

世界核电站

[英] P. R. 蒙菲尔德 著



原子能出版社



TM623
M58

415299

世 界 核 电 站

[英] P.R. 蒙菲尔德

著

曹宜铮 曹关平

主译

曹春春 秦喜久 戴达民

马载琦 肖 勇 李 涛

等译

张 超 于 岚 林雪红

翟秀石 徐秀华 王成孝

王成孝

审校

原子能出版社

图字:01-96-0677

图书在版编目(CIP)数据

世界核电站/(英)P. R. 蒙菲尔德著. —北京:原子能出版社, 1997. 3

ISBN 7-5022-1539-5

I. 世… II. 蒙… III. 核电站-世界 N. TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 12488 号

内 容 简 介

全书共 13 章,主要内容有:世界 400 多座核电站的反应堆类型与特点;世界各国与地区核能生产规模与效益;美国和加拿大、西欧十国、前苏联与东欧经互会国家、亚州各国与地区核能生产发展的历史、现状与未来目标,核燃料循环与核能成本经济分析与比较;辐射危害与安全问题的分析与评价;三废处理与环境等。

World Nuclear Power

P. R. Mounfield

©1991 Petes Mounfield

世界核电站

[英] P. R. 蒙菲尔德 著

曹宜铮 曹关平 等译

土 成 李 申 校

©原子能出版社, 1997

原子能出版社出版发行

责任编辑 汪忠明

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092mm 1/16 印张 17.375 字数 369 千字

1997 年 3 月北京第一版 1998 年 3 月北京第二次印刷

印数:151—500

定价:25.00 元

译者的话

对于发展核电问题,目前世界上部分人持不同意见,我国国内也一样,因此有必要出版一本客观、公正、全面地介绍核电发展历史、工艺技术、安全、经济等诸多方面问题的书,以期社会各界对发展核电有一个全面的了解。P. R. 蒙菲尔德先生所著《世界核电站》(World Nuclear Power)一书正好满足了这方面的需要。本书作者本人不从事核电工作,而是位地质地理学家,完全以中立身份来著书的。因而该书中,作者不是单纯从技术角度进行阐述,而是从技术、经济、政治、社会等各个方面进行综合论述。分析精辟,叙述精炼,实事求是,以客观的事实为依据,特别对公众关心的反应堆安全、辐射防护、废物最终处置、经济性、世界已发生过的重大核事故等都作了较深入的阐述。因此不论核能界或非核能界读了此书之后,对发展核电的必要性、安全性、经济性等都会有更全面、更深入地了解与判断。这对我国已经起步、正在以适当速度向前发展的核电事业来说,无疑是适时的和有益的。对普及核电知识也是十分必要的。

在这里需要特别指出和声明的一点是,作者在介绍世界各国或地区核电发展历史、概况时,把台湾作为一个单独地区来介绍,而不是作为中国的一部分(或一个省)来介绍,这既不符合中国的实际情况,也是我们不能同意和接受的,特此声明,台湾是中国的一个省,是中国领土不可分割的一部分,为了不破坏全书各章的整体结构,除个别段落内容出入较大部分进行删减外,我们仍照原文进行翻译,但在书中,凡是涉及有“台湾”字样的地方,都改为“中国台湾省”或在页下加注,以正视听。

本书得到了中核总核电局、中核总中原对外工程公司的大力资助;中科院院士、著名核物理学家王淦昌教授为本书中文版写了序言;成书过程中,布占领、肖国忠、王茂林、周志红等先生做了大量工作,在此一并表示感谢!

由于时间紧,水平有限,错误之处,在所难免,欢迎广大读者批评指正。

马载琦 执笔

1996年9月于北京

中文版序

Peter R. Mounfield 著《世界核电站(World Nuclear Power)》一书,客观、全面地从核反应堆特点,世界核能的生产方式,美国、加拿大的核能发展历史和现状,西欧的核电需求,前苏联和东欧以及东亚地区的核能概况,并从铀矿石到核燃料元件加工生产的核燃料循环前端以及放射性核废物的处理和处置的核燃料循环的后端,辐射危害的性质及其生态效应,核电成本,核电站场址选择及其安全、生态环境的影响等众多世界公众对核电站发展十分关注的众多问题,或从历史背景,或从发展过程作了叙述和讨论。比较实事求是地、公正地对当前世界核电站发展中存在的一些争论作了恰当的评述。是一本好书。

