



核

屠传经 胡美丽 编

电

浙江大学出版社

厂

核 电 厂

屠传经 胡美丽 编

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书以压水堆核电厂作为重点,对核电厂的工作原理、各个系统及设备、控制及运行、安全性及厂址选择等各种有关问题作了简要而又全面的叙述,并介绍了我国的核安全法规体系。最后,简要叙述了各种型式的核电厂及核供热厂。

本书可作为电厂热能动力装置专业及其它工科专业核电厂课程的教材,也可供与核电厂有关的工程技术人员阅读。

核 电 厂

屠传经 胡美丽 编
责任编辑 李桂云

* * *

浙江大学出版社出版
浙江良渚印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

* * *

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.625 字数: 190千
1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷
印数0001—1300

ISBN 7-308-00794-4

TL·001 定价: 2.60元

前 言

目前,全世界的核发电量占世界总发电量的17%。我国秦山核电厂30万千瓦机组于1991年投入运行,广东大亚湾核电厂90万千瓦机组不久也将投入运行,核电将逐步成为我国能源工业的重要支柱之一。为适应这一发展形势的需要,在电厂热动力装置专业中开设核电厂课程很有必要,同时其它各相关工科专业也有这一需要,但尚缺乏合适的教材,作者为此特编写了本书。全书共分六章,以压水堆核电厂作为重点。第一章叙述核反应堆的物理及工程基础,第二章及第三章分别叙述压水堆核电厂的一回路、二回路系统与设备,第四章叙述了压水堆核电厂的控制与运行,第五章分析压水堆核电厂的安全性及厂址选择问题,第六章叙述各种型式的核电厂及核供热厂。内容简要而又全面,并力求结合我国实际。

本书主要内容曾由作者作为核电厂课程讲授多年。本次出版由屠传经编写绪言及第一、二、四、五、六章;胡美丽编写第三章。书稿由浙江省核电厂事故应急委员会专家组成员浙江省科技情报研究所副研究员徐燕椿审阅并提出了许多宝贵意见,作者在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中谬误在所难免,欢迎读者批评指正。

作者 1990年12月

绪 言

一、核电厂的优越性

核能是现代能源之一，特别在能源结构从石油转向非油能源的新时期，核能、煤炭和节能被视为解决能源短缺的希望。核能的优越性表现在：

(1) 核能是有效的替代能源

100多年来，火力发电在电力生产中占有主导地位，供火电站用的化石燃料资源（煤炭、石油和天然气），经长期消耗，越来越少。据估计，全世界已探明的石油和天然气可能在今后几十年内耗尽，煤炭探明储量也只能用几百年，但可开发的核燃料资源提供的裂变能可用上千年、提供的聚变能可供人类用几亿年。世界能源向以核能为主的转化势在必行。

发展核电可以节省大量化石燃料，使化石燃料资源作为化工原料加以利用。

(2) 建造核电厂经济上合算

国外核电厂的基建投资比同容量火电厂大50%左右，但如果把各自的燃料开采、加工和运输投资都包括进去，则核电和火电的综合投资相近，国内的分析也得到相近的结论。从发电成本来分析，由于核电厂燃料费用便宜，虽然由建厂投资而分摊的固定费用及维修费用比火电厂高，在国外核电厂的发电成本比火电厂低1/3左右，国内的分析也得到相近的结论。确切的比较数值取决于具体的地区情况。

(3) 核能可以缓解交通运输的紧张

一座1000MW电功率的压水堆核电厂，一年只需要25~30 t

低浓缩铀，这些铀只要一节车皮就能拉走，但相同容量的煤电厂，一年就要烧掉3.5Mt原煤，要用1000列火车运输，还要拉走0.4Mt灰渣。

(4) 核能是安全清洁的能源

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，核电厂在正常运行时，附近居民，每年接受的放射性剂量只有0.01mSv（毫希）[1mrem（毫雷姆）]或更低些，为天然本底放射性剂量的数十分之一。而煤电站向大气排放大量的烟灰及二氧化硫、一氧化碳及氧化氮等有毒气体，还可能包括有些煤炭中包含的微量镭、铀、钍等放射性元素。

