使本书有机会得以出版问世。作者最后还要感谢同事、家人在工作和生活各方面所给予的鼓励和帮助,使本书能够顺利完成。

因作者水平有限,书中错误与不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

朱 华

2009年7月于浙大求是园

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 能源状况概述	1
1.2 核电的地位及优越性	2
1.3 世界核电站发展概况	6
1.4 中国核电工业的发展	10
1.5 核电站的类型和工作原理	15
1.6 核电站的安全保障	18
1.7 核燃料工业体系	19
第 2 章 核反应堆的物理和热工基础	23
2.1 原子核反应和核能的产生	23
2.1.1 原子核的结构	23
2.1.2 放射性和放射性衰变	25
2.1.3 原子核反应和核能	28
2.1.4 核裂变反应	32
2.2 核反应堆的临界条件和热功率分布	33
2.2.1 中子的慢化与扩散	33
2.2.2 自持链式核裂变反应及其临界条件	35
2.2.3 反应堆内中子通量分布与热功率分布	37
2.3 反应堆核燃料的燃耗	38
2.4 核反应堆的热工基础	40
2.4.1 燃料元件的传热过程	40
2.4.2 反应堆内的临界热负荷	42
2.4.3 反应堆内的热量传输	44
2.4.4 核反应堆热工设计准则	46
第 3 章 压水堆核电厂	47
3.1 一回路系统概述	47
3.2 一回路系统主要设备	49
3.2.1 反应堆	49
3.2.2 主泵及主管道	55

3.2.3 稳压器	56
3.2.4 蒸汽发生器	57
3.3 一回路辅助系统	59
3.3.1 化学与容积控制系统(CVCS)	59
3.3.2 停堆冷却系统(余热导出系统 RHRS)	59
3.3.3 安全注射系统(SIS)	61
3.3.4 安全壳喷淋系统(CSS)	61
3.3.5 设备冷却水系统(CCWS)	62
3.3.6 公用水系统(SWS)	62
3.3.7 紧急公用水系统(ESWS)	62
3.4 二回路热力系统	63
3.4.1 二回路原则性热力系统	63
3.4.2 二回路热力系统	64
3.5 二回路系统的主要设备	67
3.5.1 汽轮机	67
3.5.2 汽水分离—中间再热器	68
3.5.3 冷凝器	69
3.5.4 发电机	69
3.5.5 厂用电系统	69
3.6 核电厂的热经济性分析	70
3.6.1 压水堆核电厂的效率	70
3.6.2 核电厂的主要技术经济指标	71
第4章 核电厂的控制和运行	72
4.1 核反应堆控制原理	72
4.1.1 瞬发中子和缓发中子	72
4.1.2 温度效应	73
4.1.3 反应堆控制原理	73
4.1.4 核电厂自动控制	75
4.2 各种类型核电厂的控制	76
4.2.1 压水堆核电厂的控制	76
4.2.2 重水堆核电厂的控制	80
4.2.3 沸水堆核电厂的控制	81
4.2.4 高温气冷堆的控制	82
4.2.5 钠冷快堆的控制	83
4.3 压水堆核电厂的运行	84
4.3.1 核电厂的稳态运行方案	84
4.3.2 压水堆核电厂的运行模式	85

