



# 核 电 站

HE DIAN ZHAN

杜圣华等编 原子能出版社

# 核 电 站

杜 圣 华 等 编

原 子 能 出 版 社

## 内 容 提 要

本书主要介绍压水堆核电站。全书共分十章，分别谈到压水堆核电站的主要组成部分、反应堆的结构、反应堆物理、反应堆热工及控制原理、核电站回路系统、三废处理、放射性剂量防护、核燃料循环过程以及核电站反应堆的改进和发展前景。

本书可供接触核能发电的科技人员和大专院校有关专业的师生以及对核电站感兴趣的广大读者阅读。

## 核 电 站

杜圣华 等编

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京岳各庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本  $850 \times 1168 \frac{1}{32}$  · 印张 12 · 字数 320 千字

1982 年 2 月第一版 · 1982 年 2 月第一次印刷

印数 001—1300 · 统一书号：15175 · 223

定价：2.05 元

## 编 者 的 话

能源是发展工业、农业、国防、科学技术和提高人民生活水平的重要基础。近几年来，许多国家和地区在以火电和水电为主的电力工业中先后建成了大型核电站，并形成了一整套核电工业体系。预计在今后若干年内核电站将在电力工业中占有重要位置。

为了便于从事这方面工作的科技人员和有关同志了解核电站的基本知识，我们编写了这本科技读物。它是在核电站科技讲座讲稿的基础上做了一些修改之后编写而成的。

全书共分十章。第一章由杜圣华编写，第二章由邬国伟编写，第三章由孙启才编写，第四章由童鼎昌、杜圣华编写，第五章由刘国建、戚正文编写，第六章由马鸣奇、吴雪月编写，第七章由卢玉永、何国祥编写，第八章由周富兰编写，第九章由刘正伦、杜圣华编写，第十章由杜圣华编写；最后由赵嘉瑞、鲍云樵、王奇卓同志进行了审校。

由于本书采取了集体编写的方式，因此各章在写法和深度上难免有些不一致的地方，希望广大读者谅解。对书中的错误和缺点，深望广大读者批评指正。

# 目 录

第一章	核电站概况	( 1 )
第一节	核电站发展现状及趋势	( 1 )
第二节	核电站概述	( 6 )
第三节	核电站反应堆的构造	( 11 )
第四节	核电站的优越性	( 14 )
第二章	反应堆物理原理	( 18 )
第一节	原子核的基本概念	( 18 )
第二节	反应堆的临界条件及通量分布	( 28 )
第三节	反应堆的燃烧过程	( 36 )
第四节	反应堆运行特性及控制原理	( 43 )
第三章	核反应堆热工原理	( 50 )
第一节	核反应堆内的热量传递过程	( 50 )
第二节	反应堆水力设计原理	( 74 )
第三节	核电站压水反应堆的热工设计简介	( 79 )
第四章	压水反应堆结构	( 86 )
第一节	反应堆本体结构概述	( 86 )
第二节	反应堆堆芯结构	( 88 )
第三节	反应堆堆内构件	( 99 )
第四节	反应堆压力壳	( 108 )
第五节	控制棒驱动机构	( 112 )
第五章	核电站动力装置	( 117 )
第一节	概述	( 117 )
第二节	一回路系统及主要设备	( 119 )
第三节	一回路辅助系统	( 130 )
第四节	二回路系统及设备	( 143 )
第六章	核电站的控制和安全保护	( 149 )
第一节	反应堆控制的物理基础	( 150 )

第二节	反应堆动态特性 .....	(161)
第三节	核电站的控制调节系统 .....	(170)
第四节	核电站的安全保护 .....	(183)
第五节	核电站的监测与仪表 .....	(198)
第六节	数字计算机在核电站中的应用 .....	(207)
第七节	核电站的电气系统 .....	(209)
<b>第七章</b>	<b>核电站辐射防护及剂量监测 .....</b>	<b>(214)</b>
第一节	放射性和辐射剂量 .....	(214)
第二节	核电站放射性来源 .....	(230)
第三节	核电站的放射性防护屏蔽 .....	(234)
第四节	屏蔽计算简介 .....	(237)
第五节	核电站的辐射剂量监测 .....	(244)
<b>第八章</b>	<b>核电站的三废处理和环境保护 .....</b>	<b>(258)</b>
第一节	核电站放射性三废概述 .....	(259)
第二节	核电站放射性三废及其处理 .....	(264)
第三节	放射性物质对环境的影响 .....	(272)
第四节	废热对环境的影响 .....	(275)
第五节	环境保护和厂址选择 .....	(280)
第六节	核电站和火电站对环境影响的比较 .....	(282)
<b>第九章</b>	<b>核电站的燃料循环 .....</b>	<b>(286)</b>
第一节	核电站和燃料循环 .....	(286)
第二节	核燃料的加工制造工艺 .....	(290)
第三节	核电站反应堆的装料与换料 .....	(297)
第四节	核燃料的后处理 .....	(304)
第五节	核资源的有效利用 .....	(308)
<b>第十章</b>	<b>核电站反应堆的改进与发展 .....</b>	<b>(318)</b>
第一节	轻水堆核电站的改进和发展 .....	(318)
第二节	重水堆核电站的改进和发展 .....	(352)
第三节	高温气冷堆核电站的改进和发展 .....	(361)
第四节	快中子增殖堆核电站的发展 .....	(368)

