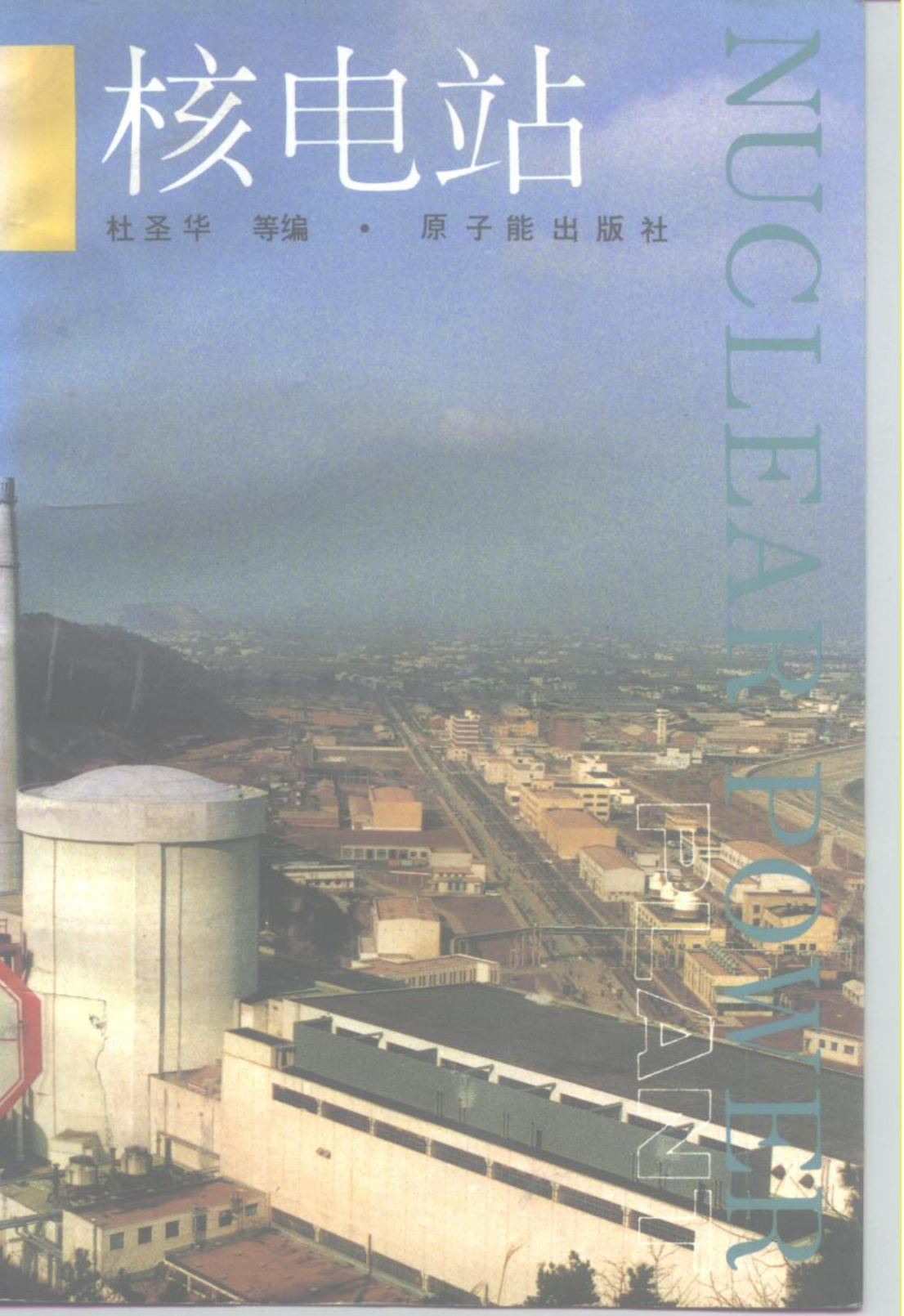


核电站

杜圣华 等编 · 原子能出版社

NUCLEAR
POWER
PLANT



TM 623
D
122

360556

核 电 站

杜 圣 华 等 编



原子能出版社

(京)新登字 077 号

EA15/11
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)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 1/32·印张 12.125·字数 315 千字
1992 年 6 月北京第二版·1992 年 6 月北京第二次印刷

印数 1—3000

ISBN7-5022-0644-2

TL·383 定价: 6.50 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,第八章由徐泽光、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;全书由杜圣华统编。最后由赵嘉瑞、鲍云樵、王奇卓同志进行了审校。

Capsule Summary

This book mainly describes the pressurized water reactor nuclear power plant (PWRNPP). The book is comprised of ten chapters. They deal with the following subjects of the PWRNPP respectively: the main constituent parts of the PWRNPP, reactor structure, reactor physics, reactor thermo-hydraulic principle, reactor control principle, the loop systems of the NPP, solid, liquid and gaseous radwaste treatments, radiation dose monitoring and protection, nuclear fuel cycle process as well as the improvements and prospects of the NPP.

