

(41)

# 压管式重水堆 核电站

王奇卓 徐及明等 编著

原子能出版社

75.152  
128

压管式重水堆  
核 电 站

王奇卓 徐及明等编著

原 子 能 出 版 社

## 内 容 简 介

压管式重水堆核电站是加拿大研究和发展的一种天然铀重水堆核电站，具有许多独特的优点和特性。本书概括地介绍这种类型核电站的主要系统和设备，给出了一些特性参数和实例，反映了当代重水动力堆的水平与技术。

本书可供从事核电站设计、运行、管理的人员使用，也可作为高等院校核能专业师生的专业参考书。

2F51/51

### 压 管 式 重 水 堆 核 电 站

王奇卓 徐及明等编著

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $13\frac{3}{4}$  · 字数 334 千字

1985 年 2 月第一版·1985 年 2 月第一次印刷

印数 1—900 · 统一书号: 15175·562

定价: 1.75 元

# 前 言

随着国民经济的迅速发展、人口的不断增加和人民生活水平的提高，能量的需求越来越大。人类长期使用的化石燃料——煤、石油、天然气等储量有限，已不能满足日益增长的能源需求，必须大量开发和广泛利用新能源。

核能是目前可以工业规模利用的、有广阔发展前途的新能源。至1982年底，世界上核电站的总装机容量已达~1.7亿千瓦，约占各种类型电站总容量的7%。预计到2000年核电站的总装机容量达6—8亿千瓦，占各种电站总容量的30—40%。

核电站的类型也很多，目前比较成熟的堆型是轻水堆（压水堆和沸水堆）和重水堆。这两种堆型各有其优缺点。坎杜型压管式重水堆主要是由加拿大研究、发展的，在核电站总数中它所占比重并不大（~4%），但却引起人们的高度重视，这主要是由于：

1. 重水堆利用天然铀作燃料，燃料价格比较便宜，裂变物质的利用率高；
2. 能够不停堆装卸料，运行负荷因子高；
3. 中子经济性好，转换比大，与轻水堆相比，产钚量高；
4. 能够比较方便地通过钍-铀循环开发和利用钍资源。

堆型选择是一个复杂的问题。在快中子增殖堆尚未达到实用阶段之前，重水堆的独特优点也许会被人们逐渐重视，并可望得到广泛的发展。

本书概要地介绍重水堆核电站的主要系统和主要设备，列举了一些重要的特性参数与工程数据，反映了当代重水动力堆的实际水平与新技术。本书可供从事核电站设计、运行、管理的人员使用，对于高等院校核能专业的师生也有参考价值。

参加本书编写的有（按章节顺序）王奇卓、徐及明、包笈年、朱文斌、王朝忠、于维栋、骆志伟、王兆良、华明川等。田树全、丁虎也参与了本书的编写工作。王奇卓、徐及明、鲍云樵等人为本书进行了校改。作者感谢所有为本书提过有益建议的同志、感谢原子能出版社同志们对本书出版所作的努力！

由于我们水平有限，请读者对书中的错误和不足之处提出指正！

编者一九八三年三月

## 目 录

|     |                      |        |
|-----|----------------------|--------|
| 第一章 | 概 述.....             | ( 1 )  |
| 第二章 | 反应堆物理.....           | ( 19 ) |
| 第三章 | 重水堆热工问题.....         | ( 53 ) |
| 第四章 | 重水堆核电站主要系统.....      | ( 71 ) |
| 第五章 | 反应堆本体结构.....         | ( 93 ) |
| 第六章 | 坎杜型重水堆燃料元件.....      | (113)  |
| 第七章 | 坎杜型重水堆的装卸料.....      | (130)  |
| 第八章 | 重水堆核电站的控制、监测与保护..... | (140)  |
| 第九章 | 重水堆的安全性能.....        | (165)  |
| 第十章 | 辐射防护.....            | (186)  |

# 第一章 概述

## 第一节 核能在能源中的地位

能源是发展国民经济和提高人民生活水平的重要物质基础。能源的开发和有效利用，对于我国四个现代化建设具有重大意义。

能源问题也是世界性的重要议题。近30年来，能源消耗逐年剧增。据统计，开发的煤炭中约25%用于发电，世界主要发达国家的总耗电量约每十年翻一番。如果按这样的速度发展下去，作为目前主要能源的化石燃料——煤、石油、天然气，可能再过五十年左右就会被耗尽。因此，必须寻找新的能源，否则将会出现能源供不应求的严重局面，即所谓“能源危机”或称“能源短缺”。

当然，世界上的人口不可能一直按目前的速度增加，总耗能量也不可能一直按目前较高的速率(每年约7%)增长，存在于大自然中的能源是非常丰富的，足以供人类长期使用。但是，如果计划不周，未能及时地开发和利用新能源，在某一段时期内出现能源短缺，是完全可能的。

下面从能源种类谈起，简单介绍一下能源的储量以及核能在能源发展中的地位。

### 一、能源种类

地球上的能源大体上可分为三大类：第一类是太阳辐射能和宇宙射线；第二类是地球与其他天体作用而产生的能(如潮汐能)；第三类是地球自身所固有的能(如地热能、核能资源等)。

在第一类能源中，太阳对地球的辐射能是人类利用得最早的能源。太阳是巨大的能源。它离地球约一亿五千万公里，是一个质量为二千亿亿吨的大火球，直径约为139万公里。太阳的平均密度只有1.4克/厘米<sup>3</sup>，但中心密度比水还大100多倍，中心压力达二千亿大气压。在这里所有的气体都电离了，横冲直撞地运动着。在太阳里，氢原子很多，连续不断地、大量地进行着氢核聚变成氦核的热核反应。据推算，太阳内每秒钟有几亿吨的氢聚合成氦，其能量相当于爆炸几百亿颗百万吨级的氢弹，相当于1.3亿亿吨标准煤的发热量。因此，太阳的中心温度达4000亿度，表面温度约为6000度。几十亿年来，太阳向地球辐射巨大能量。阳光哺育着地球上的万物，在地壳变动时，大量的动植物被埋入地下，为后人留下了数量十分可观的化石燃料。

