



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）
新能源系列教材

核能发电技术

孙为民 主编



NLIC2970826385



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）
新能源系列教材

核能发电技术

主 编 孙为民
编 写 高波涛
主 审 宋长华



NLIC2970826385



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书是根据高职高专新能源应用技术专业核能发电技术课程教学大纲编写的。全书共分六章，主要讲述核反应堆物理及热工基础、核辐射与防护、核反应堆安全、压水堆核电站和核电厂的控制与运行等内容。

本书可作为高职高专能源类、电力技术类相关专业的学历教育教材，也可作为科技人员学习时的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

核能发电技术/孙为民主编. —北京：中国电力出版社，
2012. 4

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2842 - 6

I. ①核... II. ①孙... III. ①核能发电—高等职业教育—教材 IV. ①TM613

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 052159 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 271 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

三十年来,我国核能经历了从无到有的发展,核电工业大体上经历起步、初步发展、腾飞和持续发展几个阶段。1995年以前为起步阶段,秦山、大亚湾核电厂相继投产。1995~2005年为初步发展阶段,秦山二期、岭澳、秦山三期、田湾核电厂相继投运。2005年以后,为腾飞和持续发展阶段,即核电大发展的阶段。在“十二五”规划中,新的核电规划对《核电中长期发展规划(2005~2020)》进行大幅调整。根据规划,到2015年,核电装机规模将达到3900万kW;到2020年,核电装机规划将提高到8600万kW,占届时全国总装机的5%左右,在建规模为4000万kW。从目前已经投产的1000万kW装机容量到2020年的装机容量8600万kW,增长了7倍多。显然,国家发展核电的态度已经从“积极发展”转变为“尽可能发展”。

为了适应这种新形势和新要求,需要大量的核电建设及控制运行人员,很多学校相继开设了核能专业或电厂热能动力装置专业核能方向,为此,中国电力教育协会组织编写本教材,并列为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书由郑州电力高等专科学校孙为民编写,高波涛提供部分参考资料。

本书由宋长华担任主审,审稿老师提出的许多宝贵意见,使编者受益匪浅,同时,本书在编写过程中参考了有关兄弟院校和企业的诸多文献、资料,并得到有关老师和专家的热情帮助,特别是中国核电集团秦山核电站和中国广东核电集团大亚湾核电站的多位专家的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2012年6月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 核电的地位及优越性	1
第二节 核电发展概况	4
第三节 核电站的类型和工作原理	13
第二章 核反应堆物理及热工基础	17
第一节 反应堆物理基础	17
第二节 核反应堆的临界条件和热功率分布	36
第三节 反应性随时间变化	42
第四节 温度效应和反应性控制	48
第五节 核反应堆的热工基础	61
第三章 核辐射与防护	71
第一节 基本概念	71
第二节 辐射防护基础	78
第三节 核电厂的辐射防护	83
第四节 辐射监测	91
第四章 核反应堆安全	97
第一节 核安全的基本概念	97
第二节 设计期间的核安全考虑	107
第三节 运行期间的核安全	113
第五章 压水堆核电站	121
第一节 压水堆核电站简介	121
第二节 一回路系统及设备	122
第三节 一回路辅助系统	133
第四节 专设安全措施	140
第五节 放射性废物处理系统	146
第六节 先进的压水堆核电厂	147
第六章 核电厂的控制与运行	153
第一节 压水堆核电厂的控制	153
第二节 重水堆核电厂及其控制	156
第三节 沸水堆核电厂及其控制	160
第四节 高温气冷堆核电厂及其控制	163
第五节 快中子增殖堆核电厂及其控制	167
第六节 压水堆核电厂的运行	171
参考文献	173

第一章 概 述

第一节 核电的地位及优越性

一、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,但能源严重短缺,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。

从长远来看,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最为有效的一条途径。图 1-1 为各个时代能源利用的变化趋势。