# 第一章 核电站概况

## 第一节 核电站发展现状及趋势

电力是国民经济中重要的基础工业之一。随着国民经济的发展，对于电力的需求量也迅速增长。全世界的电力需求量据统计大约每十余年增加一倍。但是，目前世界上发电用的能源80%以上来自煤和石油等化石燃料。大量化石燃料的烟气排入空气中，严重污染了自然环境。以一个发电容量为60万千瓦的火力发电站为例，每天将要烧掉约5000多吨优质煤（或3300多吨重油），同时向大气排放出200多吨二氧化硫、烟灰等有害物质，造成空气的污染。同时，煤和石油是重要的化工原料，大量的消耗将影响化学工业的发展。因此，为了解决电力问题，必须开发和利用新的能源。而现代人类所能利用的能源，不外乎是水力、化石燃料、核能以及太阳能、风力、潮汐能、地热能等。水力能源虽有一定的经济价值，但往往受到地理条件的限制，建造费用庞大，电力输送费用高。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，但要大规模地利用及开发却受到很多条件的限制。因此，核能是当前比较有现实意义的能源。

近二十多年来，许多国家先后建造了核电站，核电作为新型的能源正在迅速地发展。特别自西方世界石油危机以来，更加快了核电的发展步伐。到1980年为止，世界上已经运行的核电站200多座，发电容量约为一亿三千万千瓦。正在建造和已订货的尚有300余座，其发电容量约为三亿多千瓦。单堆最大电功率为130万千瓦。表1-1列出了世界核发电总装机容量的发展状况。表中的计划

表 1-1 世界核电站装机容量一览表(单位万千瓦)

(截止 1980 年 6 月底)

国家和地区	运行中		建设中		订货中		计划中		总计	
	座数	容量	座数	容量	座数	容量	座数	容量	座数	容量
1 美国	72	5568.6	95	10862.2	25	3035.8			192	19467.6
2 日本	22	1511.7	8	614			7	709	37	2834.7
3 苏联	27	1307.5	14	1172			14	1400	55	3879.5
4 西德	12	921.2	16	1871.8	4	479.1	17	2217	49	5490
5 英国	33	885	6	400	4	261	2	249.6	45	1798.6
6 法国	16	864	37	3916.4			24	3054.3	77	7834.7
7 加拿大	10	580	14	1030			2	137	26	1747
8 瑞典	6	391	5	490	1	110			12	991
9 瑞士	4	203.4	3	301	2	216.2	2	198	11	918.6
10 比利时	3	174	4	395					7	569
11 意大利	4	153.9	5	401.7	2	190.4	10	924.8	21	1670.8
12 东德	4	139	3	132			4	176	11	447
13 中国台湾省	2	127.2	4	387.2					6	514.4
14 芬兰	2	113.1	2	113.1			4	439.6	8	665.4
15 西班牙	3	112	12	1159	11	1136.4	12	1220	38	3627.4
16 保加利亚	2	88	2	88			4	400	8	576
17 印度	3	64	5	116					8	180
18 南朝鲜	1	95.5	6	522.1	2	180			9	761.6
19 捷克	3	97	4	165			7	308	14	570
20 荷兰	2	53.5							2	53.5
21 阿根廷	1	34	2	139.4	1	172.6	3	187.2	7	433.2
22 巴基斯坦	1	13.7							1	13.7