第一类能源主要包括以下几个方面：

1. 直接利用太阳能供热及发电；
2. 利用光合作用固定下来的能量：远古留下的煤、石油及天然气；地面上的薪柴能；
3. 太阳辐射能在地球上引起的风、海流、波浪、海洋温差能等；

4. 太阳辐射能使地球表面的水蒸发,水汽在空中遇冷凝结成雨,又降到地球表面,形成江河,这就是水力资源。

第二类能源主要是指潮汐能,它是海水受到太阳、月亮的引力而产生的。潮汐所引起的潮差与地方有关,最大潮差竟达19.6米。我国杭州湾的潮差最大达8.93米。利用潮差发电,称为潮汐发电。

第三类能源是指地热能及核能。地球上的火山爆发、地震、温泉(往往也是由于同位素自发衰变而产生的热量)等能量也很大。在核能中又分两种:一种是利用铀、钚等重同位素的核裂变所产生的巨大能量(1公斤铀裂变所产生的能量相当于2500吨标准煤完全燃烧放出的能量),铀、钚等是宇宙间发生超新星爆发留下的灰烬;另一种是利用轻同位素氘的聚变反应释放出的能量。1吨水中约有140克重水( $D_2O$ ),每克氘的聚变能量约为 $10^5$ 千瓦·小时。聚变反应放出的能量是非常巨大的。也就是说,一桶水中含有的氘,聚变后所释放出来的能量,相当于300桶石油。由此可见,如果能够工业规模地、经济地利用聚变能(可控热核反应),那么,人类也就最终地解决了能源需要问题。

## 二、能源储量

各种能源的理论储量是很惊人的,但有经济开采价值的储量只占其中很小一部份。

### (一) 太阳能的利用

据推算,太阳诞生至今约50亿年,已到了中年期。太阳每秒钟的辐射能为375亿亿亿焦耳,只有22亿分之一到地球,其中又有30%返回宇宙、23%被大气吸收。因此,只有47%到达地球表面,约为80万亿千瓦。太阳能的直接利用还有许多困难,主要是由于:

(1) 太阳辐射能的密度太小。如果不考虑大气的影响,太阳每分钟垂直辐射到地球每平方厘米表面上的能量为1.94卡,这被称为太阳系数,它相当于0.135瓦/厘米<sup>2</sup>;

(2) 受昼夜、天气及季节的影响。

太阳能的利用还处于研究阶段。目前,太阳灶、太阳能取暖房等,已得到广泛重视。

### (二) 水力资源

在地球的大气层中,经常含有约100亿吨水蒸气。全球平均年降雨量约为 $51 \times 10^4$ 公里<sup>3</sup>,流入大海的水量约为 $3.7 \times 10^4$ 公里<sup>3</sup>(相当于22个渤海的蓄水量)。瑞士、瑞典、挪威等国家的水力资源利用得比较充分,水电站的发电量占总发电量的比数很高。我国水力资源的理论蕴藏量约为6亿千瓦,居世界首位。但由于利用条件比较差及地理位置的限制,目前已开发的水力资源只占可利用资源的3%左右。

水力发电既不用燃料,又不污染环境,一次建成后可长期使用。无疑水力发电是值得大力发展的一种能源。根据我国具体情况,水力资源的利用存在以下几个特点:

(1) 水力资源分布不均匀,约有72%的水力资源集中于西南地区,主要有金沙江、岷江、雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、红水河等。这些地区工业不发达,用电量少,又受到地理条件的限制,开发难度比较大。在我国工业比较发达的东南地区,却很缺乏水力资源;

(2) 根据我国水力资源的地理位置、地质及水文条件,发展中、小型水电站是很适宜的。

建造大型水电站的困难比较多，如：一次投资很大（影响水电成本的因素很多，一般讲，水电成本比火电贵3—4倍）；建造周期长；淹没农田、搬迁工作量比较大；影响交通运输及破坏上下游的生态平衡等；

（3）建造水电站必须十分重视安全问题。大坝的设计要考虑地震、飓风、洪水、龙卷风等自然灾害的影响，甚至还要适当考虑飞机坠落等“公共模式”事故及战争破坏等异常事件。我国历史上水灾的悲痛教训是很多的。当然，任何一种能源都有潜在的危险性。

### （三）化 石 燃 料

在化石燃料中，煤一直占居首位。虽然它在一次能源中的相对比重将会不断下降（在燃料动力平衡中石油及天然气占第一位），但绝对消耗量却仍不断增加（1975年为22亿吨，预计到2000年可达80亿吨）。世界主要工业国和地区（除中国）煤的地质储量为~11万亿吨，有经济开采价值的储量约为一万四千亿吨。我国的煤炭资源很丰富，已探明的储量达六千亿吨。若回采率为50%，并以每十年翻一番（相当于每年增加7.2%）的高速度开采煤炭，也够用60多年。

煤作为直接燃料，对环境污染很严重。每燃烧一亿吨煤，会产生二千万吨灰渣、三百万吨烟尘、二百万吨二氧化硫，还有上百吨放射性物质（镭、铀、钍等）随灰弥散到环境中，危害人的健康，使癌症发病率增加。

1976年探明，世界上主要产油国的石油储量为八百多亿吨，现在的原油年产量约30亿吨，天然气的储量约为22万亿米<sup>3</sup>。

煤、石油及天然气等化石燃料，同时又是极为重要的化工原料，可以制做宝贵的化工产品。因此，将来应该逐渐减少它们作为燃料的消耗量，把它们留给子孙后代，派更大的用场。

随着工业的发展及人民生活水平的提高，世界上的能源消耗将会逐年剧增：1900年消耗约13.4亿吨标准燃料，1970年为72亿吨，到2000年预计达250亿吨。在所消耗的一次能源中，约有四分之一用于电力，全世界总发电量增长情况列于表1-1中。