第 5 章 核电厂的安全性	87
5.1 核辐射及其防护	87
5.1.1 核辐射的种类	87
5.1.2 辐射量及其单位	87
5.1.3 天然本底辐射	89
5.1.4 核辐射的危害与防护	90
5.1.5 原子弹的危害及后果	93
5.2 核电厂安全性的保证	94
5.2.1 核电厂设计的安全目标、原理和方法	94
5.2.2 压水堆核电厂的安全措施	95
5.2.3 核安全管理和相关法规	98
5.2.4 核电厂的厂址选择	99
5.3 核电厂安全保护与监测系统	101
5.3.1 反应堆安全保护系统	101
5.3.2 反应堆堆内和堆外检测系统	101
5.3.3 放射性监视系统	102
5.4 核电厂的事故分析	103
5.4.1 运行工况的安全分析	103
5.4.2 核事故分类	103
5.4.3 核事故应急计划	104
5.4.4 核事故分析	105
5.5 核电厂的三废处理	107
5.5.1 放射性废气的处理	108
5.5.2 放射性废水的处理	108
5.5.3 放射性固体废物的处理	108
第 6 章 各种型式的核电厂与核供热厂	110
6.1 先进压水堆核电厂	110
6.1.1 先进的堆芯设计	111
6.1.2 结构和系统的改进	112
6.1.3 第三代新型核能系统 AP-1000	113
6.1.4 中国先进堆 CNP1000 和 CNP1500	114
6.2 沸水堆核电厂	115
6.3 重水堆核电厂	117
6.4 高温气冷堆核电厂	120
6.5 中国快堆技术的发展	124
6.6 池式供热堆核供热厂	129
6.7 受控热核聚变反应堆	133

第7章 核能的其他应用技术.....	139
7.1 核分析技术	139
7.2 核技术的各种应用	140
7.2.1 放射性勘探	140
7.2.2 核工业仪表	142
7.2.3 辐射加工	142
7.2.4 农业核技术	143
7.2.5 医学核技术	144
7.2.6 核武器	144
7.2.7 核动力装置	147
7.2.8 核电池和微型核电站	148
重要大事记.....	149
参考文献.....	151

第 1 章 概 述

1.1 能源状况概述

能源是人类社会发展、生产技术进步的推动力,是人类生存与文明的基础。

世界各个发达国家的经验表明,经济发展取决于能源的开发和利用,人均能耗已成为衡量一个国家生产水平和生活水平的重要标志。经济越发达,对能源的需求量也越大;机械化、自动化水平越高,对能源的依赖性也越强。因此,能源的发展与其他生产的发展是成正比的,这一点又称为“能源超前规律”。

电力是一种重要能源,但它不是从自然界直接得到的,而是从煤炭、石油、水力、核能等转换而来的,因此被称为二次能源。电力因可以集中生产、便于输送和分配、易于转换成其他形式的能量、没有污染以及使用简便而在各种能源中占有特别重要的地位。

我国幅员辽阔,能源资源的总储量较大,但人均资源储量低于世界平均水平,分布也不太平衡。我国有丰富的煤炭和水力资源,煤炭的探明储量位居世界第三,水力资源的理论储量占世界首位,还有较丰富的石油和天然气,核能资源也比较丰富。在经济比较发达的华东、华南和东北沿海省市,电力需求量很大,但严重缺能,煤炭资源缺乏,可开发的水力资源也不足。近几年的冰雪灾害,更加凸显了我国电煤紧张导致的供电问题。

从长远的眼光看,煤、石油、天然气、水力等资源正在逐渐减少。按照现在的发展速度计算,未来几十年,石油、煤炭、天然气行将枯竭,同时煤电受到节能减排等方面的限制,风电、水电、太阳能、核电等清洁能源的发展迫在眉睫。发展核电是改善能源供应的最为有效的一条途径。