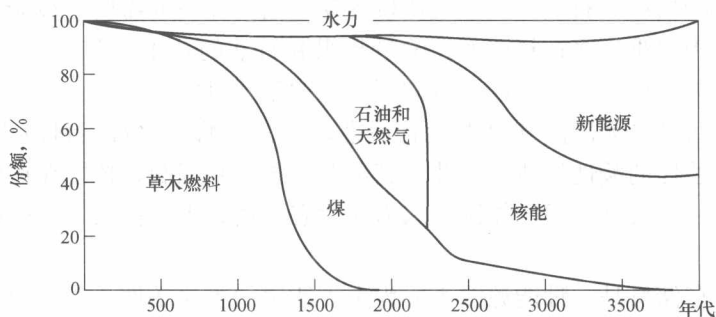


图 1-1 各个时代能源利用的变化趋势

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、交通和环保的瓶颈,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20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,拥有大量核电人才,按照国家发展规划,2020年核电装机容量将提高到8600万kW,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的阶段,即将成为核电大国。

二、核电发展的优越性

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。

1. 核能的优缺点

能源的种类很多,目前评价能源的优劣,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;核能的能流密度最大。

(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、土地盐碱化及航运等方面也存在一定的影响。

(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。

2. 核电大规模发展的原因

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。能源分类见表 1-1。

表 1-1 能 源 分 类

能源分类	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、氦等	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 $140.9 \times 10^9 \text{ t}$ ；世界天然气总量是 $144.76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ；世界煤总量为 $10.32 \times 10^{11} \text{ t}$ 。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。1kg ^{235}U 核裂变放出的能量相当于 2000t 汽油或 2800t 煤，1kg 氘核聚变放出的能量相当于 4kg 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，人类的能源利用将产生重大的突破。

(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 25~30t 核燃料——低浓缩铀（实际消耗 1.5t 铀-235，其余部分可同收），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 t 原煤，平均每天 1 万 t 原煤，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 t 的灰渣要运走。

核电厂与燃煤发电厂相比，在运输燃料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%，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%。

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不可避免。

(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。

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kW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多,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,对周围居民不会造成危害。

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。相比而言,核电是最安全的能源。

新一代核电站的开发,将使核电更为安全,使核电发生影响环境的重大事故几率降至百万分之一以下,其主要特点: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。

第二节 核电发展概况

一、世界核电发展概况

(一) 核电站发展历程

自1986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。

核技术首先应用于军事方面。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,其中有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座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385t石墨砖和40t天然铀短棒在一个木架栅格上堆砌而成，外层用厚度30cm的石墨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。

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，镀镅的控制棒被移开，这座核反应堆首次成功临界，初始反应堆的功率为0.5W，工作了28min。不久以后，到12月12日反应堆功率就提高到了200W，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威力大五倍的核弹。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。1954年，前苏联建成了世界上第一座核电机组，人类进入了和平利用核能的时代。

从世界核电发展历程来看，大致可分为四个阶段：实验示范阶段、高速发展阶段、减缓发展阶段以及开始复苏阶段。

1. 实验示范阶段（1954~1965年）

1954~1965年间世界共有38个机组投入运行，属于早期原型反应堆，即“第一代”核电站。期间，1954年前苏联建成世界上第一座商用核电站——5MW实验性石墨沸水堆（见图1-2）；1956年英国建成45MW原型天然铀石墨气冷堆核电站；1957年美国建成60MW原型压水堆核电站；1962年法国建成



图1-2 世界第一座核电站——前苏联奥布宁斯克核电站

60MW天然铀石墨气冷堆；1962年加拿大建成25MW天然铀重水堆核电站。

2. 高速发展阶段（1966~1980年）

1966~1980年间世界共有242个机组投入运行，属于“第二代”核电站。由于石油危机的影响以及被看好的核电经济性，核电得以高速发展。期间，美国成批建造了500~1100MW的压水堆、沸水堆，并出口其他国家；前苏联建造了1000MW石墨堆和440、1000MWVVER型压水堆；日本和法国引进、消化了美国的压水堆、沸水堆技术；法国核电发电量增加了20.4倍，占全国发电总量比例从3.7%增加到40%以上，图1-3所示为法国PALUEL核电站；日本核电发电量增加了21.8倍，占全国发电总量比例从1.3%增加到20%。

3. 减缓发展阶段（1981~2000年）

1981~2000年间，由于1979年美国三哩岛（见图1-4）以及1986年前苏联切尔诺贝利核事故（见图1-5）的发生，直接导致了世界核电发展的停滞，人们开始重新评估核电的