表 1-1 全 世 界 总 发 电 量 增 长 情 况

| 年    | 总发电量，万亿度 | 每人每年用电量，度（总人数） |
|------|----------|----------------|
| 1960 | 2.3      | 765 (30 亿 人)   |
| 1970 | 5.2      | 1430 (36 亿 人)  |
| 1980 | 10.      | ~2600 (39 亿 人) |
| 2000 | ~40      | ~6000 (~65亿人)  |

由此可见，发电量大约每十年翻一番。如果将来一直以这样的速度发展下去，50—100年内外，全部化石燃料也许会被耗尽；水力资源是有限的，太阳能及其他形式的能源（风能、地热等）在将来较长一段时期内还不可能大规模工业应用；核聚变技术也许以后会有突破，但近几十年内还不可能发展到经济规模的工业应用阶段。

为了供应人类不断增长的能量消耗，必须大力开发新能源。目前看来，真正实现了经济的工业规模应用的新能源是核裂变能。

### 三、核 能

人类在漫长的年代里以草木为主要燃料，这称之为第一能源时代。本世纪以化石燃料为主要能源，称之为第二能源时代。但化石燃料的储量是有限的，在今后的100年内外，唯一能够接替化石燃料、作为填补人类能源短缺的主要途径是利用核燃料。以核燃料作为人类能源主要特征的时代，能否称之为第三能源时代，还看将来的发展。

在各种燃料中，核能的发热量最高（如表1-2所示）。铀、钍资源的储量也很大，根据不

表 1-2 几 种 主 要 燃 料 的 发 热 量

| 燃 料   | 单 位            | 平 均 发 热 量，千 卡           |
|-------|----------------|-------------------------|
| 原 油   | 升              | 9400                    |
| 重 油   | 升              | 9900                    |
| 液化石油气 | 公斤             | 12000                   |
| 油田气   | 米 <sup>3</sup> | 9800                    |
| 煤田气   | 米 <sup>3</sup> | 8000                    |
| 液化天然气 | 公斤             | 13300                   |
| 精 煤   | 公斤             | 7700                    |
| 天然铀   | 公斤             | $4.3 \times 10^7$       |
| 铀-235 | 公斤             | $6.1 \times 10^9$       |
| 氘聚变   | 公斤             | $\sim 2 \times 10^{10}$ |

完全的统计，有经济开采价值的铀储量达到500万吨，钍比铀多3—5倍。核聚变燃料——氘的储量也很惊人。地球上海水中氘的总储量约为 $20 \times 10^{12}$ 吨。

核能分两种：一种叫重核裂变能；另一种是轻原子核的聚变能。目前只利用了前一种，即在反应堆内利用中子轰击铀、钚等易裂变物质，使它分裂而产生巨大的能量。裂变能的利用，又分两步进行。第一步是建造热中子反应堆，使铀-235在热中子轰击下发生裂变。在天然铀中，铀-235只占0.7%左右，而大量的同位素铀-238在热中子作用下很难发生裂变。第二步是建造快中子反应堆，把铀-238有效地利用起来。由于快中子反应堆的技术复杂，目前还不可能发展到经济的工业规模，因此，有效利用核燃料的另一个途径是建造热中子增殖堆，使铀-238或钍-232在堆内吸收一个中子，变成钚-239或铀-233，后两种同位素又可以作为核燃料，在热中子反应堆内循环使用。

目前，工业规模应用的热中子反应堆有以下几种类型：

(1) 压水堆——利用净化过的高温高压轻水作为慢化剂及冷却剂，以低浓铀作为燃料（铀-235的含量约占2—3%）；

(2) 沸水堆——用净化过的轻水作为慢化剂及冷却剂，但冷却剂在堆芯内沸腾，并产生蒸汽，送到汽轮发电机去发电。沸水堆的燃料也用低浓铀（2—3%<sup>235</sup>U）；

(3) 石墨水冷堆——以石墨为慢化剂，用净化过的轻水作为冷却剂，用低浓铀作燃料。这种压力管式石墨慢化、轻水（沸腾）冷却动力堆在苏联建造得比较多；

(4) 石墨气冷堆——以石墨作为慢化剂，用二氧化碳气体作为冷却剂，用天然铀作燃料。在英国的核电站中，这种堆型仍占多数；

(5) 重水反应堆——用重水作为慢化剂，以天然铀作燃料。重水是反应堆最理想的慢化剂，由于堆内的有害中子吸收（中子损失）少，可以直接用天然铀作燃料。重水堆核电站的运行性能及经济性能都比较好。目前世界上主要是加拿大在发展这种堆型。

至1981年底，世界上已有274座电站反应堆投入运行，装机容量达1.55亿千瓦。

表 1-3 世界上已运行的、正在建造的和计划建造的反应堆

|             | 已 运 行 | 在 建 造 中 | 计 划 建 造 |
|-------------|-------|---------|---------|
| 堆座数         | 274   | 230     | 151     |
| 装机容量, GW    | 155   | 208     | 150     |
| 压水堆(PWR), % | 58    | 64.2    | 83.5    |
| 沸水堆(BWR), % | 24    | 21.5    | 6.3     |
| 气冷堆(GR), %  | 13.2  | 6.6     | 3.3     |
| 重水堆(HW), %  | 4.2   | 6.9     | 4.7     |
| 快堆(FBR), %  | 0.6   | 0.8     | 2.2     |