压水堆核电厂发生事故时仍具有足够高的安全性。到1988年底，全世界核电站共有4828堆一年的运行经验，压水堆核电厂从未发生向外界大量泄放放射性的事故，1979年3月美国发生了三哩岛压水堆核电厂事故，正由于第三道安全屏障（安全壳）的作用，没有发生放射性的大量外泄。1986年4月，苏联切尔诺贝利核电厂（石墨慢化压力管式反应堆）发生了严重的放射性外泄事故，也正是由于它没有第三道屏障（安全壳），目前这种型式的核电厂已停止再建造。其实核电厂的事故率比任何电厂都低，目前对核电厂的安全性设计愈加重视，因而安全性能做到了充分保证。

二、世界核电厂发展概况

到1989年底，全世界已投入运行的各种形式的核电厂共有426座，总净电功率为 $318.3 \times 10^3 \text{MW}$ ，其中压水堆核电厂的比例约占60%，正在建造和订货的核电厂中压水堆占的比例更大。美国的核电厂容量在世界上处于领先，1989年底净核电功率达到 $100 \times 10^3 \text{MW}$ （1亿kW），法国近年来核电发展很快，仅次于美国而跃居世界第二位，1989年底净核电功率已达到 $52.58 \times 10^3 \text{MW}$ 。

表1 1986~1989年世界上拥有核电厂的国家
或地区核发电量占总发电量的比例(%)

国家或地区	1989	1988	1987	1986	国家或地区	1989	1988	1987	1986
法国	74.6	69.9	69.8	69.8	美国	19.1	19.5	17.7	16.6
比利时	60.8	65.5	66.0	67.0	加拿大	15.6	16.0	15.1	14.7
南朝鲜	50.2	46.9	53.3	43.6	苏联	12.3	12.6	11.2	10.1
匈牙利	49.8	48.9	39.2	25.8	阿根廷	11.4	11.2	13.4	12.2
瑞典	45.1	46.9	45.3	50.3	民主德国	10.9	9.9	9.4	9.7
瑞士	41.6	37.4	38.3	39.2	南非	7.4	7.3	4.5	6.8
西班牙	38.4	36.1	31.3	29.4	南斯拉夫	5.9	5.2	5.6	5.4
芬兰	35.4	36.0	36.6	38.4	荷兰	5.4	5.3	5.2	6.2
联邦德国	34.3	34.0	31.3	29.4	印度	1.6	3.0	2.6	2.7
保加利亚	32.9	35.6	28.6	30.0	巴西	0.7	0.3	0.5	0.1
日本	27.8	23.4	29.1	24.7	巴基斯坦	0.2	0.6	1.0	1.8
捷克斯洛伐克	27.6	26.7	25.9	21.1	意大利	0.0	0.0	0.1	4.5
英国	21.7	19.3	17.5	18.4	中国台湾省	35.2	41.0	48.5	43.8

苏联在1989年底，净核电功率为 $34.23 \times 10^3 \text{MW}$ ，居世界第三位。再其次为日本、联邦德国、英国、加拿大、瑞典等。

近二、三十年来，核电得到了迅速的发展，全世界的核发电量占世界总发电量的17%。各个国家核电占总发电量的比例见表1所示，以1989年为例，法国最高，占74.6%；比利时为60.8%；南朝鲜为50.2%；占40%以上的国家还有：匈牙利为49.8%，瑞典为45.1%，瑞士为41.6%；占30~40%比例的国家有：西班牙为38.4%，芬兰为35.4%，联邦德国为34.3%，保加利亚为32.9%。

三、我国核电厂发展前景

我国四化建设需要大量的能源，能源的开发，特别是电力的

发展，已成为影响我国经济发展的一个重要因素。但是，我国火电受到煤炭资源分布不均和铁路运力不足的制约，且严重污染环境，我国水电的发展受到地域、移民和季节等因素的限制。因此我国电力发展的方针是：大力发展火电，努力发展水电，逐步积极发展核电。在东南沿海和东北地区，煤的运输严重受到限制，又缺乏水电资源，将逐步建设一部分核电。预计到2000年以后，核电将逐步成为我国能源工业的重要支柱之一。

我国在研制核武器的过程中，已探明一定数量的铀资源，除军用外，可供一大批压水堆核电站运行数十年。全国大部份地区尚未普查勘探，潜力还很大。此外，我国还有大量的钍资源。