安全性和经济性。为保证核电厂的安全，世界各国采取了增加更多安全设施、更严格审批制度等措施，以确保核电站的安全可靠。

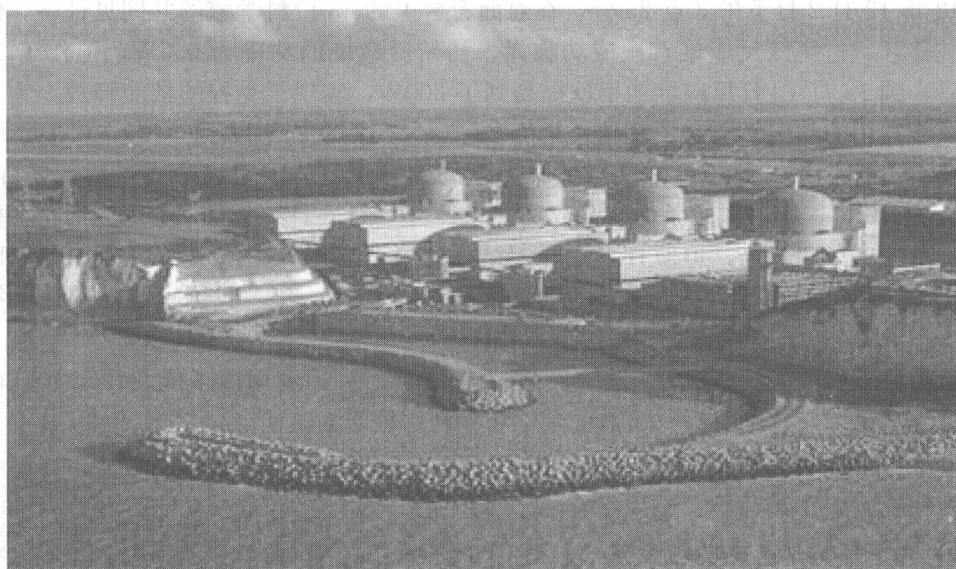


图 1-3 法国 PALUEL 核电站



图 1-4 美国三哩岛核电站

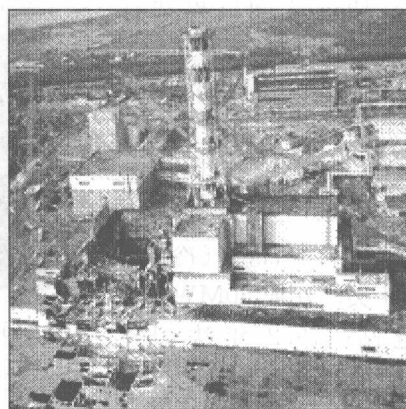


图 1-5 前苏联切尔诺贝利核电站事故现场

4. 开始复苏阶段（21 世纪以来）

21 世纪以来，随着世界经济的复苏，以及越来越严重的能源、环境危机，促使核电作为清洁能源的优势又重新显现，同时经过多年的技术发展，核电的安全可靠性进一步提高，世界核电的发展开始进入复苏期，世界各国都制定了积极的核电发展规划。美国、欧洲、日本开发的先进轻水堆核电站，即“第三代”核电站取得重大进展，有的已投入商业运行或即将立项。

（二）发展现状和趋势

1. 发展现状

核电与水电、煤电一起构成了世界能源供应的三大支柱，在世界能源结构中有着重要的地位。目前世界上已有 30 多个国家和地区建有核电站。根据国际原子能机构（IAEA）统

计,截至2010年10月底,全世界共有441台核电机组在运行,总装机容量约3.7亿kW,主要分布在北美、欧洲及东亚的一些工业化国家(图1-6所示为世界核电站分布图),其中,美国有104台、法国58台、日本54台、俄罗斯32台、韩国21台(图1-7所示为全球核电站运行机组数量图)。核电发电量约占全球总发电量的16%,其中,法国高达75.17%,日本为29.23%,美国为20.17%,已有18个国家和地区核发电量占发电总量的比例超过20%(图1-8所示为世界各国核电发电比例图)。目前全球在建核电机组63台,装机容量为6080万kW,主要集中在亚洲的中国、印度和俄罗斯等国家。