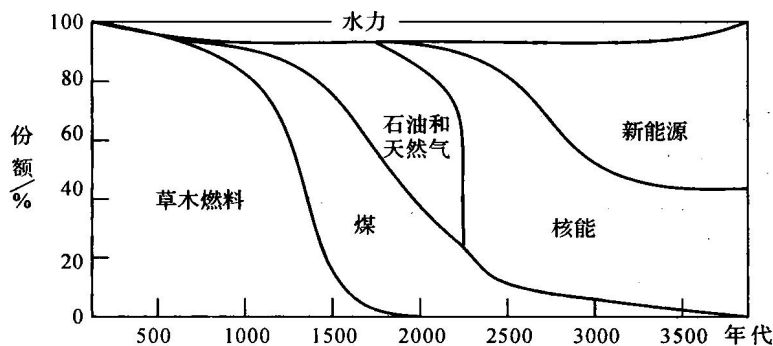


图 1.1 各个时代能源利用的变化趋势

我们如今面临着使用化石燃料带来的环境问题,而核能作为一种安全清洁能源,有助于突破能源、交通、环保瓶颈,是今后一段时期内能够切实解决能源稀缺问题的希望。核能是一次能源的重要组成部分,核电在能源价格上有优势,而且更稳定,因此它是除化石燃料之外能够提供大规模电力的清洁能源。只有核电可在短期内实现安全又经济的大规模工业化发电。如美国、英国、法国、日本、意大利等很多国家在上世纪 50 年代就建设了大批核电厂,约占世界总发电量的 16%。我国目前完全掌握了核电技术,已建成了多座核电站,具有大量核电人才,按照国家发展规划,2020 年核电发电量将达 1800 万千瓦左右,核电实现总装机容量要超过 7000 万千瓦,发电量占全国发电总量的 4%~6%。因此中国核电已经进入了快速发展之路,即将成为核电大国。

1.2 核电的地位及优越性

能源的利用在人类历史长河中起着划时代的作用。随着生产和科技的发展,人类逐步扩大了能源利用的范围。

在远古时代,人类学会用火来供应所需的能量,开始了文明的历程。以后又懂得了用风力、水力等自然动力作为能量的来源,迈出了机械化的第一步。煤、石油、天然气的应用也较早,长期以来主要用于提供热能和照明。18 世纪中叶蒸汽机的发明,使人类开始懂得热能可以转化为机械能,进而转化为电能。随着电能的广泛应用,生产力大大提高,经济飞速发展。20 世纪 40 年代以来,人类又开始了核能的开发和利用。

能源的种类很多,目前评价一种能源的优劣,主要从以下几个方面来衡量:

(1) 能流密度

能流密度是指在一定的空间或面积内从某种能源实际所能得到的能量或功率。能流密度较小的能源作为主力能源是不合适的。按照目前的技术水平,太阳能和风能的能流密度仍然较小,约 $100\text{W}/\text{m}^2$;煤、石油等各种常规能源的能流密度较大;核能的能流密度很大。

(2) 开发费用和设备价格

从目前的技术水平来说,开发费用方面,太阳能和风能几乎不需要投资;煤、石油和核能等从勘探开采到加工运输都需要一定的投资。从设备价格来看,太阳能、风能、海洋能等发电设备的初投资较大;煤、水力、核能发电的初投资是前者的十分之一或几十分之一;石油、天然气发电设备的初投资更少一些。

(3) 存储可能性和供能连续性

煤、石油等各种化石燃料和核燃料在储存与连续供能方面比较容易实现。

(4) 运输费用和损耗

石油、天然气比较容易运输;煤一般需要车载船运,有一定的损耗;太阳能和风能则较难运输;核能的运输量是煤和石油的几十万分之一,损耗可以忽略。实际上,远距离电力输运也存在损耗,且需要一定的基建投资。

(5) 对环境的污染

太阳能和风能没有污染;煤、石油等化石燃料由于会产生 CO_2 等温室气体和具有腐蚀性的酸性气体,因此,其消费量将受到限制;核能在良好的设计、制造和严格的管理下是一种

安全可靠的能源;水力对生态平衡、土地盐碱及航运等也存在一定的影响。

(6) 存储量

存储量是一种能源能否成为主力能源的主要条件。我国的煤炭和水力资源十分丰富,但煤炭资源 60%集中在华北、西北,水力资源 70%集中在西南。

(7) 能源品位

一般认为,能够直接变成机械能和电能的能源品位高于要先经过热能环节再转化成机械能和电能的能源。根据热功转化原理,我们将具有较高热源温度的能源(可以较多转化为机械能和电能)称为高品位能源。