我国发展核电的方针是“安全第一，质量第一”。通过秦山核电站30万千瓦（300MW）机组的建设，初步形成了压水堆核电机组的制造体系。通过大亚湾核电站90万千瓦（900MW）机组的建设，引进了国外压水堆核电机组的先进设备。在此基础上，积极开发国产60万千瓦（600MW）或更大压水堆核电机组，以达到统一规范，实现标准化、国产化、批量化生产，成为今后一、二十年中我国核电的主力堆型。我国在核潜艇用的小型压水堆设计、制造与运行方面，已经积累了很多经验，也有助于压水堆核电站的建设。

核电站的建设需要有一整套的核工业体系与其配套，核工业是综合性强、技术要求高的工业体系，包括：核材料、核燃料、核设备、核仪表、核电站、后处理、各种试验性反应堆等，核电站是核工业的主要环节，核工业也是发展核武器及核潜艇的基础。我国已有一个规模虽然不大，但较为完整的（除核电站以外）核工业体系，拥有一大批有经验有能力的核学者、专家和工程技术人员，因而我国核电事业的发展已具有较好的基础。我国发展核电虽然起步较晚，但有条件、有能力、有信心发展得较快些。

四、压水堆核电厂概况

核电厂的核心是反应堆，核反应堆是实现核燃料可控链式裂变反应的装置。中子的速度愈低，击中核燃料的原子核引起核裂变的几率愈大，使中子慢化的物质称为慢化剂；将裂变产生的热量带出反应堆的物质称为冷却剂。

轻水堆是以加压的普通水（轻水）作为慢化剂和冷却剂的核反应堆，如果不允许水在堆内沸腾，则称为压水堆；如果允许水在堆内沸腾，则称为沸水堆。轻水堆是目前最主要的堆型，轻水堆中绝大部分是压水堆，因为水如果在堆内沸腾，将会产生一系列较复杂的问题。

由于水的慢化能力及载热能力都好，所以压水堆的结构紧凑，堆芯体积小，堆芯的功率密度大。因此体积相同时，压水堆功率最高；或者在相同功率下，压水堆比其它堆的体积小。这是压水堆的主要优点，也是它的基建费用低，建设周期短的主要原因。

压水堆的主要缺点为：第一，为了提高从反应堆出来的冷却剂温度，即出口水温，以提高电站效率，必须提高压力，因而压水反应堆具有承受高压的压力壳。第二，轻水吸收慢化后中子的几率比较大。所以轻水慢化的压水反应堆无法以天然铀（含有铀-235,0.72%）维持链式裂变反应。必须应用低浓缩铀（含有铀-235,3%左右）作为核燃料。

压水堆之所以发展得最快，除了前述的优点外，还有下列原因：

(1) 压水堆有军用的基础。舰艇用的反应堆都是压水堆，压水堆在作为核电站的堆型前，已经作为军用堆进行了大量研究，技术问题解决得比较彻底，并已有了加工压水堆部件的工业基础。压水堆已成为成熟的堆型。