当前我国正在发展核电,阅读此书,都会获益不浅。

王诤

1996. 5. 6

引 言

有关核电站问题的争论十分激烈。一方面是环境论者的强烈谴责；另一方面是技术专家坚定不移的辩护。如果能不受约束地写出真实评价的书的话，那么对这个主题来说是困难的。然而，本书有意识地作出努力，不倾向任何一方，选材公正，判断严谨，目的不是改变反对核或赞成核读者的观点。本书的宗旨告诉读者，之所以出版此书，目的在于向读者提供教科书，而不是论战书。

本书作者试图做到不带偏见，读者必须判断这个目的是否已经达到。本书作者具有某些有利条件，本书作者没有在核电公司或电站工作过，虽然对核电技术具有很好的知识，但并不偏爱，也没有从中获利的公司股份。本书作者既不属于“绿色和平组织”、“地球之友”、“关心科学家联盟”或其他与持反核立场有牵连的施压集团成员，也从不参加反核集会和将一些“我喜欢核武器”或“核电-不，谢谢”等张贴物贴在汽车挡风玻璃上。作为一个职业的地理学家，从1958年来，对核电的专题，曾思考、阅读、写文章，并给许多听众作过讲演。对未来世界能源观点，与Edward Teller编写的《来自宇宙的能(1979)》一书中引言所述的以下观点完全相符的，即：“解决能源问题不能只采用一种方式。节能不是足够的，石油不是足够的，煤不是足够的，核能不是足够的，太阳能和地热能不是足够的，新能源的开发也不是足够的。只有这些能源的适当组合才将满足能源的需要”。

本书是遵循核燃料循环通用的程序编排的，这个术语不完全精确，但它广泛地适用于核工业，覆盖了借助于核动力生产电力的所有方面，从铀的开采到放射性废物的永久处置。

燃料循环有三个主要阶段(见图0.1)，每个阶段包括一个特定的子工序：

(1) 燃料循环的前端：包括由铀矿开采到制造出燃料组件，以及运输到反应堆现场等各个工序；

(2) 第二个主要阶段是在反应堆内的阶段：核燃料置于获得裂变能的反应堆内，从而产生热量。反应堆现场新燃料的储存和从反应堆堆芯内取出后的乏燃料的短期储存通常也包括在这个阶段。

(3) 第三阶段是核燃料循环的后端：从反应堆储存水池取出乏燃料运输开始，到乏燃料后处理产出的废物最终处置为止。

后端处理详细的工序取决于国家和电力公司的政策，在后处理循环中，乏燃料组件运送到后处理厂，从裂变过程产生的废物中分离出来消耗的铀和钚，以便再使用。这个循环如图0.1所示。它表明了一次通过燃料循环，即乏燃料不进行后处理，通过适当处理后储存处置，裂变材料与其说在后处理循环不重复使用，到不如说只用一次。

在后处理循环中，从乏燃料元件回收的铀，经过处理后，送到浓缩厂进行浓缩，以提高 ^{235}U 的含量，返回到燃料元件制造厂后铀可再利用，生产更多的燃料元件，乏燃料或废物的贮存可发生在处理前后，如果燃料循环相邻的工序在同一场所，那么不会带来两笔分别的运

费。

反应堆使用浓缩的核燃料整个期间的成本的流程图如图 0.2 所示。前端成本高是很清楚的。特别是燃料浓缩。应注意的是,本图表示的某些后端的成本是想象的。迄今为止,很少的高放废物已经玻璃固化,也没有长期储藏的实践。后端的成本最终有可能达到或超过目前前端的成本。

基于这些简单的说明,加上如图 0.1 和 0.2 所示的各种流程,作为一个紧密相关的核燃料循环工序可以归纳如下:

- ① 铀矿开采和选矿;
- ② 矿石浓缩物转化到符合标准的核燃料;
- ③ 燃料浓缩(去除各种各样杂质);
- ④ 燃料元件制造;
- ⑤ 在反应堆中燃料燃烧;
- ⑥ 乏燃料的中间储存,通常在反应堆现场;
- ⑦ 为后处理或废物处置的乏燃料运输;
- ⑧ 乏燃料后处理(去除各种各样杂质);
- ⑨ 放射性废物的分类;
- ⑩ 放射性废物