核能是目前比较理想的一种能源,核电在工业发达国家已有几十年的发展历史,核电站已达到技术上成熟、经济上有竞争力、工业上可大规模推广的阶段。核电迅速发展,可归结为以下几点原因:

(1) 核能是有效的替代能源。

从各个时代能源利用的变化趋势情况来看,在公元 500 年时,草木燃料的消耗量占总能耗的 90%以上;至 1965 年前后,煤、石油、天然气开始成为主要能源;至 1995 年,在一些发达国家,核电的比重一般占总发电量的 17%~30%,个别达到 76%,火电比重一般占 60%~70%。

一次能源中,煤是我国的主要能源消耗,但储量有限,而且煤的开采、运输费用都很高,对大气污染严重,它还是重要的化工原料。

表 1.1 能源分类

分类	具体形式	说明
一次能源	风能、水能、潮汐能、太阳能、草木燃料、地热、熔岩等	可再生
	煤、石油、天然气、油页岩、铀、钍、氘等	不可再生
二次能源	电、氢、各类油品、火药、甲醇、乙醇、丙烷等	加工制品

电力生产一直以来是火力发电占主导地位,由此消耗了大量的化石燃料资源,其中,石油和天然气占 60%,煤占 25%。据国际能源资料统计,世界石油总资源量为 140.9×10^9 吨;世界天然气总量是 144.76×10^{12} 立方米;世界煤总量为 10.32×10^{11} 吨。按照目前的消耗水平,全世界已探明的石油和天然气可能在未来几十年内耗尽,煤炭也只能用几百年,如果将裂变堆采用铀—钍循环技术路线,发展快中子增殖堆,则世界铀资源将可供人类数千年所用。如果聚变反应堆核电技术发展成熟投入商用,将会解决人类几亿年的能源需求。

核能是一次能源的重要组成部分,核反应放出的能量与常规化石燃料相比是巨大的。1 公斤铀-235 核裂变放出的能量相当于 2000 吨汽油或 2800 吨煤,1 公斤氘核聚变放出的能量相当于 4 公斤铀。

发展核电可以节省煤、石油、天然气等大量的、日益宝贵的化石燃料,使其作为化工原料得到更有效的利用。当核聚变发电成为可能时,将使人类的能源利用产生重大的突破。

(2) 核电可以缓解交通运输的紧张状况。

核电厂燃料的运输量是微不足道的。一座 1000MW 电功率的压水堆核电厂,一年只需要补充 25~30 吨核燃料——低浓缩铀(实际消耗 1.5 吨铀-235,其余部分可回收),只需一节车皮运输。

相应地,一座 1000MW 电功率的燃煤发电厂,一年要消耗约 350 万吨原煤,平均一万吨原煤/天,每天要一艘万吨轮(或 30~40 节车皮的列车)来运输,同时每天还有约 1000 多吨的灰渣要运走。

核电厂与燃煤发电厂相比,在运输负荷和燃料利用率上都具有优势。

(3) 核电的经济性具有竞争力。

核电厂的基建投资较大,同容量的核电厂与火电厂相比,基建费高 50%。但如果将各自的燃料开采、加工、运输费用包括进去,其综合投资相近。

从发电成本分析,尽管核电厂分摊的基建费与维修费比火电厂高,但由于核电厂的燃料费比火电厂低得多,因此,最终核电厂的发电成本比火电厂低约 38%左右,是烧油电站的 29%,烧煤电站的 58%,而法国的核电成本只有燃煤火电的 52%。世界各国平均核电成本一般是火电的 50%~85%。

表 1.2 德国燃料链的内部和外部成本
(马克/100kWh,7000 满负荷小时)

能源	内部成本	外部成本
核	7.12	0.03~0.68
煤	13.84	0.44~2.35
风	23.29	0.03~0.41
太阳能	157.82	0.07~1.35