The book is offered to the scientific and technological workers involved in NPP, to the teachers and students at colleges and universities who engage in or study the speciality relating to the NPP and to other readers who are interested in the NPP.

再版前言

核能发电作为一种新型的能源已经崛起,自从世界上第一座核电站建成以来,仅用 30 年的时间几乎走完了火电站 100 多年的发展历程,本世纪末核发电量将占世界发电量的五分之一。预计在今后若干年内核电将在电力工业中占有重要地位。

我国秦山核电站一期工程 30 万千瓦压水堆机组已于 1991 年 12 月 15 日并网发电成功。为了配合我国第一座自行设计建造的秦山核电站建成发电和广东大亚湾核电站的即将投产,有必要向关心核电站设计建设、运行管理、安全保障和环境保护的公众介绍核电站知识。为此,对 1982 年出版的《核电站》一书进行修订再版。

再版修订中收集了 90 年代世界核电最新发展材料,增加了以 AP-600 为代表的近期世界上中小型压水堆核电站和大型沸水堆核电站的改进和发展。同时把全书中所有计量单位改为国家法定计量单位。

目 录

第一章	核电站概况	(1)
第一节	核能发电的现状和发展前景	(1)
第二节	核电站概述	(5)
第三节	核电站反应堆的构造	(12)
第四节	核电站的优越性	(15)
第二章	反应堆物理原理	(20)
第一节	原子核的基本概念	(20)
第二节	反应堆的临界条件及通量分布	(30)
第三节	反应堆的燃烧过程	(38)
第四节	反应堆运行特性及控制原理	(45)
第三章	反应堆热工原理	(52)
第一节	反应堆内的热量传递过程	(52)
第二节	反应堆水力设计原理	(75)
第三节	核电站压水反应堆的热工设计简介	(81)
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	(89)
第三节	反应堆堆内构件	(100)
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	(120)
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)
第七章	核电站辐射防护及剂量监测	(214)
第一节	放射性和辐射剂量	(214)
第二节	核电站放射性来源	(229)
第三节	核电站的放射性防护屏蔽	(233)
第四节	屏蔽计算简介	(235)
第五节	核电站的辐射剂量监测	(242)
第八章	核电站的三废处理和环境保护	(256)
第一节	核电站放射性三废概述	(257)
第二节	核电站放射性三废及其处理	(261)
第三节	放射性物质对环境的影响	(270)
第四节	废热对环境的影响	(273)
第五节	环境保护和厂址选择	(277)
第六节	核电站和火电站对环境影响的比较	(280)
第九章	核电站的燃料循环	(283)
第一节	核电站和燃料循环	(283)
第二节	核燃料的加工制造工艺	(287)
第三节	核电站反应堆的装料与换料	(294)
第四节	核燃料的后处理	(301)
第五节	核资源的有效利用	(305)
第十章	核电站反应堆的改进与发展	(314)
第一节	轻水堆核电站的改进和发展	(314)
第二节	重水堆核电站的改进和发展	(353)
第三节	高温气冷堆核电站的改进和发展	(362)
第四节	快中子增殖堆核电站的发展	(369)

第一章 核电站概况

第一节 核能发电的现状和发展前景

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，目前世界上发电消耗的能源主要来自石油、天然气和煤炭三大资源。其中，石油，天然气占 60%，煤占 25%。据国际能源资料统计：全世界已探明适合于经济开采的石油和天然气资源约四五十年储藏量。世界上煤的储藏量比较大，消耗也没有石油多，估计可开采 300 年左右。

然而，按目前能源消耗的增加速度和消耗量，如果继续依靠有机燃料来发电，就会带来两个令人深为忧虑的问题：

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 60 万千瓦的火力发电站为例，每天要烧掉约 5000 多吨优质煤（或 3300 多吨重油）。同时，向大气层倾吐出 200 多吨二氧化硫、二氧化碳和烟灰等有害物质，造成空气严重的污染，甚至增加大气层温室效应。