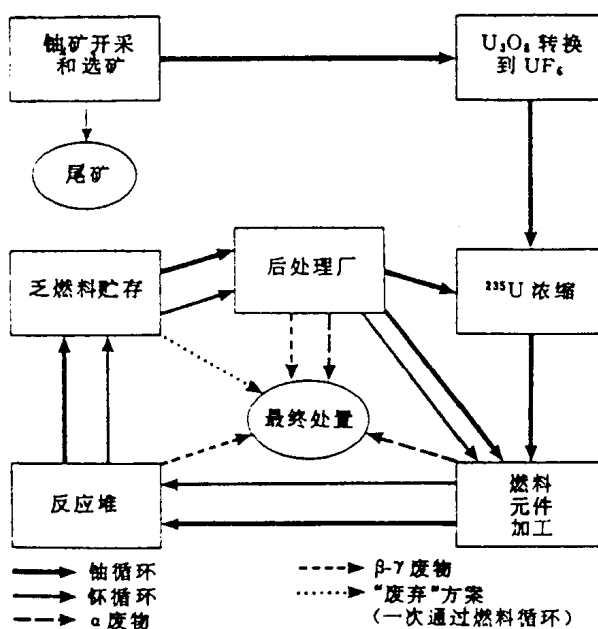


图 0.1 核燃料循环

图中示出了核燃料循环中的主要阶段和需要永久处置的主要放射性废物的流程。各种不同的循环是: (i) “一次通过”循环,乏燃料元件不后处理,钚留在乏燃料元件内,而成为主要的放射性废物; (ii) 后处理循环,为快堆发展以前储备钚; (iii) 热堆再循环。一定量的钚,作为替代燃料在热堆中使用,大多数情况下为铀装料的 16%; (iv) 快堆循环。

摘自:英国原子能局

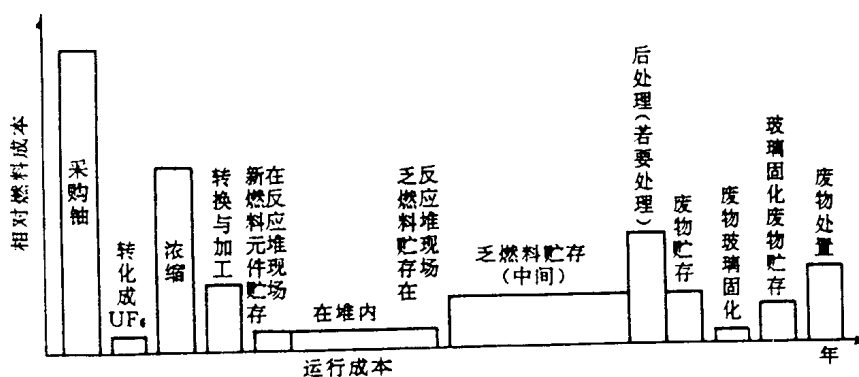


图 0.2 核燃料循环成本流程图(典型的使用浓缩铀的一批燃料)

摘自: OECD 1983 a:16

的中间储存或处置; ⑪ 放射性废物的最终处置。

该工序概括地反映在本书的各章。然而,它是技术性工序。如果严格遵守,将不包括与

地缘政治、政治意识和公众争论等重要方面的问题,本书不是提供回答一系列问题的特定的框架:世界上的核电站在哪里建和用什么原则指导核电厂选择厂址?哪些国家已经发展商用的核电站或哪个国家没有发展?核电与其他方法生产的电力,在特定的能源市场上如何竞争的?放射性废物处置、在环境上的争端是什么?哪一种地球环境能为建立长期放射性废物库提供最安全的条件?核电的公害是什么、以及有什么足够大的利益值得冒风险?等等

因此核燃料循环的纯技术观点需要重新研究。它应包括环境、经济、社会、政治以及与地点有关的问题。再重新研究时具体建议如下:

(1) 技术方面:铀的开采及选矿、转换和浓缩、燃料元件制造、乏燃料的运输及后处理(第七章)和放射性废物中间及最终处置的战略(第十二章)。

(2) 技术-经济方面:不同类型反应堆的技术特性和经济潜力。它们对正常运行各自的影响(第一章)及燃料循环成本的比较。每一个国家,每一个电力公司,为了生产电力,根据三维变量确定的多种政策(第九章),选择自己的各种能源组合。

(3) 社会-技术方面:内容包括:核电工业对公众意见的敏感性和反核组织对核电的态度(第十三章);厂址周围的安全和安全政策文件以及核电站及放射性废物库场所发生的局部环境事件的重要性。