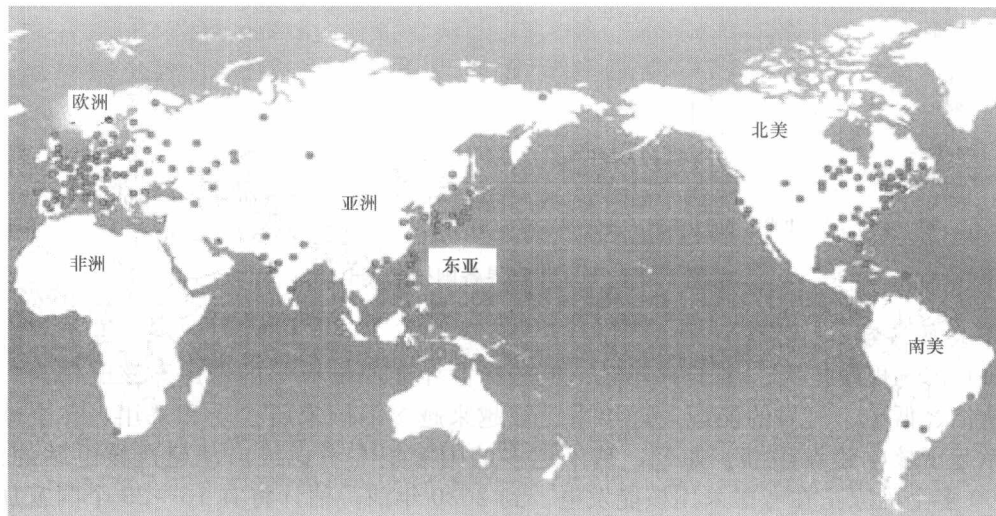


图 1-6 世界核电站分布图

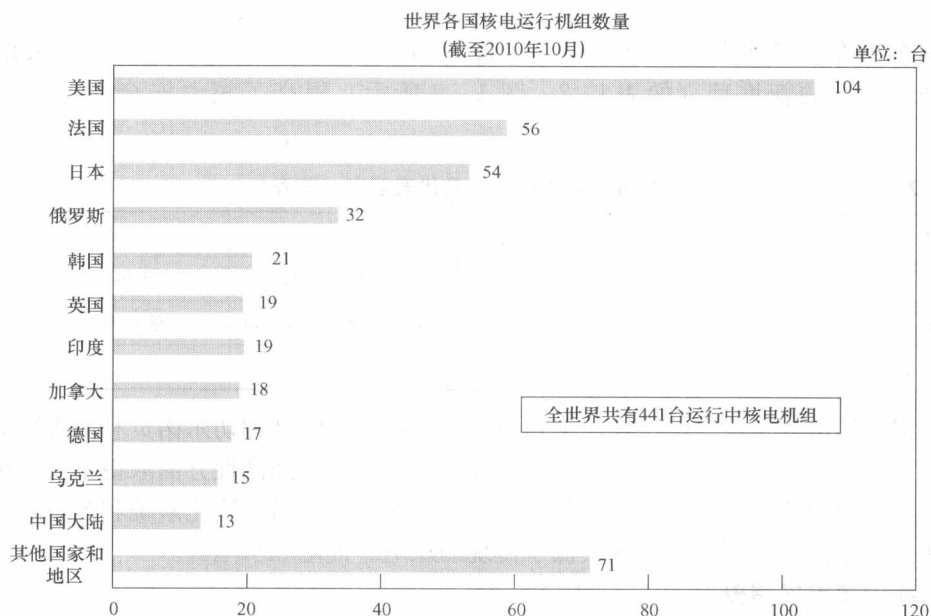


图 1-7 全球核电站运行机组数量图

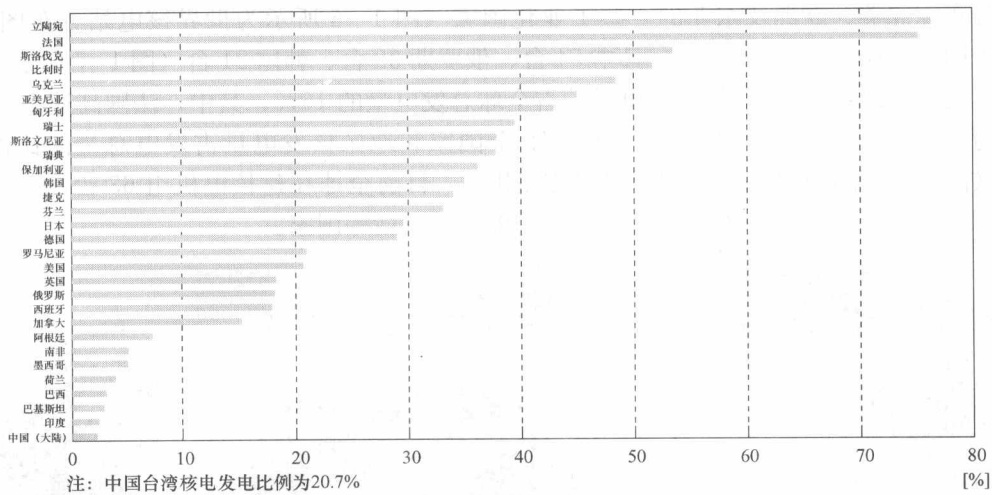


图 1-8 2009 年世界各国核电发电比例

2. 发展趋势

(1) 市场规模扩大。出于对环保、生态和世界能源供应等的考虑，核电作为一种安全、清洁、低碳、可靠的能源，近年来已被越来越多的国家所接受和采用，在全球部分地区掀起了核电建设热潮。如今，越来越多的国家正在考虑或启动建造核电站的计划，已有 60 多个国家正在考虑采用核能发电。到 2030 年前，估计将有 10~25 个国家加入核电俱乐部，将新建核电机组。据国际原子能机构预测，到 2030 年全球的核电装机容量增加至少 40%。

(2) 研发新一代核电技术。目前，世界正在运行的机组采用的基本是第二代核电技术。世界各国在二代技术基础上进行了改进与创新，研发出三代核电技术。采用了改进型和革新设计的新堆型（如表 1-2、图 1-9 所示）提高了核电安全性、可靠性和经济性。

表 1-2 世界核电主要堆型及代表国家一览表

堆型	代表国家	数量（台）	堆型	代表国家	数量（台）
压水堆（PWR）	美、法、日、俄	269	气冷堆（GCR）	英国	18
沸水堆（BWR）	美、日、瑞典	92	石墨水冷堆（LWGR）	俄罗斯	15
重水堆（PHWR）	加拿大	46			

(3) 提高核电安全性、经济性。国际核能界总结了三哩岛和切尔诺贝利两大事故的教训和世界核电站近 1 万堆年的运行经验，在提高核电安全性和经济性方面取得重大突破。新建核电站的风险概率可在现有基础上再降低一个数量级，同时通过简化系统和容量效应的发展降低了建造成本、运行成本等，使其低于传统的煤电、油电和水电等。