(2) 工业上有使用轻水的长期经验。水是研究最多的传热工质。

(3) 核工业的发展，已为压水堆所需要的低浓缩铀准备了条件。

压水堆核电站由压水堆、一回路系统和二回路系统三个主要部份组成，如图 1 所示。

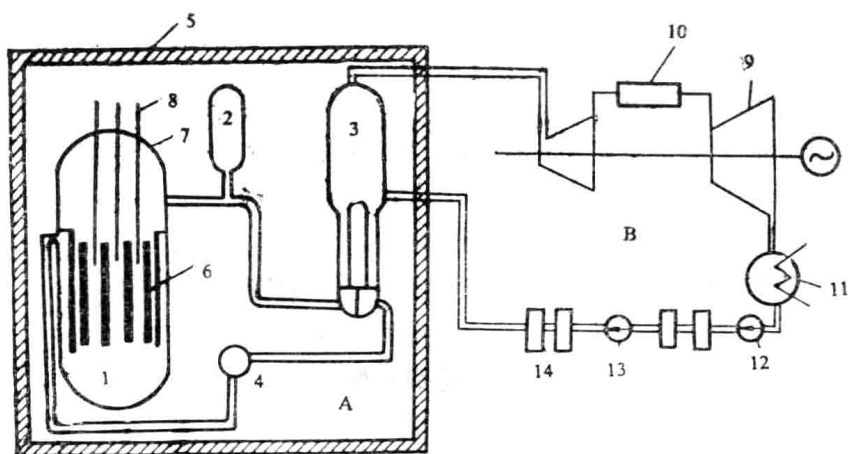


图 1 压水堆核电站流程

1. 压水堆 2. 稳压器 3. 蒸汽发生器 4. 主泵 5. 安全壳 6. 燃料组件
7. 压力壳 8. 控制棒 9. 汽轮发电机组 10. 汽水分离—再热器 11. 冷凝器
12. 凝结水泵 13. 给水泵 14. 给水加热器 A. 一回路系统 B. 二回路系统

核燃料棒按 17×17 排列，组成燃料组件，由燃料组件组成的堆芯放在一个压力壳内。控制棒由上部插入堆芯。在压力壳顶部有控制棒的驱动机构。作为慢化剂和冷却剂的水，由压力壳侧面进来后，经过环形间隙，再从下部进入堆芯。冷却水通过堆芯后，温度升高，从堆芯上部流出压力壳。一般入口水温约为 $290 \sim 300^\circ\text{C}$ ，出口水温约为 $320 \sim 330^\circ\text{C}$ ，堆内压力约为 15.5MPa 。

一座 900MW 电功率的压水堆，堆芯每小时冷却水的流量约

$60 \times 10^3 \text{t}$ 。这些冷却水并不排出堆外，而是在封闭的一回路内往复循环。高温的冷却水离开反应堆后，进入蒸汽发生器，它从蒸汽发生器管内流过后，经过一回路循环泵又回到反应堆。一回路循环泵又称主泵。在反应堆出口和蒸汽发生器之间连有稳压器，用来保持堆内冷却水压力的稳定。蒸汽发生器内有很多管子，管子外为二回路的水，一回路的水流过蒸汽发生器管内时，热量传给二回路中的水，从而使它变为 $6 \sim 7 \text{MPa}$ 左右的饱和蒸汽或微过热蒸汽，进入汽轮机。反应堆及一回路的主管道、蒸汽发生器、稳压器、主泵及与其有关的辅助系统组成的。系统起到了如同火电厂中锅炉一样提供蒸汽的作用，被称为核蒸汽供应系统(NSSS)。

压水堆核电厂的二回路系统的作用是将核蒸汽供应系统产生的蒸汽做功转变为电能。由于一回路冷却水温度的限制，压水堆核电厂二回路的蒸汽压力比火电厂要低，应采用焓降小、蒸汽流量大、转速比较低的饱和蒸汽轮机。为了提高蒸汽干度，高低压缸之间要设置汽水分离再热器。二回路的其它设备与常规火电厂大致相同。