(4) 政治-技术方面:内容包括:核电技术在世界范围内迅速扩展对国际能源布局的影响(第二章);涉及到核材料和反应堆的恐怖分子活动的可能性及法规监督的国家标准。

这些涉及的方面不是相互排他性的。并且技术、经济、地理、政治和公众政策是相互影响的。例如,任何业主通过技术评估的支持及经济上有利决定建造一座核电站,但在核电站建造过程及最终运行中,电站将受到社会及环境的冲击。决定核电站建或不建,成为公众政策、公众意见和反核组织政治行动等广泛范围的政治行为。本书承认这个事实,在现代,地理、经济、政治和社会问题日益显得突出,正如它们在现实世界中产生了重大效果一样。在现实世界中,核电站分布非常不均匀。有的国家或地区有很多座核电站,有的国家或地区一座核电站也没有。

目 录

中文版序	(II)
引言	(Ⅱ)
第一章 预先考虑:反应堆类型和特点	(1)
第二章 世界核能生产状况	(21)
第三章 美国和加拿大	(45)
第四章 西欧	(69)
第五章 苏联和东欧经互会国家	(93)
第六章 东亚	(102)
第七章 从铀矿石到燃料元件:核燃料循环的前端	(111)
第八章 危害的性质——辐射及其生态效应	(133)
第九章 核电的货币成本及其选址效应	(160)
第十章 核电站选址中的安全问题	(185)
第十一章 针对外部事件选址:地震、飓风、海啸和洪水	(214)
第十二章 核燃料循环的后端:放射性废物的贮存和运输	(229)
第十三章 展望未来	(266)

第一章 预先考虑:反应堆类型和特点

可用于现代反应堆中的铀同位素的品种是很少的。一种特殊的铀同位素铀-235(^{235}U)是自然界中发现的唯一可裂变的元素。当铀-235的核受到亚原子粒子中子的轰击时,就分裂成两个碎片。在这一裂变过程中,释放出大量的能量和产生出更多的中子;这些中子可被用来进一步分裂铀-235核而形成链式反应。核反应堆是通过控制链式反应并把产生的能量转换成热能进而再转换成电能的一种装置。

可裂变核发射出的中子的飞行速度比其被其它铀-235核捕获的中子的速度要快得多,

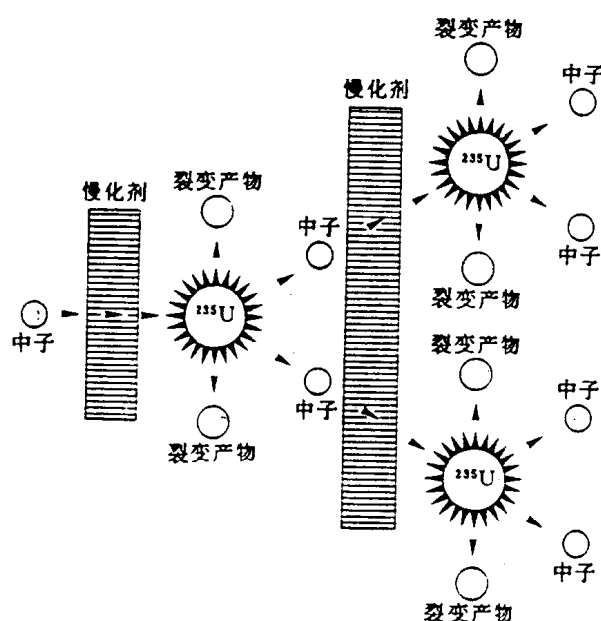


图 1.1 铀-235 核链式反应的形成

摘自: Cole 1988 : 69

这样,中子的速度必须要降低下来,或慢化下来。图 1.1 示出了铀-235 的链式反应的性质。一个单个中子,在被慢化剂降低速度之后,可引起一个铀-235 核裂变,其结果将导致产生两个裂变产物和两个裂变中子。这些中子在慢化后,继续引起多于两个的铀-235 核裂变,产生出多于四个的裂变产物和多于四个的中子。如此这般,反应得以持续进行下去。

地壳中开采出的铀矿通常铀-235 含量约为 0.72%,铀-238(非裂变核素)含量约为 99.27%。可裂变同位素的比例借助燃料浓缩技术可以提高。还有两个人工制备的可裂变元素:钚(^{239}Pu),由铀-238 生成;铀-233(^{233}U),由钍(^{232}Th)生成。这三个元素,铀-235、铀-233 和钚-239 是核反应堆的基本燃料。在热中子反应堆中,即中子被慢化到与其周围物质处于热平衡的反应堆中,铀-235 和铀-233 是最容易进行裂变的。钚-239 是更适宜于用作快中子