第二，煤和石油都是化学工业、轻纺工业的宝贵原料，仅作为燃料利用是极不经济的。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。若用石油来发电，不仅浪费而且将使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，投资的时间较长，大型水电站从动工兴建到开始运转，一般需要 20 年左右时

间。至于太阳能、潮汐能、风力及地热能,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。核燃料不仅单位体积能量大,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,并在海水中提取氘加以利用,则 1 吨海水中的氘用来作聚变反应时所释放的能量就相当于 350 吨煤,由此将为能量资源提供更为丰富的前景。海水中的氘,地球上的锂、铀和钍所蕴藏能量如能充分利用,则人类将可不再为能源问题而困扰。

核能发电作为一种新型的能源,发展迅速,到 1991 年底世界上已有 28 个国家和地区建成了 422 座核电站,发电容量约为 3.27 亿千瓦,正在建造中的 76 座;计划建造的还有 100 余座,加在一起共有 600 多座核电站。余部建成后装机容量可达 5 亿千瓦,发电量约占当时世界发电量的 20% 左右。表 1-1 列出了世界核发电总装机容量的发展状况。

从已运行的核电站装机容量来看,美国居首位,它的核电站装机容量占全世界的三分之一。其次是法国、苏联、日本和德国。有 18 个国家核发电比例已超过 10%。从发展速度来看,法国、日本、德国等国最快。特别是法国于 1974 年决定,停止建造火电厂,以核电逐步取代火电,在 1980—1990 年间将建造 9—10 座电功率为 90—120 万千瓦的核电站,总的电功率增加 1200 万千瓦,到 1990 年法国的核电已达 5577.8 万千瓦,超过法国总电力的 74.5%。图 1-1 列出世界核发电增长速率。

从发展趋势来看,在今后 30 年内世界上将有更多国家和地区拥有核电站,据国际原子能机构统计至 21 世纪初,将有 58 个国家和地区建造核电站,电站的总数将达到 1000 座,装机容量可达 8 亿千瓦左右,核发电量将占总发电量的 35% 以上。由此可见,在 21 世纪相当长一段时间内核电将成为电力工业的支柱。

表 1-1 世界核电站装机容量一览表

	运行机组		在建机组	
	堆 数	净电功率, MWe	堆 数	净电功率, MWe
阿根廷	2	935	1	692
比利时	7	5500		
巴西	1	626	1	1245
保加利亚	6	3538	1	953
加拿大	20	13993	2	1762
中国	1	300	2	1848
古巴			2	816
捷克斯洛伐克	8	3264	6	3336
芬兰	4	2310		
法国	57	57078	5	7005
德国	21	20390	2	1195
匈牙利	4	1645		
印度	7	1374	7	1540
伊朗			2	2392
日本	42	32044	10	7885
南朝鲜	9	7220	2	1900
墨西哥	1	654	1	654
荷兰	2	508		
巴基斯坦	1	125		
罗马尼亚			5	3125
南非	2	1842		
西班牙	9	7067		
瑞典	12	9817		
瑞士	5	2952		
英国	37	11506	1	1188
美国	112	100630	1	1165
苏联	45	34673	25	21255
南斯拉夫	1	632		
总 计	422	327547	76	59003

* 总计堆数包括中国台湾省的 6 座反应堆, 净电功率 4890MWe。

** 资料截止期 1991 年 12 月 31 日。

核能除了用于发电外, 近年来还发展建造了核供热站, 如苏联、

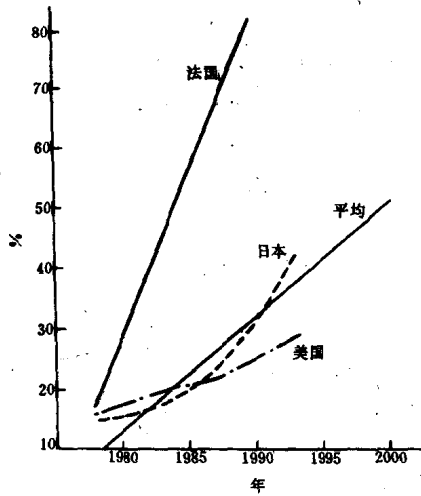


图 1-1 世界核发电增长速率

加拿大等国设计建造了低温供热站,利用反应堆产生的热量加热二回路的水使它成为低温蒸汽或热水,供工厂和居民区作工业热源或生活供热。

此外,核能还可作为火箭、宇宙飞船、人造卫星等动力能源。由于核动力不需要空气助燃,因而它可作为地下、水中和太空缺乏空气环境下的特殊动力,它将是人类开发海底资源的理想动力。