## 第二节 重水堆核电站概况

重水的物理、化学性能与轻水差不多，但核性能非常好，中子吸收截面很小，对中子的慢化性能也很好。因此，重水是热中子反应堆最理想的慢化剂。三十年代时，核物理学家最早设想的核裂变装置就是用重水作慢化剂，但由于重水提取工艺复杂，短期内难以获得足够数量的重水，当时处于战争年代，急需尽快建成第一批生产堆，以获得核武器装料——钚-239。所以当时的生产堆选用了石墨作慢化剂。

石墨的核性能也比较好，而且容易获得纯度高、机械性能及辐照性能好的“核石墨”。费米等人1942年建造起来的第一座核裂变反应堆是用石墨作慢化剂、天然铀做燃料。美国和苏联在早期核计划中同时还建造了另一条生产核武器装料的生产线——浓缩 $^{235}\text{U}$ 的气体扩散厂。后来，他们从扩散厂拿出一些低浓铀来搞核反应堆发电。苏联的第一个核电站反应堆就是用低浓铀作燃料的压力管式石墨水冷堆，后来过渡到沸腾工况运行。苏联至今仍未放弃这种堆型，近期建造了一批100万千瓦的压力管式石墨慢化、沸腾轻水冷却的反应堆。美国在核潜艇压水堆经验的基础上，建成了第一座压水堆核电站之后，又建造了大批轻水堆（压水堆及沸水堆）电站。

加拿大根据自己的国情，选择了另一条发展核能的道路。加拿大的铀资源非常丰富，但国家的经济实力及技术力量比较薄弱。它既不能建造铀同位浓缩工厂（需要巨额投资及复杂的技术），也无力制造压水堆所必需的大型压力容器及其他重要设备。因此，它选择了一条投资少，见效快、容易自力更生发展核能的道路，即发展用重水作慢化剂、天然铀作燃料的压力管式反应堆，简称为坎杜型（CANDU）重水堆核电站。

1962年加拿大建成第一座示范性重水堆核电站——NPD。1967年又建成了第一座20万千瓦的原型堆——道格拉斯角核电站。1971—1973年先后建成了拥有四座重水堆的皮克林-A核电站，每座反应堆的电功率为54万千瓦。1975—1978年又建成布鲁斯-A核电站，有四座重水堆，每座堆的电功率为75万千瓦。标准60万千瓦的重水堆核电站根带莱-2及勒普罗已建成，并投入运行。同时还在着手建造皮克林-B、布鲁斯-B达林顿、安大略等重水堆核电站。加拿大的核发展计划也很大，准备在大西洋沿岸、魁北克、安大略等地区相继建造

123座重水堆核电站,使核电装机容量达1亿千瓦。目前,加拿大向国外市场推销60万千瓦标准型坎杜重水堆核电站。同时,还在着手研究设计120万千瓦的坎杜型重水堆核电站。主要几座重水堆核电站列于表1-4中。

## 一、重水堆类型

对核电站的基本要求有三条:经济性好、运行性能好及安全可靠。但在选择堆型时,通常会遇到许多工程技术上的问题,往往很难找到一种绝对理想的堆型。下面对重水堆的几种类型及其优缺点作简要介绍。

### (一) 压力壳式重水堆

表 1-4a 坎 杜 型 重 水 堆 核 电 站

| 名 称     | 地 址       | 功率, 兆瓦(电) | 并 网 时 间 |
|---------|-----------|-----------|---------|
| NPD     | 安 大 略     | 22        | 1962    |
| 道格拉斯角   | 安 大 略     | 206       | 1967    |
| 皮克灵 A-1 | 安 大 略     | 515       | 1971    |
| 皮克灵 A-2 | 安 大 略     | 515       | 1971    |
| 皮克灵 A-3 | 安 大 略     | 515       | 1972    |
| 皮克灵 A-4 | 安 大 略     | 515       | 1973    |
| 根蒂莱-1*  | 魁 北 克     | 250       | 1971    |
| 卡 努 普   | 巴 基 斯 坦   | 125       | 1971    |
| 拉普-1    | 印 度       | 203       | 1972    |
| 拉普-2    | 印 度       | 203       | 1974    |
| 布鲁斯 A-1 | 安 大 略     | 740       | 1977    |
| 布鲁斯 A-2 | 安 大 略     | 740       | 1977    |
| 布鲁斯 A-3 | 安 大 略     | 740       | 1978    |
| 布鲁斯 A-4 | 安 大 略     | 740       | 1979    |
| 根蒂莱-2   | 魁 北 克     | 638       | 1981    |
| 勒普罗角    | 布 鲁 斯 威 克 | 633       | 1981    |
| 卡 道 巴   | 阿 根 廷     | 600       | 1981    |
| 皮克灵 B-5 | 安 大 略     | 516       | 1981    |
| 皮克灵 B-6 | 安 大 略     | 516       | 1982    |
| 皮克灵 B-7 | 安 大 略     | 516       | 1982    |
| 皮克灵 B-8 | 安 大 略     | 516       | 1983    |
| 月 城     | 南 朝 鲜     | 629       | 1982    |
| 布鲁斯 B-5 | 安 大 略     | 756       | 1983    |
| 布鲁斯 B-6 | 安 大 略     | 756       | 1984    |
| 布鲁斯 B-7 | 安 大 略     | 756       | 1985    |
| 布鲁斯 B-8 | 安 大 略     | 756       | 1986    |
| 达林顿-1   | 安 大 略     | 881       | 1987    |
| 达林顿-2   | 安 大 略     | 881       | 1988    |
| 达林顿-3   | 安 大 略     | 881       | 1989    |
| 达林顿-4   | 安 大 略     | 881       | 1990    |
| 色娜瓦达    | 罗 马 尼 亚   | 600       | 1985    |
| 合 计     |           | 17,741    |         |