反应堆的燃料。

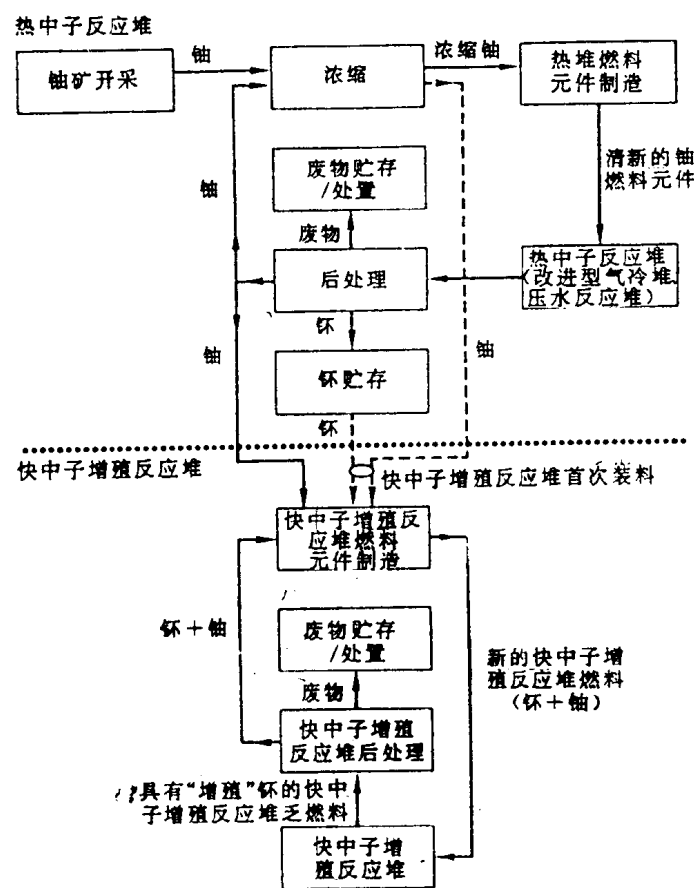


图 1.2 热中子反应堆和快中子反应堆核燃料循环顺序
摘自:House of Commons 1986:ixxvii

一、热中子反应堆和快中子反应堆

图 1.2 所示的流程能帮助我们理解热中子反应堆和快中子反应堆之间的差别。在热中子反应堆中,中子被慢化到与它周围物质处于平衡的状态,采用慢化剂,例如石墨中的碳原子或水中的氢原子可实现这一目的。快中子反应堆不含慢化剂,采用液体冷却,或气体冷却。这一基本差别导致反应堆类型分成快中子反应堆和热中子反应堆。

在两种堆型中,分裂可裂变核素所释放出的中子飞行的动能大约有一百万电子伏(1 MeV),飞行速度约相当于 4400 公里/秒。在快中子反应堆中,材料是这样排列的,以致这些中子在被适当慢化之前就能进一步引起裂变。然而,在热中子反应堆中,链式反应靠重复与慢化剂核碰撞降低能量至与后者处于热平衡的中子来维持。据此,名为热中子反应堆。

通常用于热中子反应堆的只有三种类型的慢化剂材料:(i) 以普通水(H₂O)形式存在的氢的轻同位素或普通同位素,(ii) 氘,以重水(D₂O)形式存在的氢的重同位素,和(iii) 碳,以石墨形式存在。

由吸收中子材料(如硼或镉)制成的控制棒,控制着反应堆的热输出功率。控制棒可以用来控制裂变链式反应速度的突然升高,也即通常所说的“反应堆工作状况偏离”。同样,热能也受气体或液体冷却剂控制,在其通过堆芯中的核燃料后,或直接或经由热交换器进入汽轮发电机(见图 1.3)。