我国的煤炭、水力和石油资源有一定的蕴藏量,但是我国人口众多,人均能耗及产值较低,随着国民经济的发展,总能耗在今后几十年内将有较大幅度的增长。可以预见到我国能源缺口很大,煤、石油和水力能的增加仍然不能满足能耗的增长需要。而且煤和石油越来越多地用于化工原料,大量增加煤的燃烧量,不仅会使资源过早枯竭,且将给环境造成越来越严重的污染。特别是我国能源分布不均,煤炭资源多在华北地区,水力资源多在西南地区,而在工业和人口较集中的东南沿海地区,煤炭和水力资源却又十分匮乏,就全国而论,虽然在一段时间内还不得不以煤为主要能源,但今后必须加强核能

的开发,才能满足我国能耗巨大增长的需要。因此,发展核电是我国能源规划的组成部分,无论对近期和将来补充或取代常规能源发电都是十分重要的措施。

核电站的设计、建造和运转是一项综合性很强的系统工程,牵涉到多种学科和工业部门,我国的原子能科学技术,虽然起步较晚,但经过 30 年的努力已打下良好的基础。早在 60 年代,我国成功地爆炸了原子弹、氢弹和研制成核潜艇,至今,核武器的研制技术已达到一定的水平。核技术军事上的应用,带动了矿山、冶金、机械制造和电子自动控制技术发展。这就为核电的建设打下了良好的基础。特别是近十年来通过第一座秦山 30 万千瓦压水堆核电站的研究、设计和建造,已初步形成了一个从核电站的设计、科研试验,核燃料开采,冶炼,加工制造,乏燃料的处理,各种大型核设备的加工制造及电站施工、安装、调试等完整的核工业体系。目前,我国已基本具备自行设计和建造中等规模核电站的能力。在秦山自建 30 万千瓦压水堆核电站和广东大亚湾引进二座电功率为 90 万千瓦核电机组的基础上,国家计划将以 30—60 万千瓦压水堆核电站作为商用核电站起步并在江苏、福建、东北等地区再建一批。到 2000 年我国将有 600 万千瓦左右的核电站投入电网,另将有 500 万千瓦左右核电站在建设中,应当看到,这一目标与我国国民经济发展对电力需求相比,还是很小的。但是,这将为 21 世纪核电的更大发展打下良好的基础。

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、二回路系统及其他辅助系统所组成。图 1-2 表示出压水堆核电站主要系统原理流程。