在我国,核电、水电、火电的价格基本是持平的。但核电是最稳定、受外界因素干扰最小的。初期修建的成本,核电站大概是火电站的 2~3 倍,但运行后的维护和燃料费用,却远远低于火电站。火电成本中,燃料费所占比例是最高的。如今,全球经济萧条,能源问题变得越来越敏感,这对火电站来说是一个严峻的考验。而水电站是最不稳定的,全球气候变暖,水资源也越来越紧张,对水电站带来的考验也是不可避免的。

国内核电比投资,秦山一期 300MW 核电站的比投资为 710 美元/千瓦左右,相当于当时国内煤电厂比投资的 1.2~1.4 倍;而大亚湾 2×900MW 核电站比投资为 2000 美元/千瓦。主要原因是大亚湾核电站是全套引进设备,而秦山一期为自行设计,并且设备国产化比例达到 70%。但是大亚湾核电站生产的大部分电输送到香港,在香港的上网电价仍比香港同期煤电上网价低,取得了较好的经济效益。

如果能够实现完全国产化、标准化、系列化,我国 2×1000MW 核电站的基础价比投资预计可降至 1500 美元/千瓦以下,为煤电比投资 1.2~1.4 倍,发电成本不超过 5 美分/kWh。

(4) 核电是安全清洁的能源。

核电厂对环境的影响远小于燃煤电厂。由于核电厂不放出二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物,不会造成大气污染、温室效应,从而保护了人类赖以生存的生态环境,对改善日益恶化的环境具有重要作用。

如一座 100 万千瓦煤电厂,一年排出的二氧化碳气体达 680 万吨、硫氧化物 4.4 万吨、氮氧化物 2.2 万吨,还有 30 余吨灰尘。据统计,2003 年我国燃煤发电排放的二氧化硫达 810 万吨,占全国二氧化硫排放总量的 34%。矿物能源在释放二氧化硫、氧化氮等有害气体

和含汞、镉等致癌物质的烟灰方面也是不可忽视的,这些气体的排放使城市空气质量下降,产生酸雨而破坏森林与湖泊。矿物能源还产生大量工业废物污染土壤和地下水源。

2003年,全世界的核发电量相应减少了近2000万吨二氧化硫排放。按目前发电规模,核电站每年使世界减少了23亿吨二氧化碳气体排入大气层。若没有核电,二氧化碳气体排放量在现有基础上每年还会以10%速度递增。我国已经形成了浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾三个核电基地,投运核电机组11台,装机容量约900万千瓦,占全国电力总装机容量1.27%;2007年核电发电量629亿千瓦时,占全部发电量1.92%(相比较一下,同年美国的核电占全国发电量的19.4%);2008年核电发电量684亿度,占1.99%。30年来我国的核电共减排二氧化碳3.96亿吨,减排二氧化硫130万吨。

核电站虽然使用具有放射性的裂变材料,然而就向环境释放的放射性物质而言,由于煤炭是天然矿石,含有天然放射性元素,使其燃煤、粉尘和灰渣具有放射性,一个100万千瓦的煤电站是同等规模核电站的100倍。

核电站不会像水电站那样占地庞大,造成大量人口迁移、水土流失、生态环境变化,以及发生水坝垮塌等,也不会像地热能、生物能影响空气质量。

对于核电厂的放射性问题,以压水堆核电厂为例,由于采取了严密的防范措施,具有三道安全屏障,在正常运行时,其放射性排放远远低于允许标准,核电厂附近居民接受的放射性剂量很低,是天然本底放射性(自然界存在的天然放射性)剂量的几十分之一。即使在一般性事故情况下,由于严格的设计制造和规范的管理制度,其放射性污染也是很小的,对周围居民不能造成危害。

根据当今各种电力生产全生产链的实际统计,每百万千瓦电力每年造成不到预期寿命人员死亡数量:核电1人,天然气电2人,油电32人,煤电37人。相比而言,核电是最安全的能源。