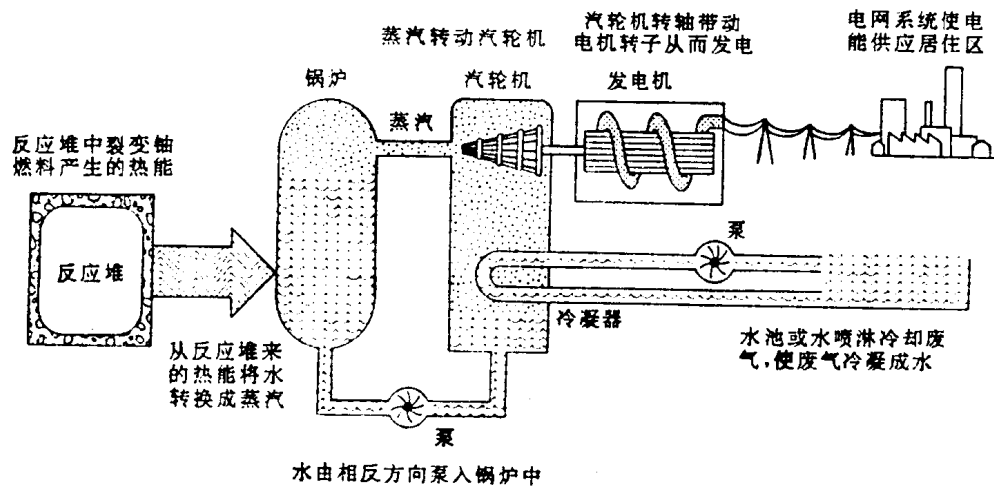


图 1.3 核电站电能生产的主要组成部分

在所有核电站中,冷却剂循环系统的设计对电站成本和发电经济性具有重要影响。

冷却剂在一个压力容器中,因为加压情况下热传递最有效。应着重强调的是,反应堆能够安全运行的功率水平受其冷却体系容量的限制,也就是说,在该功率下,一次冷却剂可以带走反应堆堆芯所产生的热量。冷却系统有效且安全的运转是极其重要的。如果产生热的速度要快于热被冷却剂带走的速度,则燃料将会过热而可能熔融或汽化。

通常由混凝土构成的生物防护屏,安置在由燃料、慢化剂、控制棒和冷却剂构成的整个装置的四周,作为对任何突发的危险辐射逃逸的最后一道工程防护。

二、商用电力生产中的热中子反应堆的类型

业已研制出许多反应堆类型用于能源的生产,但仅有少数兼有冷却剂和慢化剂相结合的反应堆被用于商用电力的生产。

(一) 轻水反应堆

用普通水作冷却剂和慢化剂的反应堆控制了当今世界核电站的主流(图 1.4 和 1.5)。有两种类型:压水反应堆(PWR)和沸水反应堆(BWR)。在压水堆中,高压水在堆芯内被加热,通过热交换器时使二回路中的水沸腾。在沸水堆中,允许堆芯中的水沸腾,经冷却剂的蒸汽直接驱动汽轮机。这两种类型的反应堆都使用锆合金包壳的浓缩铀的二氧化物燃料。

美国和苏联第一个研制压水反应堆作为一种紧凑型反应堆用于船舶动力,尤其是核潜



图 1.4 1987 年西欧核电站的反应堆类型

[注: 由于各种原因, 图中外文不能全译出, 本书下同。]

艇动力。迄今, 压水反应堆在用于电力生产的核反应堆的世界模式中(就商用和电力生产的比例)居支配地位。在已建成的反应堆中占 50%, 在在建反应堆中占 70%。

主要由于堆芯中的功率密度非常高, 压水反应堆的压力壳体积相对较小但用壁厚较厚的钢(图 1.6)。冷却剂系统在运行中放射性很高, 因而操作人员的适当屏蔽是重要的规定。