国家和地区	运行中		建设中		订货中		计划中		总计	
	座数	容量	座数	容量	座数	容量	座数	容量	座数	容量
23 巴西			3	331			6	811.2	9	1142.2
24 匈牙利			4	176					4	176
25 墨西哥			2	135					2	135
26 菲律宾			1	66					1	66
27 南斯拉夫			1	63.2			1	80	2	143.2
28 南非					2	191.8			2	191.8
29 波兰					2	88			2	88
30 罗马尼亚					1	62.4	3	187.2	4	249.6
31 埃及							6	457.6	6	457.6
32 丹麦							2	200	2	200
33 葡萄牙							2	194	3	194
34 伊朗							2	187.2	2	187.2
35 卢森堡							1	130	1	130
36 泰国							1	93.6	1	93.6
37 挪威							1	90	1	90
38 古巴							2	88	2	88
39 爱尔兰							1	65	1	65
40 土耳其							1	62.4	1	62.4
41 希腊							1	62.4	1	62.4
总计	233	13457.4	258	25047.1	57	6027.7	142	14328.7	690	58860.9

国际核工程 1980年 Vol 25 No 302

数字虽然可能有所夸大，但可以反映出世界核电站的发展趋向。可见在今后相当长的一段时期内，核能发电将成为电力工业的重要组成部分。

核电站的动力反应堆是核电站的关键设备。核电站的发展与反应堆的研究和发展有着密切联系。二十多年来，世界各国对发电用的动力反应堆作了广泛的研究。发电用的动力反应堆的发展过程大致可分为两个阶段：

第一阶段，是在六十年代以前，着重于多种堆型的试验和研究，其中包括对压水、沸水、重水、石墨气冷、有机和熔盐反应堆等二十多种堆型的试验研究。

第二阶段，是在六十年代以后，经过试验研究淘汰了一些堆型，由二十多种变为重点研究发展下列几种：轻水堆、重水堆、石墨气冷堆、高温气冷堆、轻水增殖堆、熔盐热中子增殖堆和快中子增殖堆。其中，目前已经发展到商业应用的核电站动力反应堆主要是：轻水堆、重水堆和石墨气冷堆。正在研究和发展的有快中子增殖堆和高温气冷堆。

轻水堆是用低浓（含 2—3% 铀-235）二氧化铀作核燃料、净化的轻水（即普通水）作中子慢化剂和冷却剂的一种反应堆。轻水堆按其产生蒸汽的方式不同，又分为压水型反应堆和沸水型反应堆两种。所谓压水型反应堆，是指强迫冷却剂在反应堆与蒸汽发生器之间循环流动将核燃料裂变所产生的热量带至蒸汽发生器，并为防止冷却剂在反应堆内沸腾，整个系统保持在高压（约 150 大气压）状态下工作的这样一类反应堆。沸水型反应堆是指允许冷却剂在反应堆内发生整体沸腾，并直接产生蒸汽，送往汽轮机做功的这样一类反应堆。压水堆和沸水堆均是用轻水作慢化剂和冷却剂。

重水堆是以重水作中子慢化剂，以天然铀为燃料，亦即采用天然铀中所含有的 0.7% 的铀-235 作为主要可裂变燃料的反应堆。重水堆按其堆内采用的冷却方式不同，又分为压力管式重水冷却反应堆、压力壳式重水冷却反应堆和重水慢化沸腾轻水冷却反应堆三种类型。其中，压力壳式和沸腾轻水冷却式的重水堆正在进行研究中，目前尚未达到商业应用阶段。现阶段发电用的重水堆，主要是加拿大压力管式的重水堆（称 CANDU 型反应

堆)。

天然铀石墨气冷堆虽已在英、法得到商业应用，但两国已经决定今后不再建这种堆。

高温气冷堆是以石墨作中子慢化剂，低浓铀或高浓铀加钍作核燃料，氦气作冷却剂的反应堆，冷却剂出口温度可高达  $850^{\circ}\text{C}$  以上。它是由五十年代建造的以天然铀为燃料，石墨为慢化剂，二氧化碳作冷却剂的天然铀石墨气冷堆改进发展而成。高温气冷堆是以浓缩铀 ( $\text{UO}_2$  或  $\text{UC}_2$ ) 代替天然铀作燃料，用传热性能和化学稳定性良好的氦气取代了二氧化碳作为冷却剂，并设计出各种独特的堆芯结构的一类反应堆，因而反应堆效率提高了，核发电成本也降低了。更为可取的是，除了发电外还可利用它的高温为多种工业部门供热（如炼钢、煤的气化等）。

快中子增殖堆是以高浓铀钚混合氧化物（大于 20% 的铀-235 或钚-239）作核燃料，铀-238 或钍-232 作增殖材料，由快中子引起核燃料裂变的反应堆。这种反应堆可利用核燃料裂变过程中产生的大量中子，将铀-238 转化为新的核燃料钚-239，而且生产的新核燃料可能比消耗掉的裂变燃料还多，故称为增殖堆。快中子增殖堆内不能有中子慢化剂，因此在冷却剂选择上受一定限制。目前快中子增殖堆中采用液态金属钠或氦气作为冷却剂。所以，快中子堆一般可分为钠冷快中子堆和气冷快中子堆两种。