二、我国核电发展概况

在现代社会中能源的人均消耗成为衡量一个国家生产水平和生活水平的重要标志之一，但世界上的煤、石油、天然气资源，按现在的开采水平估计，将在几十年内逐渐枯竭，因此

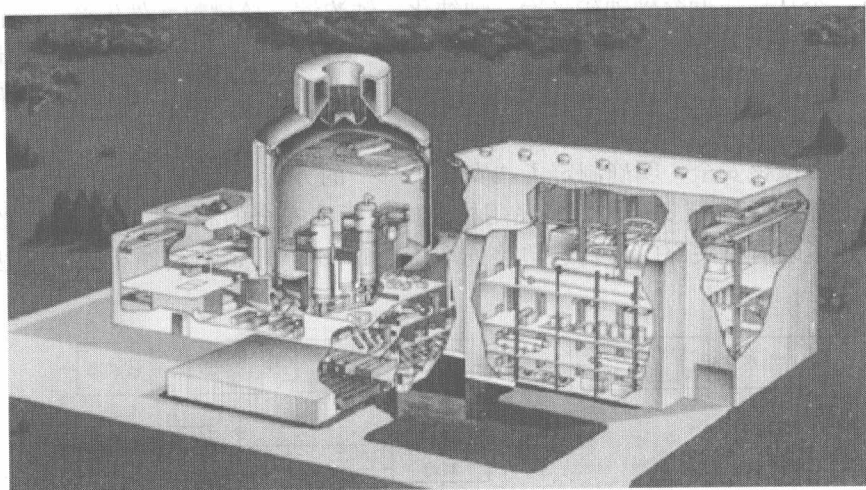


图 1-9 AP1000 核电站

时代呼唤需要开发新的能源。

(1) 我国资源丰富,但人均占有量不到世界平均值的 $1/2$,人均能耗仅为发达国家的几十分之一。国民经济要发展,首先能源要有大发展。

(2) 我国的能源分布极为不均,60%以上煤分布在华北地区,70%水力分布在西南地区,东南沿海地区又是工业发达地区,因此,我国更需要清洁、可靠、经济、安全的能源。

(3) 由于日益严重的生态破坏和环境污染的压力,使得人们对于核能在国民经济中的地位 and 作用有了进一步的认识——核能对于优化能源结构、促进能源多元化、提高能源安全和能源资源的合理利用以及保护环境具有不可替代的作用。核能在我国能源供给中扮演的角色已由“可有可无”变为“不可或缺”。

(4) 到 2020 年,我国要全面实现小康社会,实施可持续发展战略,能源安全保障是重要支撑条件之一,而加快发展核电这一重要替代能源是保持我国社会经济与资源环境平衡和谐的战略选择。积极发展核能是我国能源发展和生态与环境保护的必然选择。

三十年来,我国核能经历了从无到有的发展,核电工业大体上经历起步、初步发展、腾飞和持续发展几个阶段。

1995 年前可称为起步阶段。期间,秦山、大亚湾核电厂相继投产。

1995~2005 年可称为初步发展阶段。期间,秦山二期、岭澳、秦山三期、田湾核电厂相继投运。不幸的是,由于我国核电体制存在的弊端及认识等问题,已建项目形成了多种堆型、多国引进,客观上不利于我国核电国产化。总体来说,核电国产化水平不高。

2005 年以后,称为腾飞和持续发展阶段,即核电大发展的阶段。在“十二五”规划中,新的核电规划对《核电中长期发展规划(2005—2020)》进行大幅调整。根据规划,到 2015 年,核电装机规模将达到 3900 万 kW;到 2020 年的核电装机规划将提高到 8600 万 kW,占届时总装机的 5%左右,在建规模在 4000 万 kW。从目前已经投产的 1000 万 kW 提到 8600 万 kW。显然,国家在发展核电态度上已经从“积极发展”转变到“尽可能发展”。

1955 年我国开始发展核工业,20 世纪 50 年代后期至 70 年代主要为国防服务。在此期间建立了相应的科研、设计、建造、教育和核燃料循环工业体系(如图 1-10 所示),目前

我国已拥有一个从地质勘察到铀矿采冶、铀纯化、铀浓缩、核燃料元件生产，一直到乏燃料后处理等完整的核燃料循环系统，并在关键环节上实现了生产能力的跨越和技术水平的提升，在一些重要环节上已接近或达到国际先进水平。世界上只有美、俄、英、法和中国等少数几个国家能够拥有如此完整的核工业体系。

我国十分重视核安全，明确制定了“安全第一”的方针，保护工作人员、公众和环境。1984年国务院成立国家核安全局，对民用核设施进行核安全的独立监管，建立核安全监督体系，并确定了政府有关部门和营运单位的职责。1986年开始陆续颁布核安全法规，依法监管核安全。