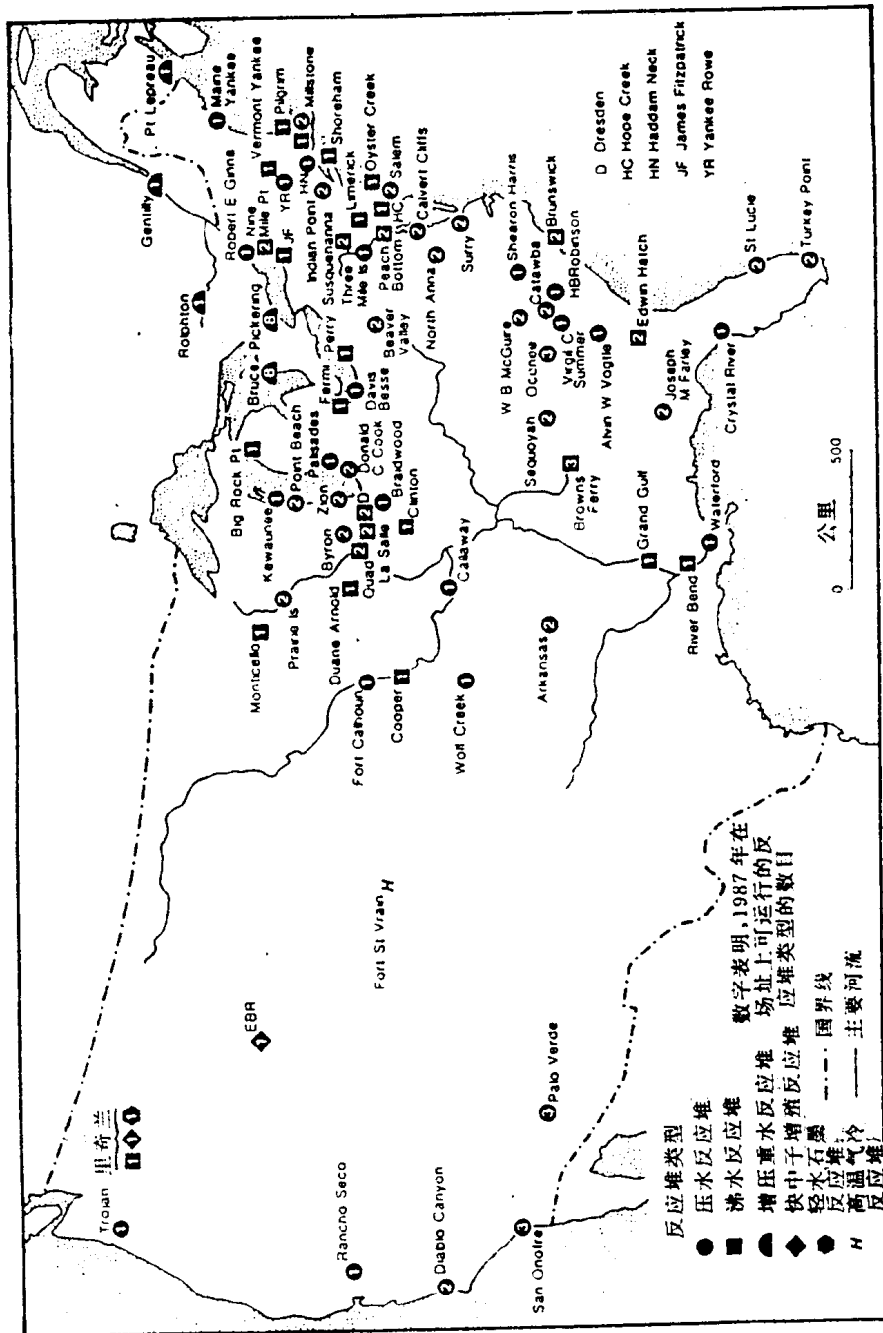


图 1.5 1987 年美国 and 加拿大的核电站的反应堆类型

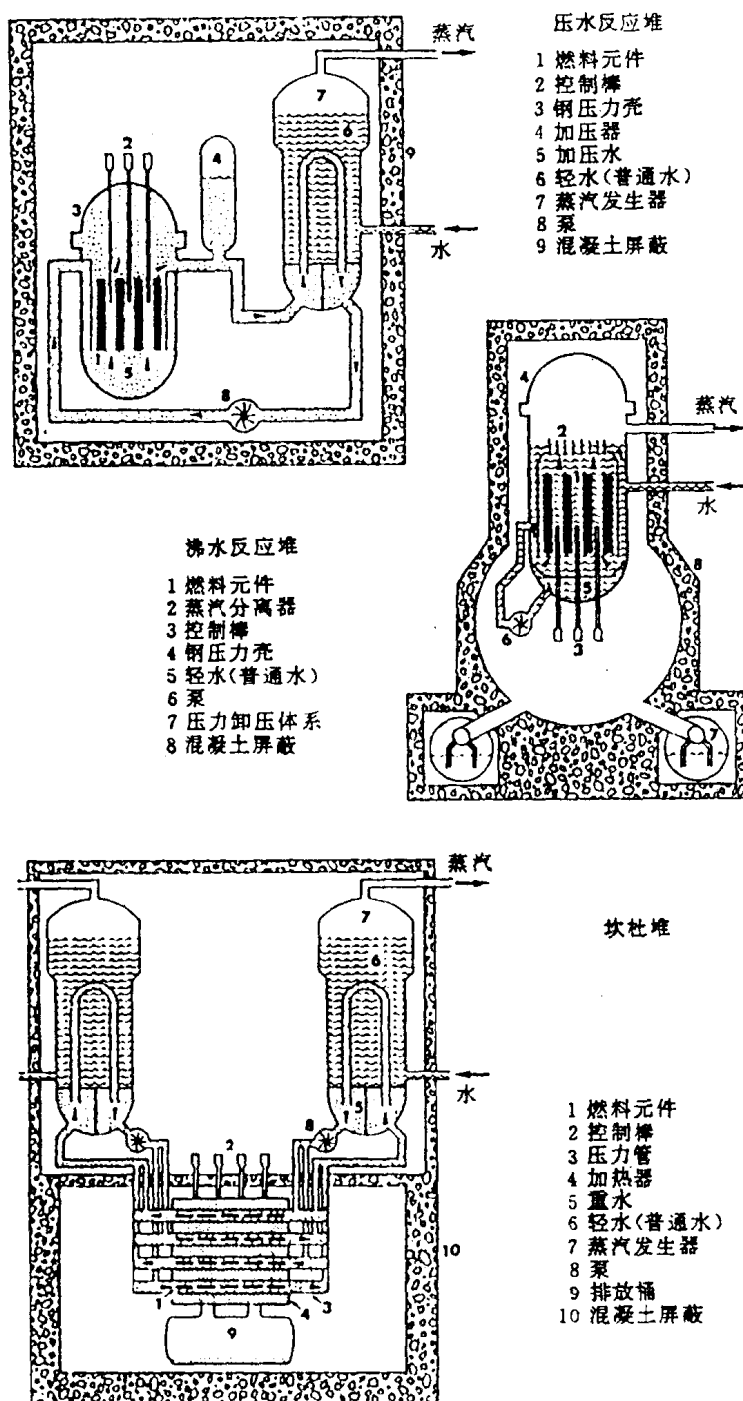


图 1.6 压水反应堆、沸水反应堆和坎杜堆的主要特征示意图

压水反应堆的操作特点在于,它不能够在负荷下换料;在更换燃料之前,反应堆必须停堆,恢复冷却状态,移去压力壳顶盖进行换料。典型的 1000 MWe 核电站需要燃料总装量约 93000 公斤铀,每年卸出的乏燃料中约含 270 公斤钚(Morshall 1979 年)。在更换燃料时,移出堆芯

中的 1/3 的燃烧过的燃料组件,而堆芯中其它的燃料组件移动到不同的位置,这样,新的燃料可以装进去。换料操作期间,反应堆可长达 90 天不能启动。因此,压水反应堆可以设计成在更换燃料操作之间至少运行一年,燃料元件在反应堆堆内必须要能够保证使用三年多的时间。

压水反应堆的主要优点如下:已经积累了相当的运行经验;在许多能源市场中,与化石燃料电站相比具有高可靠性和经济竞争性;使用廉价的普通水作慢化剂和冷却剂。主要缺点是:需要浓缩铀,或从国外购进,或由本国工业浓缩生产解决;支撑压力壳制造工艺的工业化工厂投资很大;使用饱和蒸汽,需要专门设计蒸汽汽轮机工艺;较高的压力施加于很长的一循环系统,存在着主要部分破裂的可能性;热交换器很容易损坏。