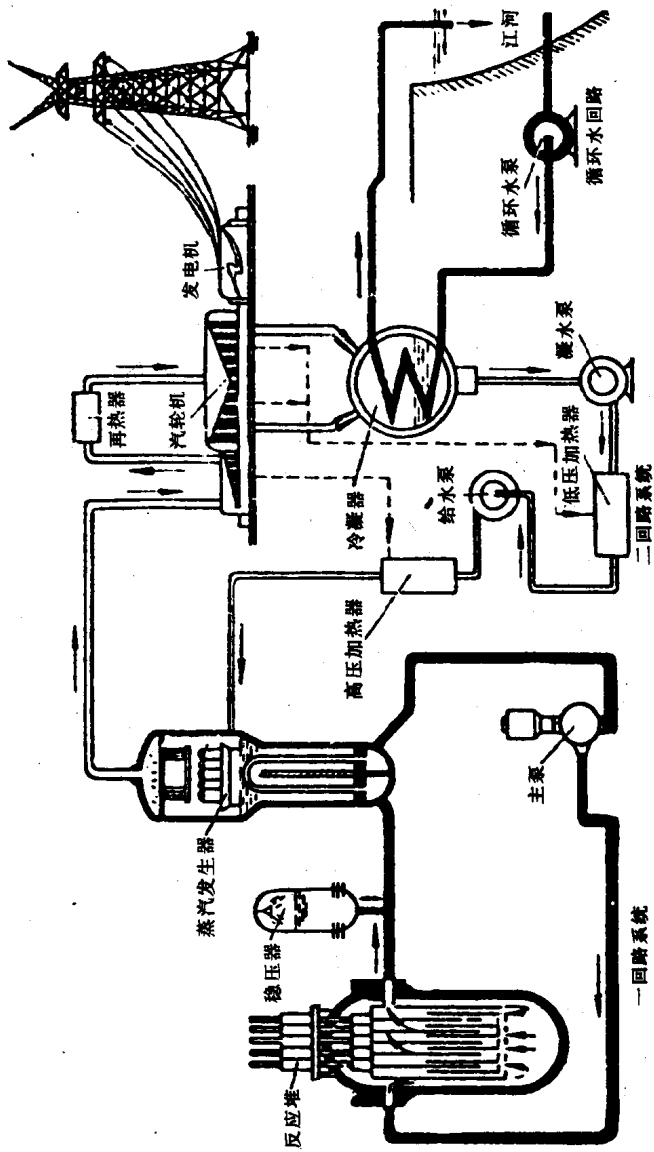


图 1-2 压水堆核电站流程原理图

核反应堆是核电站动力装置的重要设备。同时,由于反应堆内进行的是裂变反应,因此它又是放射性的发源地。一座电功率为 60—90 万千瓦的核电站,反应堆本体总高约为 15 米,外径为 4—5 米,壳体总重约为 250—350 吨。它安装在核电站主厂房的反应堆大厅内,通过环向接管段与一回路的主管道相连。反应堆的全部重量由接管支座承受,即使发生大的地震,仍能保持其稳定的位置。核反应堆内装有一定数量的核燃料,核燃料裂变过程中放出的热能,由流经反应堆内的冷却剂带出反应堆,送往蒸汽发生器。

一回路系统由核反应堆、主循环泵、稳压器、蒸汽发生器和相应的管道、阀门及其他辅助设备所组成。高温高压的冷却水由主循环泵唧送流经反应堆,吸收核燃料裂变放出的热能后,流进蒸汽发生器,通过蒸汽发生器再将热量传递给在管外流动的二回路给水,使它变成蒸汽;此后,再由主循环泵将冷却剂重新唧送至反应堆内。如此循环往复,构成一个密闭的循环回路。一回路系统的压力由稳压器来控制。现代大功率的压水堆核电站一回路系统,一般有 2—4 个回路对称地并联在反应堆压力壳接管上。每个回路由一台主循环泵、一台蒸汽发生器和管道等组成。

二回路系统是将蒸汽的热能转化为电能的装置。它由汽水分离器、汽轮机、冷凝器、凝结水泵、给水泵、给水加热器、除氧器等设备组成。二回路给水吸收了一回路的热量后成为蒸汽,然后进入汽轮机做功,带动发电机发电。做功后的乏汽排入冷凝器内,凝结成水,然后由凝结水泵送入加热器,加热后重新返回蒸汽发生器,构成二回路的密闭循环。从图 1-2 可见,核电站的二回路系统与普通火电站的动力回路相似。蒸汽发生器及一回路系统(通常称为“核蒸汽供应系统”)相当于火电站的锅炉系统。但是,由于核反应堆是强放射源,流经反应堆的冷却剂带有一定的放射性,特别是在燃料元件破损的事故情况下,回路的放射性剂量很高。因此,从反应堆流出来的冷却剂一般不宜直接送入汽轮机,否则将会造成汽轮发电机组操作维修上的困难。所以,压水堆核电站比普通电站多一套动力回路。

核电站一般由一回路厂房、二回路厂房、一回路辅助厂房、输配电厂房、循环水泵房及三废处理厂房等组成。图 1-3 表示一座压水堆核电站厂房布置情况。

反应堆、蒸汽发生器、主循环泵、稳压器及管道阀门等设备集中布置在一个立式圆柱状半球形顶盖或球形的建筑物内，这个建筑物通常称为反应堆安全壳。安全壳为内径约 30—40 米，高约 60—70 米的预应力混凝土大型建筑物。它的作用是将一回路系统中带放射性物质的主要设备包围在一起，以防止放射性物质向外扩散。即使核电站发生最严重的事故，放射性物质仍能全部安全地封闭在安全壳内，不致影响到周围的环境。安全壳厂房内还设有一台旋转式大吊车，专供大型设备安装、维修和换料运输用。厂房内主要设备均应布置在吊车主钩的工作范围之内。反应堆的一侧设有换料水池和核电站燃料装换机构，供核电站更换燃料操作之用。图 1-4 表示安全壳厂房的布置。