表1.3所示是核电厂与火电厂对环境影响的比较,相同发电量的燃煤电厂对健康的相对危害指数比核电厂高数千倍。

新一代核电站的开发,将使核发电更为安全,使核电产生影响环境的重大事故几率降至百万分之一以下。其共同特点是:先进仪表控制系统设计、现代化的在役检查、现代化的防火与灭火系统、改进型的燃料、非能动式安全系统、各种消除与缓解事故措施等。

表 1.3 每年核电厂和火电厂对环境影响的比较(电功率1000MW)

居民受到的辐射剂量/mSv		SO ₂ 排放量/kg	NO _x 排放量/kg	烟灰等排放量/kg	采矿面积/m ²	危害健康相对指数
压水堆核电厂	0.018	0	0	0	(20.0~28.0) × 10 ³	氦、氙:1 碘:20
燃煤电厂	0.048	(46.0~127.5) × 10 ⁶	(26.25~30.0) × 10 ⁶	3.5 × 10 ⁶	806.67 × 10 ³	SO ₂ :32000 NO _x :4530 烟灰:1100

1.3 世界核电站发展概况

自 1896 年法国物理学家贝可勒尔发现了铀的天然放射性以后,以核物理、核化学、核辐射探测学等一系列研究成果为基础,结合核电子学、核探测器、核分析技术、加速器及反应堆等技术的发展,核能应用与核技术迅速兴起。

核技术首先被用于军事目的。1938 年,哈恩和斯特拉斯曼发现了核裂变并得到了合理的解释,许多科学家都意识到,让放射性物质大量释放能量的核弹(即原子弹)是完全有可能制造成功的。时值第二次世界大战,为了赶在希特勒之前研制出原子弹,以便遏止可能造成的更大危害,经过爱因斯坦等一大批世界一流核物理学家的建议和呼吁,1941 年 12 月美国开始了历时 5 年的“曼哈顿工程”计划,动员了 50 万人、15 万名科学家和工程师,耗资 20 亿美元。

1942 年 11 月 7 日,意大利物理学家恩里科·费米教授领导的实验小组将世界上第一个反应堆建造在美国芝加哥大学斯塔格运动场西看台下的一个角落里,反应堆长 7.5m、宽 7.5m、高 6m,由 385 吨石墨砖和 40 吨天然铀短棒在一个木架栅格上堆砌而成,外层用厚度 30 厘米的石墨层作反射层以防止中子泄漏,堆中放置了一些可以移动的控制棒。

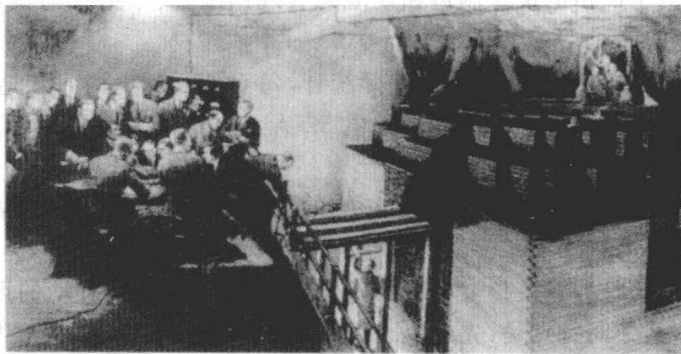


图 1.2 1942 年的首个核反应堆试验成功

1942 年 12 月 2 日下午 3 点 25 分,在对面看台上的 43 位科学家的共同见证下,镀镉的控制棒被移开,这座核反应堆首次成功达到临界,初始反应堆的功率为 0.5 瓦,工作了 28 分钟。不久以后,到 12 月 12 日反应堆功率就提高到了 200 瓦,实现了受控的核能释放,为人类进入一个核能利用的新纪元奠定了基础。

1943 年末,在“原子弹之父”奥本海默的领导下,美国完成了原子弹的实际制造。1945 年 7 月 16 日,第一颗原子弹试验成功。1945 年 8 月 6 日和 9 日,美国先后将两颗原子弹投在了日本的广岛和长崎,迫使日本投降,结束了第二次世界大战。1949 年,前苏联爆炸了一颗比美国投掷到广岛的原子弹大五倍的核弹。1964 年,我国也成功爆炸了第一颗原子弹。