\* 重水慢化轻水沸腾堆

压力壳重水堆的构造与压水堆很相似。西德姆兹弗尔堆就是这种堆型的代表(如图1-1所示)。它的堆芯结构比较紧凑、结构材料也比较少。但是,由于采用天然铀作燃料,燃耗不可

表 1-4b 几座坎杜型重水堆核电站特性参数

|              | 示范堆 NPD              | 道格拉斯角                    | 皮克林 -A                    | 布鲁斯 -A             | 勒普罗角                        |
|--------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 厂 址          | 奥德华河                 | 哈 伦 湖                    | 安 大 略 湖                   | 哈 伦 湖              | 勒普罗半岛                       |
| 开始建造年份       | 1958                 | 1961                     | 1965.11                   | 1969.1             | 1974                        |
| 首次并网运行年份     | 1962.6.28            | 1967.1                   | 1971.4                    | 1976               | 1982                        |
| 净电功率, 兆瓦 (电) | 22.5                 | 208                      | 514                       | 745                | 600                         |
| 燃料管数, 根      | 132                  | 306                      | 390                       | 480                | 380                         |
| 堆芯长度, 米      | 384                  | 500                      | 594                       | 594                | 594                         |
| 核燃料装载量, 吨    | 15.5                 | 41.5                     | 92.3                      | 114                | 95.8                        |
| 预计燃耗, 兆瓦·日/吨 | 6300                 | 8400                     | 8000                      | 9600               | 7500                        |
| 重水装载量, 吨     | 65.97                | 179.5                    | 403.69                    | 568.1              | 467                         |
| 堆入口水温度, °C   | 246                  | 249                      | 249                       | 252/264*           | 267                         |
| 堆出口水温度, °C   | 271                  | 293                      | 293                       | 299                | 312                         |
| 主泵台数         | 3 台、2 台备用            | 10                       | 16 (12 台运行)               | 4                  | 4                           |
| 蒸汽发生器台数      | 1                    | 8                        | 12                        | 8                  | 4                           |
| 汽轮机          | 一台冲动-凝汽式带外置分离器的单缸汽轮机 | 一台 220 兆瓦单轴汽轮机, 带汽水分离再热器 | 每座堆, 一台, 单轴, 外置湿汽分离及蒸汽再热器 | 单轴、一个双流高压缸、三个双流低压缸 | 单轴、一个双流高压缸、外置分离器、再热器, 两个低压缸 |
| 蒸汽压力, 兆帕斯卡   | 2.757                | 4.05                     | 4.02                      | 4.13               | 4.54                        |
| 蒸汽温度, °C     | 232                  | 250                      | 250                       | 252                | 258                         |

能很深, 无疑停堆换料数次较多。如果采用低浓铀作燃料, 则失去了重水堆的主要优越性, 而且同样需要制造压力壳这样的重型设备。这类反应堆目前没有发展前途。

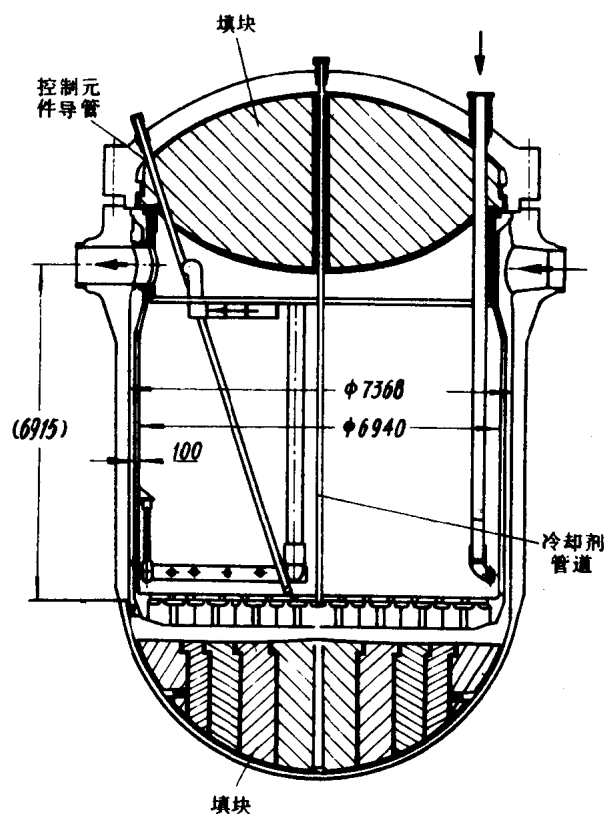


图 1-1 压力壳式重水反应堆示意图

## (二) 重水慢化、加压重水冷却反应堆

(缩写为CANDU-PHW)

这是卧式压力管型反应堆，慢化剂与冷却剂分开，用天然铀作燃料，可以实现不停堆换料。从总体来看，这种堆型的经济性、运行性能及安全可靠性能都比较好，技术上也比较成熟。这是加拿大重点发展的一种堆型，也是本书主要介绍的对象。它的缺点是：一回路压力比较高，密封比较困难，对泄漏的重水进行回收及处理也比较复杂；压力管式反应堆的堆芯结构材料比较多，增加了中子的有害吸收；慢化剂内的发热( $\sim 6\%$ )得不到有效利用，影响热循环效率。