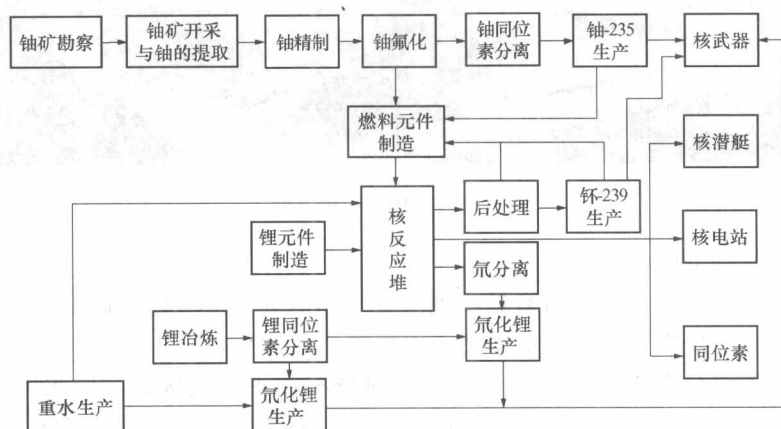


图 1-10 核工业的构成

目前我国有 6 个投入运营的核电，12 个在建的核电站，12 个筹建中的核电站。

1. 秦山核电站（中核）

秦山核电站地处浙江省海盐县。

一期工程，采用中国 CNP300 压水堆技术，装机容量 $1 \times 300\text{MW}$ ，设计寿命 30 年，综合国产化率大于 70%，1985 年 3 月浇灌第一罐核岛筏基混凝土（简称 FCD），1991 年 12 月首次并网发电，1994 年 4 月投入商业运行，1995 年 7 月通过国家验收。经过十多年的管理运行实践，实现了周恩来总理提出的“掌握技术、积累经验、培养人才，为中国核电发展打下基础”的目标。

二期工程及扩建工程，采用中国 CNP650 压水堆技术，装机容量 $2 \times 650\text{MW}$ ，设计寿命 40 年，综合国产化率二期约 55%，二期扩建国产化率约 70%，1、2 号机组先后于 1996 年 6 月和 1997 年 3 月开工，经过近 8 年的建设，两台机组分别于 2002 年 4 月、2004 年 5 月投入商业运行，使我国实现了由自主建设小型原型堆核电站到自主建设大型商用核电站的重大跨越，为我国自主设计、建设百万千瓦级核电站奠定了坚实的基础，并将对促进我国核电国产化发展，进而拉动国民经济发展发挥重要作用。二期扩建工程（3、4 号机组）在其设计和技术基础上进行改进，2006 年 4 月 28 日开工，3 号机组 2010 年 10 月建成投产，4 号机组 2011 年 12 月 30 日并网发电。

秦山三期（重水堆）核电站采用加拿大成熟的坎杜 6 重水堆技术（CANDU6），装机容量 $2 \times 728\text{MW}$ ，设计寿命 40 年，综合国产化率约 55%，参考电厂为韩国月城核电站 3、4

号机组。1号机组于2002年11月19日首次并网发电,并于2002年12月31投入商业运行。2号机组于2003年6月12日首次并网发电,并于2003年7月24日投入商业运行。

2. 广东大亚湾核电站(中广核)

大亚湾核电站是采用法国M310压水堆技术,装机容量 $2\times 984\text{MW}$,设计寿命40年,综合国产化率不足10%,1987年8月工程正式开工,1994年2月1日和5月6日两台单机容量为984MWe压水堆反应堆机组先后投入商业营运。

3. 岭澳核电站(中广核)

岭澳核电站位于广东大亚湾西海岸大鹏半岛东南侧。

一期工程,采用中国CPR1000压水堆技术,装机容量 $2\times 990\text{MW}$,设计寿命40年,综合国产化率约30%,于1997年5月开工建设,2003年1月全面建成并投入商业运行,2004年7月16日国家竣工验收。

二期工程,采用中国改进型CPR1000压水堆技术,装机容量 $2\times 1000\text{MW}$,设计寿命40年,1号和2号机组综合国产化率分别超过50%和70%,1号机组于2005年12月开工建设,2010年9月20日正式投入商业运行;2号机组2006年6月15日开工,2011年5月30日并网发电。

三期工程,采用中国改进型CPR1000压水堆技术,装机容量 $2\times 1000\text{MW}$,设计寿命40年,正在进行开工前的准备工作。

4. 田湾核电站(中核)

田湾核电站位于江苏省连云港市连云区田湾,厂区按4台百万千瓦级核电机组规划,并留有再建2~4台的余地。

一期工程,采用俄罗斯AES-91型压水堆技术,装机容量 $2\times 1060\text{MW}$,设计寿命40年,综合国产化率70%。于1991年10月20日正式开工FCD,单台机组的建设工期为62个月,分别于2007年5月和2007年8月正式投入商运。

二期工程3号和4号机组的建设已启动,单机容量均为1000MW。

三期工程5号和6号机组的建设已启动,采用中国二代加CPR核电技术。

5. 红沿河核电站(中广核)