此后,科学家们开始强烈呼吁限制和消灭核武器、和平利用原子能。第二次世界大战后,核能开始被用于和平事业。1954 年 6 月,世界上第一座试验性核电厂在苏联建成并投

入运行,发电功率为 5MW(5000kW),从此核电作为一种新能源,受到了各国的重视,核电事业在世界各地迅速发展。

根据国际原子能机构动力堆信息系统 (PRIS)、世界核协会 2008 年 12 月 1 日的统计数据,世界上处于运行状态核电机组 439 台,用于核舰艇的浮动核动力堆 700 多座,研究用反应堆 651 座,另外还有许多生产堆。核能占世界总能源消费量的 6%,其中核电的净装机容量为 3.74 亿千瓦,占世界发电总装机容量的 17%。

全世界有 33 个国家和地区有核电厂,其中有 16 个国家的核电比例在 25% 以上,11 个国家超过 1/3,4 个国家超过 1/2,地理分布如图 1.4 所示。

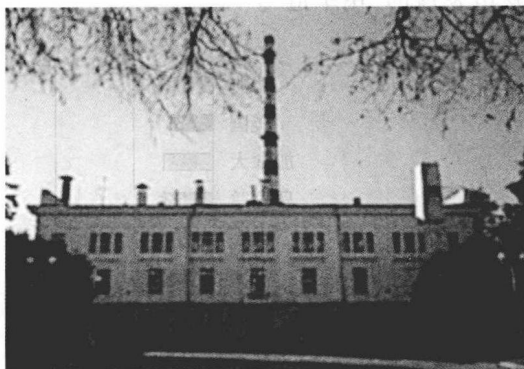


图 1.3 世界上最早的商用核电站——
苏联奥布宁斯克核电站(5MW)