压水堆核电厂的安全性是完全保证的，它在放射性源与外界之间设置了三道屏障，它们是：

第一道屏障——燃料棒的包壳；

第二道屏障——一回路系统承压边界；

第三道屏障——安全壳。

反应堆及一回路系统的主要设备与管道（包括一些辅助系统及设备）都包容在安全壳内，安全壳由预应力重钢筋混凝土浇注而成，里面有不锈钢内衬。

五、核工业体系

核电厂有一整套与之适应的原料供应、材料生产、燃料元件加工、设备制造、后处理等工业体系。特别是由于核燃料在反应

堆中并非一次烧尽，形成核燃料循环体系，它是核工业体系的主要内容。图2为表示压水堆的核燃料循环的示意图。

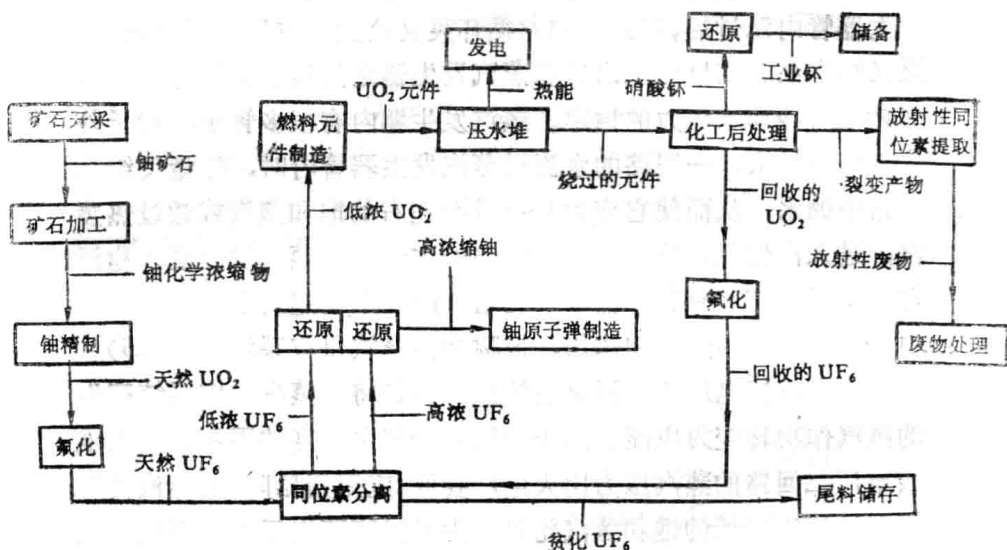


图2 压水堆核燃料循环

(1) 铀的提取和转换。铀矿石的品位较低，少数富矿含铀量约为1~4%，中等品位为千分之几。矿石先用破碎、磨细和分级方法处理，然后用化学的方法，经过浸出、溶剂萃取以及沉淀等主要步骤，得到铀的化学浓缩物 U_3O_8 ，通常称为黄饼。

由于化学浓缩物中含有很多的杂质，不能直接使用，需要经过离子交换或溶液萃取等工序去掉杂质，这一工序称为铀的精制。

将精制后的铀化学浓缩物 U_3O_8 转换为 UO_2 ，再还原为 UO_2 ，然后与氟化氢反应，生成 UF_4 ，最后与氟气作用，得到 UF_6 。最终 UF_6 装瓶运往铀-235浓缩工厂。

(2) 铀-235的浓缩

天然铀中含有0.7%的铀-235，铀-235同位素的浓缩是燃料循环的一个重要环节，采用的方法有气体扩散法、离心法、喷咀

法、激光法等，其中气体扩散法技术最为成熟，可以工业规模生产，但由于气体扩散法技术难度大，世界上仅美、苏、英、法及我国有气体扩散工厂。其中，分离膜和压缩机是最关键的部件及设备。

铀-235的浓缩要消耗大量电能。由于要求达到的浓缩度不同及剩余尾料浓度的不同，耗电数量也不同。国际上统一用公斤分离功或吨分离功单位(kg SWU或t SWU)表示。1kgSWU具有下列能力：从2.35kg的天然铀加料中，浓缩出1kg含1.4%铀-235的低浓缩铀，所余1.35kg尾料的铀-235浓度为0.2%。各种具体情况下，均可算出所需的分离功单位。每公斤分离功约耗电 $2500\sim 3000\text{kWh}$ ，以一个 9000tSWU/y 的气体扩散工厂而言，设备电功率约为 2000MW 。

(3) 燃料组件制造

燃料组件由燃料棒组成，燃料棒的外壳称为包壳，压水堆燃料棒包壳采用锆-4(一种锆合金，含1.5%Sn、0.2%Fe及0.1%Cr)。核燃料为低浓缩铀，将已浓缩的 UF_6 还原为 UO_2 ，然后将 UO_2 粉末烧结成为燃料芯块，装入包壳管内。包壳和燃料芯块的装配需在专门的工厂中进行。

(4) 核燃料的运输

未辐射核燃料的放射性强度很低，燃料组件的运输无特殊困难。辐照过核燃料有强放射性，燃料组件的运输必须应用专门的屏蔽容器，容器要经受极严格的事故试验，容器还有专门的冷却系统。

(5) 辐射核燃料的后处理

后处理的目的是回收未烧掉的铀-235及在反应堆中由铀-238吸收中子后生成的钚-239，此外铀-238也需要回收，某些放射性裂变产物(如铯-137，锶-90)及超铀元素的提取，也有很大的科学与经济意义。后处理工厂的放射性是极强的，操作过程