核电站的二回路厂房与普通火电站的汽轮发电机组厂房相似。其中设置有汽轮发电机组、冷凝器、凝结水泵、低压回水加热器、高压回水加热器、除氧器、给水泵、汽水分离器、主蒸汽管道及有关的辅助设备。二回路主蒸汽管道与蒸汽发生器相连。核电站的一回路辅助系统厂房是一个为反应堆主回路系统安全可靠运行而设置的辅助厂房。为了适应反应堆主回路系统既能安全运行又要缩小安全壳厂房容积的要求，只把一回路带放射性的主要设备集中布置在安全壳内。其他设施，如核电站的控制调节、安全保护、剂量监测、新旧燃料的贮存及电气设备等，分别设置在一回路安全壳厂房的周围。

除一、二回路主、辅厂房外，核电站还设有循环水泵房、输配电厂房和放射性三废处理车间等。放射性三废处理车间是核电站特有的车间。该车间对核电站在正常运行或事故情况下排放出来的带有放射性的物质，按其相态不同及剂量水平的差异，分别进行处理。放射性剂量降低到允许标准以下的放射性物质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。

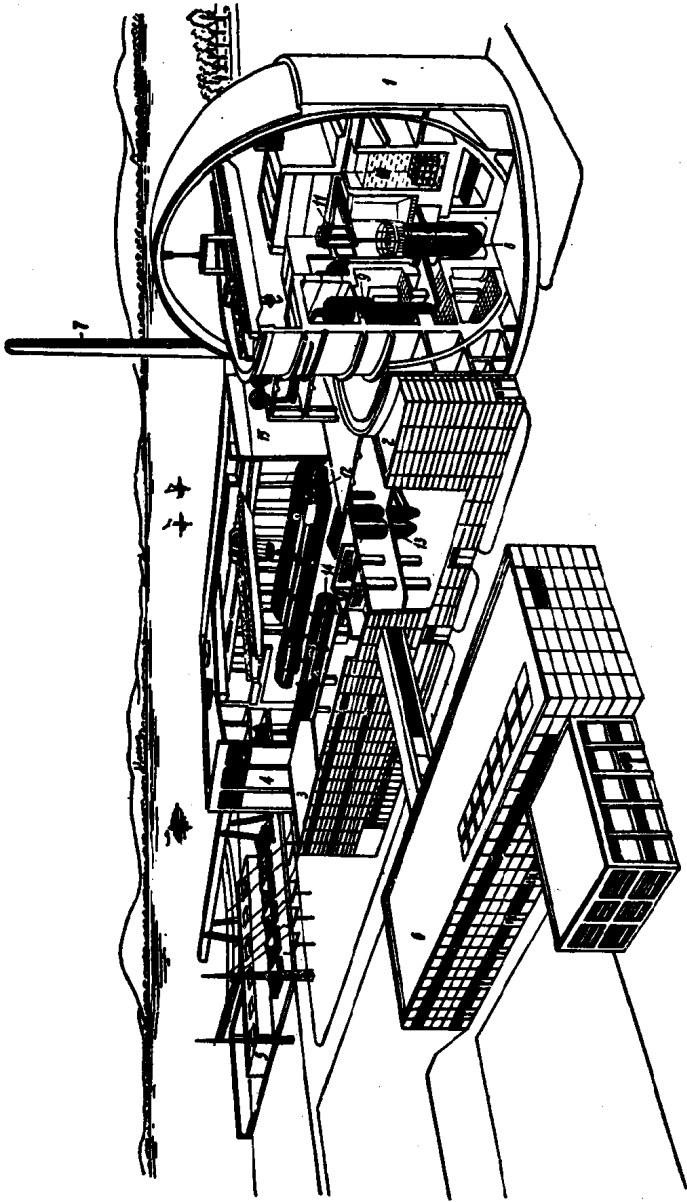


图 1-3 压水堆核电站厂房布置图

- 1 反应堆厂房 2 反应堆辅助厂房 3 开关房 4 汽机房 5 循环泵房 6
 办公楼 7 通风烟囱 8 反应堆 9 蒸汽发生器 10 燃料水池 11 换料机构
 12 汽轮发电机组 13 给水加热器 14 水箱 15 吸音装置 16 控制室