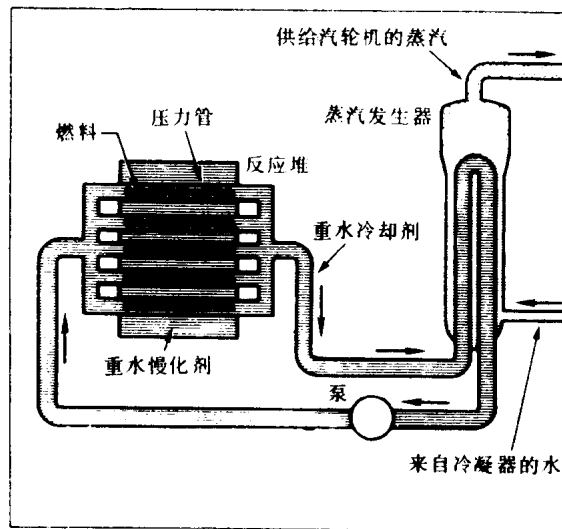


图 1-2 坎杜压重水反应堆示意图

## (三) 重水慢化、有机介质冷却反应堆

为了避免高压重水回路系统带来的麻烦，加拿大白壳研究所在利用有机介质作为反应堆冷却剂方面，做了大量工作。利用有机介质作为冷却剂的优点是很多的，例如：有机介质的沸点比较高，一个低压的回路系统可以得到较高的温度，从而提高了整个装置的热效率；其次，有机介质的有害中子吸收少，慢化性能也比较好。然而，正如其他类型的有机介质冷却反应堆一样，很难找到辐照稳定、无毒性等理想的有机物。加拿大白壳研究所有一个热功率为4万千瓦的重水慢化、有机介质冷却的试验堆WR-1，已积累了一定的运行经验。目前，这种堆型还在试验研究阶段，未曾计划着手建造功率更大的堆。

## (四) 重水慢化、沸腾轻水冷却反应堆

利用沸腾轻水作为压力管式重水堆的冷却剂，是一个很好的设计思想。这样既可以避免高温高压重水回路系统的一系列缺点，又可以在一定程度上减少中子有害吸收（沸腾轻水密度低）及减少重水的装载量。加拿大的根蒂莱-1、英国的温弗里斯蒸汽发生重水堆

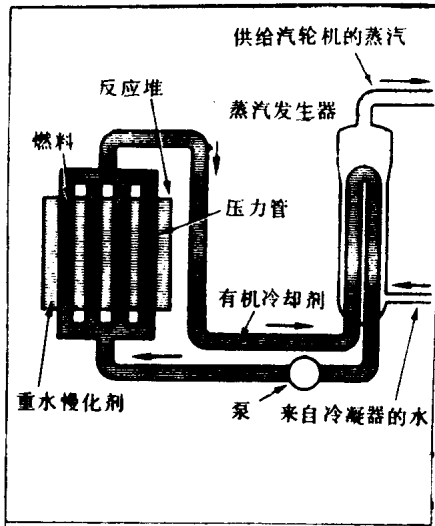


图 1-3 重水慢化、有机介质冷却  
反应堆示意图

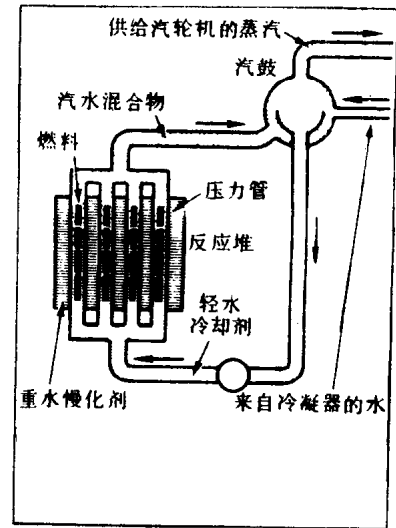


图 1-4 重水慢化、沸腾轻水冷却  
反应堆示意图

(S G H W R)、日本的普贤堆等重水堆核电站为这种堆型积累了不少的经验。特别是英国，曾对蒸汽发生重水堆寄予希望。但运行经验表明，这种堆型并不理想，似乎是由于空泡正反应性效应而引起的控制上的麻烦及结构上的复杂性，致使这种堆型目前基本上停止发展了。

对于采用天然铀作燃料的重水反应堆来说，后备反应性比较小，堆芯内的轻水含量对反应性影响很大（因为重水的中子吸收截面很小， $\sigma_a = 0.00114$  靶，而轻水的中子吸收截面为 0.66 靶）。在反应堆启动及变工况运行时，堆芯轻水汽泡份额变化而引起的反应性变化，需要用高浓铀制成的增益棒及时加以补偿。而且，由于正反应性效应，对控制系统也要求很高。因此，反应性控制及调节系统的稳定性问题成为重水慢化、沸腾轻水冷却反应堆发展中的重大障碍之一。英国和日本采用低浓铀及钚作为上述反应堆的燃料，但控制上的问题似乎仍然存在。而且，在目前核反应堆技术的发展水平下，这种堆型采用低浓铀及钚作燃料在整个燃料循环中是否合理，尚未得到充分的论据。

除上述几种重水反应堆外，还有重水慢化、二氧化碳冷却反应堆、沸腾重水冷却反应堆等。目前这些堆型都没有得到进一步发展。

## 二、重水反应堆的特点

重水反应堆的最根本特点是：用重水作慢化剂（或也作冷却剂），用天然铀作燃料。由此而引伸的几个主要特点可归纳为：

1. 重水的热中子吸收截面只有轻水的 1/600，而两者的慢化性能差不多。因此，重水堆的中子经济性比较好。

2. 用天然铀作燃料，无需建造投资大、技术复杂的铀同位素浓缩工厂或从其他国家进口浓缩铀（轻水堆必须用低浓铀作燃料）。同时，利用天然铀作燃料还有以下几点好处：

(1) 坎杜堆可以从每公斤天然铀中得到更多的能量，从而更有效地利用天然铀资源。

(2) 压水堆的装料是  $\sim 3\%$   $^{235}\text{U}$  的低浓铀, 在堆内燃烧后还剩下约  $1\%$   $^{235}\text{U}$ , 燃料未得到充分利用。为了不至于造成浪费, 最好是对轻水堆卸出来的废料进行及时的后处理, 回收其中的  $^{235}\text{U}$  及钚。建造高放射性的后处理化工厂, 这需要巨额投资, 目前还并不认为是合算的事。重水堆则不一样, 天然铀在堆内燃烧后, 卸出的废料中,  $^{235}\text{U}$  的浓度只有  $0.25\sim 0.3\%$ , 相当于扩散厂的尾料浓度。因此, 重水反应堆的废料不急于进行后处理, 可以先将它储存起来(称为“一次通过式”燃料循环)。当然, 待废料积累到一定数量后, 待热中子增殖堆或快中子反应堆发展到经济的工业规模时, 对重水堆的废料进行后处理, 回收其中的钚及其他同位素物质, 也是必要的。