从核电站动力反应堆的发展趋向来看，虽然快中子增殖堆和高温气冷堆是最有发展前途的堆型，但是由于技术难度较大，目前还没有达到大规模商业应用阶段。预计到 1990 年将可能达到商业应用阶段。因此，目前用于大功率核电站的动力反应堆主要是压水堆、沸水堆、重水堆和天然铀石墨气冷堆。其中压水堆占压倒优势 表 1-2 为世界各种堆型核电站装机容量一览表。

压水堆核电站是在核潜艇反应堆的基础上发展起来的。自从 1957 年第一座压水堆核电站运行以来，世界上已有二十多个国家建造了和正在建造这种核电站。截止 1978 年底已经投入运行的压水堆核电站，装机容量为 5980 万千瓦，占核发电总装机容

**表 1-2 世界各种堆型核电站装机容量一览表**

(净电功率: 万千瓦, 截止 1978 年底)

		压水堆	沸水堆	气冷堆	重水堆	其 他	小 总
运行中	功率	5980	4043	1210	687	177	12097
	%	49.4	33.4	10	5.7	1.5	100
建造中	功率	15206	6798	429	1272	217	23922
	%	63.5	285	1.8	5.3	0.9	100
已订货	功率	5902	1356	264	252	38	7812
	%	75.55	17.36	3.38	3.23	0.50	100
计划中	功率	8068	902	117	392	3727	13206
	%	62.1	6.83	0.86	2.97	28.3	100
总 计	功率	35156	13099	2020	2603	4159	57036
	%	61.64	22.97	3.54	4.53	7.29	100

量的 49.4%；正在建造和计划中的压水堆核电站座，装机容量为 29276 万千瓦，占总装机容量的 66.8%。

由此可见，压水堆是目前各国核电站的主要堆型之一。预计在近 20—30 年时期内，压水堆在各类发电堆中将仍占优势。

## 第二节 核电站概述

核电站是利用原子核裂变过程中释放的核能来发电的。对于不同类型的核反应堆，相应的核电站的系统和设备有较大差别。为了便于具体说明，本书将以压水反应堆核电站为例，介绍核电站的系统、设备和工作原理。

压水堆核电站主要由核反应堆、一回路系统、二回路系统及

原书缺页

原书缺页

原书缺页

原书缺页



进行处理。放射性剂量降低到允许标准以下后，才排放出去或贮存起来，以达到保护核电站周围环境的目的。

### 第三节 核电站反应堆的构造

反应堆是以铀（或钚）作核燃料实现可控制的链式裂变反应的装置。压水堆用低浓缩铀作核燃料，并用轻水作慢化剂和冷却剂。它由堆芯、堆内构件、压力壳及控制棒驱动机构等部件组成。图 1-4 表示出一个典型的压水反应堆的本体结构。

反应堆的堆芯是原子核裂变反应区，它是由核燃料组件、控制棒组件和启动中子源组件等组成。通常又称为活性区。

核燃料组件是产生核裂变并释放热量的重要部件。现代压水反应堆的燃料组件是采用低浓缩铀（铀-235的浓缩度约为2%—4%）作核燃料。先将核燃料制成圆柱状小块，装入锆合金包壳管内，将两端密封构成细长的燃料元件棒，然后，按一定形式排列成正方形或六角形的栅阵，中间用几层弹簧夹型的定位格架将元件棒夹紧，构成棒束型的燃料组件。

控制棒组件是用来控制反应堆核燃料链式裂变速率，从而实现启动反应堆，调节反应堆功率，正常停堆以及在事故情况时紧急停堆之目的。因此，它是保证反应堆安全可靠运行的重要部件。目前，压水反应堆中普遍采用束棒型控制棒组件。通常用铪或钨-铟-镉等吸收中子能力较强的物质做成吸收棒，外加不锈钢包壳，用机械连接件将若干根棒组成一束，然后插入反应堆内。

一座电功率为 90 万千瓦的压水反应堆，其堆芯共装有 157 束燃料组件，其中元件棒按  $17 \times 17$  正方形排列，总共有 41448 根。堆内有 52 组长束棒型控制棒组件和四组短棒控制棒组件。整个堆芯放在钢制压力壳中，并充满带硼酸溶液的高温高压水，这样构成直径约为 3 米、高约 3.5 米的核裂变反应区。核燃料的裂变反应是在燃料元件棒内发生的，热量从元件棒内传出。高温高压水在反应堆堆芯中起着慢化中子的作用，同时又作为带出反应