辽宁红沿河核电站位于辽宁省大连市瓦房店东岗镇,地处瓦房店市西端渤海辽东湾东海岸。规划建设6台机组,采用中国改进型CPR1000压水堆技术,单机容量1000MW,设计寿命40年,综合国产化率约60%,1号机组于2007年8月正式开工,计划2012年建成投入商业运营。

6. 宁德核电站(中广核)

宁德核电站规划建设6台机组,采用中国改进型CPR1000压水堆技术,单机容量1000MW,设计寿命40年,综合国产化率约75%以上,1号机组于2008年2月开工FCD,1、2号机组计划于2013年左右建成投入商业运行。

7. 阳江核电站(中广核)

阳江核电站位于粤西阳江市东平镇沙环村,三面环山,南面临海。项目规划建设6台百万千瓦级或更大容量的核电机组,分两到三期建设,首期建设两台。首期两台机组主体工程于2007年开工,2012年左右建成投入商业运行。

8. 三门核电站（中核）

2004年7月，位于浙江南部的三门核电站一期工程建设获得国务院批准。这是继秦山核电基地之后，获准在浙境内建设的第二个核电基地。三门核电站总占地面积740万m²，可分别安装6台1000MW核电机组。全面建成后，装机总容量将达到1200万kW以上。一期工程总投资250亿元，将首先建设两台目前国内最先进的1000MW级压水堆机组。

9. 海阳核电站（中电投）

海阳核电站位于山东烟台海阳市东南部海边，该工程规划建设6台百万千瓦级核电机组，并预留有扩建场地。一期工程规划建设两台1250MW非能动型压水堆（AP1000）核电机组，1、2号机组分别计划于2014年5月和2015年3月投产。

海阳核电项目采用美国西屋公司设计的当今世界上最先进的AP1000三代核电技术。该技术由于运用非能动的安全系统，可较大幅度地简化系统，减少设备数量，提高核电站的安全性和经济性。

10. 方家山核电站

方家山核电站是秦山一期核电工程的扩建项目，工程规划容量为两台百万千瓦级压水堆核电站，采用二代改进型压水堆技术，国产化率达到80%以上，预计两台机组分别在2013年和2014年投入商业运行。项目建成后，秦山核电基地将拥有9台核电机组，总容量达到630万kW。该项目位于浙江海盐，南临杭州湾，建成后将承接华东区域电网，区域优势相当明显。

11. 咸宁核电站（湖北咸宁大畈核电站）

总投资达600多亿元的咸宁核电项目，于2009年全面启动建设。

咸宁核电项目也标志着中国进入第三代核电发展阶段。它将AP1000技术，备受中国核电行业关注。

近年来，我国为了加速实现核技术应用产业化，核科技攻关以核电为龙头、核燃料和核科研为基础，开展了下述工作。

（1）开展国产化先进核反应堆的系列技术攻关，其中百万千瓦级大型先进压水堆核电站的设备国产化比例从原有的1%上升到75%甚至90%，实现了“自主设计、自产设备、自主建设、自主运营”，在聚变—裂变混合堆的研究方面，我国的聚变三乘积水平在15年里提高了50倍。

（2）在核燃料循环工业的各个环节都展开了重大技术攻关项目，包括铀矿勘探、采冶、铀浓缩、燃料元件制造、反应堆、后处理等。

（3）为促进核技术与其他现代技术的结合，开展了核技术在人类生产、生活中的应用研究，如核医学与分子生物学结合、核辐射技术与现代信息技术结合等。

在先进核反应堆技术方面，我国高温气冷实验堆已于2000年12月建成并达到临界。反应堆由中国自主设计、自主建造、自主营运，拥有自己的知识产权，技术上亦居世界前列。2008年10月7日举行了全球首个商用“球床”核反应堆、195MW高温气冷堆核电站——华能山东石岛湾核电厂示范工程核岛EPC总承包协议和主设备供货合同的签字仪式，工程计划于2013年11月投产发电。

快中子增殖堆可将天然铀资源的利用率从压水堆的约1%提高到60%~70%，这对于充分利用铀资源、持续稳定发展核电、解决今后的能源供应问题具有战略意义。中核集团中国