(3) 重水堆的燃料循环费比较低。制造 1 公斤低浓铀 ( $3.2\%$   $^{235}\text{U}$ ) 燃料元件, 约需 7.7 公斤的  $\text{U}_3\text{O}_8$  原料及 4.5 公斤的分离功(尾料浓度为  $0.25\%$ ); 而制造 1 公斤天然铀的燃料元件, 只需要 1 公斤多一点的  $\text{U}_3\text{O}_8$  原料。而且, 低浓铀燃料元件的加工费用大约比天然铀元件的加工费高 2.5 倍。因此, 目前轻水堆低浓铀燃料元件的价格比重水堆天然铀燃料元件的价格贵 10 倍之多。

3. 一座 100 万千瓦的压水堆, 首次装料约需 80 吨燃料 ( $3\%$   $^{235}\text{U}$ ), 相当于 240 吨分离功。每年换料需花费  $\sim 135$  吨分离功, 还比重水堆多消耗约 40 吨天然铀。如果连续建造轻水堆, 则必须不断地提高扩散厂能力。除保证满足每年换料所需的分离功外, 每新建一座轻水堆, 就需增加一座堆的分离功。因此, 很难设计一座经济规模的铀同位素浓缩工厂, 来适应这种不断变化的情况。建造重水堆的情况则完全不同, 建造一座年产 800 吨的重水厂, 只需要 100 万千瓦核电站造价费的一半, 而且一旦建成, 每年可以提供一座新建的 100 万千瓦重水堆所需的重水, 因为除补充一点被泄漏的重水外, 装载的重水可以在堆内长期地连续使用。

4. 坎杜型重水堆比压水堆能多生产一倍的钚。对于不同的堆型, 消耗 1 公斤天然铀可以得到的钚分别为: 沸水堆可得到 1.58 克; 压水堆可得到 1.54 克; 而重水堆可得到 3.23 克。

5. 坎杜型重水反应堆是压力管式的, 从而避免了制造技术难度很高的压力壳及其他大型设备, 有利于自力更生地发展核工业。此外, 改变新设计的反应堆功率也比较容易, 只要适当改变堆芯内的压力管数目就可以了。

6. 坎杜型重水堆可以进行不停堆装卸料, 提高了核电站的设备利用率及负荷因子。同时, 不停堆换料可以使从堆里卸出的废料的燃耗大体相同, 可以不停堆地及时处理破损的燃料元件(从而可以降低一回路水的放射性水平), 可以使反应堆在整个运行周期内的后备反应性基本不变(也就是说, 堆芯内的中子通量分布基本不变)。

7. 重水堆核电站的建造费用约比压水堆高  $20\%$  左右, 主要是由于重水比较贵。评价一种电站的好坏, 最重要的指标是每度电的价格。由于重水堆的平均负荷因子高(见图 1-5)及燃料价格比较低, 因此重水堆的电价低于压水堆, 或与压水堆的电价相当。

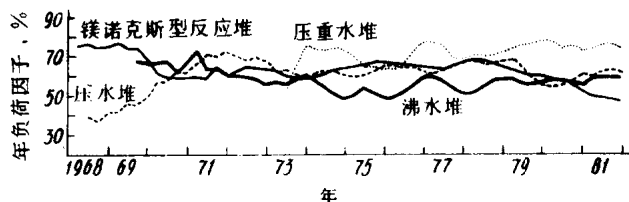


图 1-5 几种主要堆型的负荷因子

8. 重水堆的安全性比较好, 主要体现以下几个方面:

(1) 燃料元件在堆芯内用一根根压力管——容器管隔开, 每根压力管是一个独立的核发热单元, 它们浸泡在慢化剂内。如果发生一回路总管突然破裂的大失水事故, 慢化剂就是一个最好的热穴, 端屏蔽及堆室内的轻水也能吸收一定的热量, 因而燃料元件的事故温升速率是缓慢的, 而且达到一定值后就平衡了。因此, 坎杜型重水堆在发生大失水事故时的安全性, 比其他堆型好得多。

(2) 坎杜型重水堆的后备反应性比较小, 最大可能的正反应性扰动量也就比较小; 同时, 重水堆的瞬发中子寿命为 0.9 毫秒, 而轻水堆为 0.1 毫秒, 因此, 在正反应性扰动下重水堆的功率瞬变过程比较缓慢。

重水堆的堆芯栅格是按获得最大后备反应性来布置的, 因此, 堆芯内任何结构形状的变化 (元件熔化、压力管及容器管变形等) 均会导致反应性下降。

(3) 重水堆所有的反应性控制机构 (吸收棒或毒液) 均设在低温低压的慢化剂区域内, 不可能出现压水堆那样的弹棒事故或由水力作用而使控制棒插不下去。因此, 重水堆的反应性控制系统的可靠性比较高。

重水堆具有许多独特的优点, 确实是一个比较好的堆型, 但也不可避免地存在一些不足之处, 主要有以下几点:

(1) 天然铀反应堆的后备反应性比较小, 燃耗比较浅 ( $\sim 7000$  兆瓦·日/吨)。因此, 重水堆单位功率的燃料装载量、进料量及出料量都比较大。

(2) 装卸料机比较复杂, 制造要求比较高, 每根压力管的两端都有活接头 (而且对密封性要求很高), 结构比较复杂, 相应也增加了运行人员的负担。

(3) 慢化剂的热量得不到合理利用, 运行参数比压水堆稍低, 因此, 热循环效率比压水堆低些。堆芯的结构材料已经比较多了 (这是压力管式反应堆的特点), 不宜于再增加压力管壁厚来提高运行参数。为弥补这方面的不足, 新建的坎杜堆允许堆出口冷却剂有  $\sim 4\%$  的含汽量。