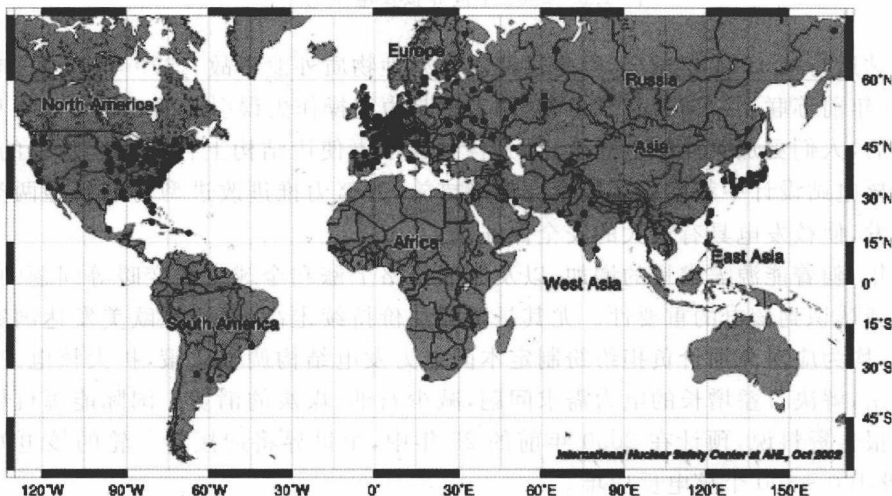


图 1.4 世界运行核电站的地理分布

各国中,美国有 104 个核电机组,核发电量占其总发电量的 19.8%;法国 59 台机组,占 75%;日本有 53 座核电站,核电发电量占总电量的 34.7%;英国有 35 座核电站,占全国总发电量的 28.9%;俄罗斯有 29 座核电站,占全国总发电量的 14.4%;德国有 19 座核电站,占全国总发电量的 31.2%;韩国有 16 座核电站,占全国总发电量的 42.8%;加拿大有 14 座核电站,占全国总发电量的 12.4%;乌克兰有 14 座核电站,占全国总发电量的 43.8%;印度有 11 座核电站在运行,占全国总发电量的 2.7%;瑞典有 11 座核电站在运行,占全国总发电量的 46.8%……;中国内地有 4 座核电站 11 台核电机组正在运行,净装机容量 858.7 万千瓦,核发电量仅占总发电量的 2.0% 左右;中国台湾有 3 座核电站 6 台核电机组在运行,净核电功率 488.4 万千瓦,核发电量占总发电量的 19.3%。目前全世界在建核电机组 44 台,净装机容量 3938 万千瓦,中国在建机组有 12 台,净装机容量 1188 万千瓦,中国已经进

入核电发展的“快车道”。

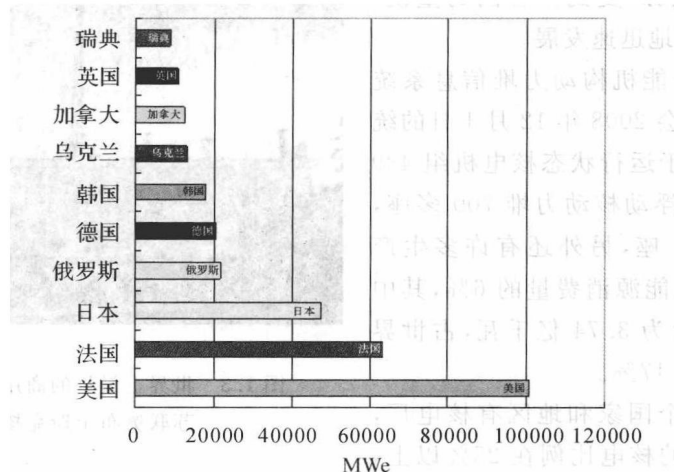


图 1.5 2008 年世界核发电量前十位

核电站运行从 1954 年至今,发生过两次放射性物质外泄事故,1979 年美国三哩岛核电站和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站,两者都是由于操作失误引起的。自切尔诺贝利核电站事故之后,人们更加关注核电安全,世界各国已不再使用结构上存在安全隐患的石墨堆,在以后的核电站设计中都增加了安全壳保障措施,并努力推进改进型与创新型两类新型核电站的开发,使核发电具有最大的安全保证。

近几年,随着能源需求量的增加,以及原油价格上涨和全球气候变暖等问题的出现,各国开始重新认识到核电的重要性。尤其是国际油价持续走高,无论是欧美发达国家还是发展中国家,均为应对高油价负担纷纷制定本国电力发电结构调整政策,扩大核电发电比重,修建核电站,解决日益增长的电力需求问题,减少石油、煤炭的消费。国际能源机构的市场调查分析报告资料说,预计在 2030 年前的 25 年中,全世界将迎接新一轮的核电站建设高峰,将建设 100~300 个核电反应堆。

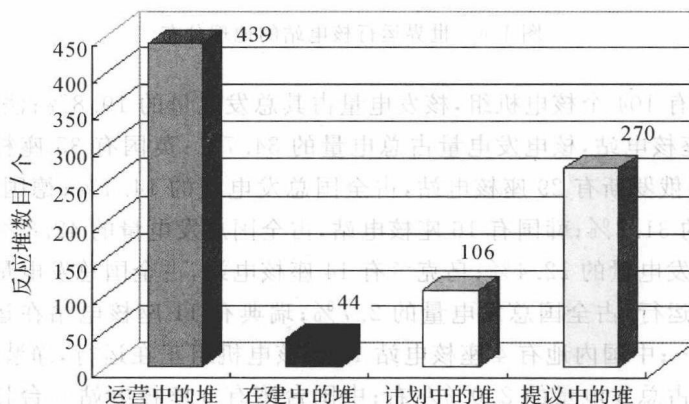


图 1.6 世界核反应堆的现状和发展