都在屏蔽层后进行。

参 考 文 献

- [1] 中国能源研究会, 能源政策研究通讯, 1990年第11期。
- [2] 彭士禄, 为促进我国核电事业的发展而努力, 核动力工程, 1989年10卷1期, 第1页。
- [3] 孟先雍, 原子能工业, 原子能出版社。1978。

目 录

绪言

第一章	核反应堆的物理及工程基础	(1)
§ 1-1	原子核物理与中子物理	(1)
§ 1-2	反应堆临界条件及中子通量分布	(14)
§ 1-3	核燃料的燃耗	(26)
§ 1-4	反应堆运行特性及控制原理	(31)
§ 1-5	反应堆内的传热过程	(36)
§ 1-6	动力反应堆的分类	(51)
第二章	压水堆核电厂一回路系统及设备	(55)
§ 2-1	一回路系统简介	(55)
§ 2-2	堆芯及堆内构件(压水堆本体结构之一)	(58)
§ 2-3	压力壳(压水堆本体结构之二)	(71)
§ 2-4	主循环泵及主管道	(73)
§ 2-5	稳压器	(75)
§ 2-6	蒸汽发生器	(76)
§ 2-7	一回路辅助系统	(80)
第三章	压水堆核电厂二回路系统	(93)
§ 3-1	二回路系统简介	(93)
§ 3-2	汽轮发电机组	(96)
§ 3-3	二回路热力系统	(108)
§ 3-4	压水堆核电厂热力循环	(116)
§ 3-5	压水堆核电厂的热经济性分析	(130)
§ 3-6	二回路的原则性热力系统	(135)
第四章	压水堆核电厂的控制与运行	(144)
§ 4-1	压水堆核电厂的控制、安全保护和检测系统	(144)

§ 4-2	压水堆核电厂的调试	(150)
§ 4-3	压水堆核电厂的运行	(156)
第五章	压水堆核电厂的安全性及厂址选择	(166)
§ 5-1	核电厂安全性的保证	(166)
§ 5-2	核辐射的防护	(176)
§ 5-3	压水堆核电厂的三废处理	(181)
§ 5-4	压水堆核电厂的安全壳	(184)
§ 5-5	核电厂的厂址选择	(186)
§ 5-6	压水堆核电厂的布置	(190)
第六章	各种型式的核电厂及核供热厂	(194)
§ 6-1	压水堆(轻水慢化反应堆之一)核电厂的发展	(194)
§ 6-2	沸水堆(轻水慢化反应堆之二)核电厂	(201)
§ 6-3	重水慢化反应堆核电厂	(206)
§ 6-4	石墨慢化反应堆核电厂	(211)
§ 6-5	快中子增殖反应堆核电厂	(217)
§ 6-6	核热电厂及核供热厂	(220)
§ 6-7	热核反应堆核电厂	(224)

第一章 核反应堆的物理及工程基础

核反应堆是核电厂的核心装置。在核反应堆内，作为核燃料的原子核在中子轰击下发生裂变，裂变时将释放出巨大的能量。这种能量，称为核能。利用核能发电的电厂称为核电厂。为简单起见，下面均用反应堆来代替核反应堆。

§ 1-1 原子核物理与中子物理

一、原子核的结构

自然界的物质都由原子组成。原子是由位于中心带正电荷的原子核和围绕原子核运动若干带负电荷的电子组成。最外层电子轨道的半径（也就是原子的半径），约为 10^{-10}m ，而原子核的半径约为 10^{-15}m ，仅占原子半径的十万分之一左右。原子核又由若干个带正电荷的质子和若干个不带电的中子组成。

质子和中子是两种基本粒子，统称为核子，它们的质量几乎相等，而电子的质量约为核子质量的 $1/1836$ 。虽然原子核在原子中只占据其空间的极小部分，但原子的质量几乎全部集中在原子核上。

表1-1列出了质子、中子和电子的比较。

表中amu是原子质量单位的简称， $1\text{amu} = 1.66053 \times 10^{-24}\text{g}$ 。

在正常情况下，原子的电子数恰好等于质子数，两者所带电荷的数量相等而符号相反，因此原子呈电中性。某一元素原子核内的质子数，亦即核外电子数称为该元素的原子序数，用符号 Z 表示。原子核内质子和中子的总数叫做该元素的质量数，用符号