(4) 由于重水价格昂贵, 所以, 对高压重水系统的密封性要求很高。回收泄漏的重水、重水净化、提浓及复用等, 使系统设计复杂化, 辅助系统也比较多。

(5) 标准化程度不够。加拿大建造的重水堆核电站, 每一座都有所改进, 有所不同。特别是安全系统方面的改进比较多。60 万千瓦的重水堆核电站虽已标准化, 但目前尚未完全定型并缺乏运行经验。

总起来讲, 坎杜型重水堆核电站的运行经验与压水堆相比, 还不够多, 迄今不到 100 堆·年。但运行实践有力地证明, 坎杜堆核电站的经济性、运行连续性及安全可靠方面, 都比较好。这些方面的指标与其他类型核电站相比, 一直名列前茅。

### 三、重水堆核电站概貌

坎杜型压重水反应堆 (CANDU-PHW) 工艺比较成熟。皮克林、布鲁斯等核电站积累了大量的运行经验。

核电站的主要组成部分可以用下面框图表示:

被反应堆加热的重水冷却剂, 通过蒸汽发生器将热量传给二次侧的轻水, 轻水在蒸汽发

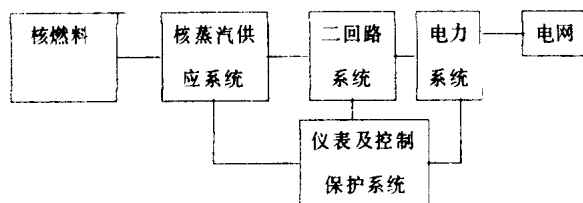


图 1-6 核电站主要组成部分

生器中被加热、沸腾并产生蒸汽，去汽轮机做功，带动发电机转动发电。作过功的乏汽在冷凝器中凝结成水，经处理后重新被打回蒸汽发生器作为给水（见图1-7）。标准60万千瓦级的重水堆核电站布置概貌见图1-8。

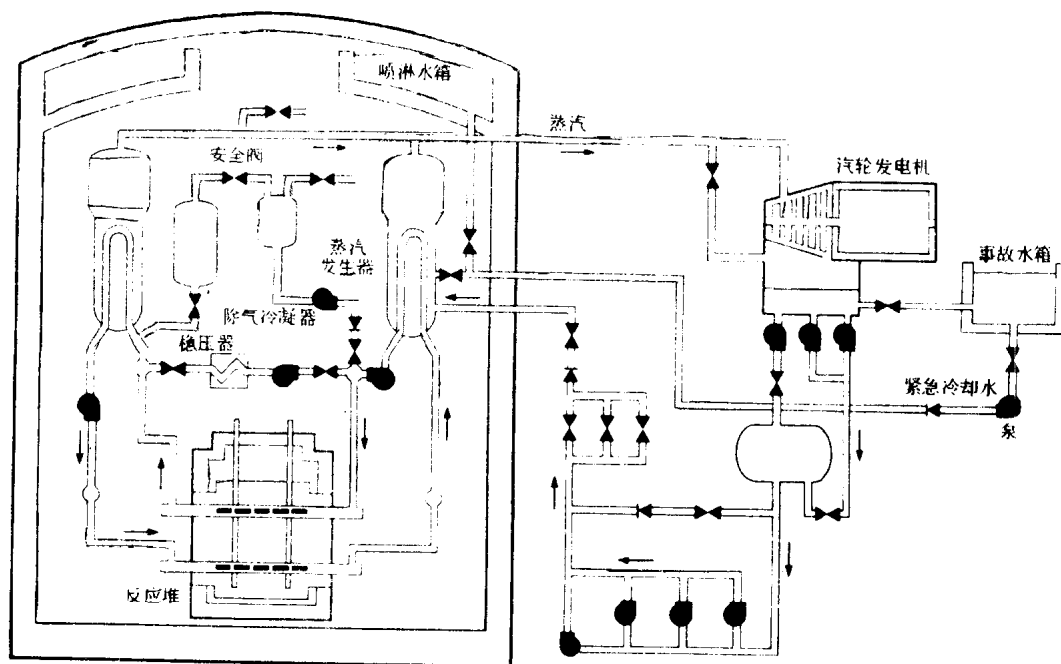


图 1-7 重水堆核电站工艺系统原理流程

重水堆核电站设有两台完全一样的（互为备用）电子计算机，对核反应堆装置的功率进行调节，并对主要工艺系统进行控制及保护。此外，还设有核电站安全控制系统，以便在发生工艺系统单一事故、重叠事故及发生“公共模式”事故（诸如火灾、飓风、龙卷风、飞射物撞击、飞机坠落等）时，使放射性物质的释放仍能低于国家规定的标准。

皮克灵核电站建成比较早。运行实践表明，它的设计是很成功的。皮克灵-A有四座重水堆，相邻的皮克灵-B还有四座同样的堆正在建造。皮克灵电站的运行经验还充分地显示出多堆电站的好处：建造快、投资省，并便于运行管理。

皮克灵核电站位于安大略湖边。四台汽轮发电机组并网发电的日期分别为：1971年4月；1972年3月；1972年10月及1973年10月。1号反应堆达临界后经13.5周就提升到满功率运行；4号堆启动后经12天就提升到满功率运行。可见电站在调试中非常顺利。每台机组的净发电功率为50.8万千瓦，发电机输出电压为24000伏，经变压器升压到230千伏送安大略电网。厂区概貌见图1-9。