大约在同一时期研制出商业化的沸水反应堆是压水反应堆的主要竞争者。差不多有近 100 个机组在运行中,总装机容量约 80000MWe。采用沸水反应堆的主要是美国、日本、德意志联邦共和国和瑞典,苏联或属于经互会成员国不采用沸水反应堆。在沸水反应堆中,在可比较的输出功率下,冷却剂所受压力比压水反应堆的低得多,因此,反应堆的压力壳是相当大而且相当重。与压水反应堆一样,沸水反应堆在更换燃料之前必须停堆,通常在间隔 12 至 18 个月时卸压和打开压力壳顶盖进行换料。对于 1000MWe 的核电站,起始堆芯装料量约 140000 公斤铀,每年约产生 200 公斤钚。在堆芯中的水冷却剂/慢化剂允许沸腾,在每一次更换燃料时,约转换堆芯 1/5 的燃料。

沸水反应堆的主要优点如下:有长期运行经验;高可靠性;普通水可用作慢化剂和冷却剂;在工业化国家,沸水反应堆的经济性常可与大小相当的化石燃料电站相竞争。缺点是:需要浓缩铀;一循环冷却剂系统尽管要比压水反应堆的小,但依然是很庞大的,有潜在危险;必须要有支撑这项技术的重工业;沸水反应堆要求专门设计蒸汽汽轮机技术;如果增殖反应堆技术的主要延缓是对钚价格施加压力所致,那末沸水反应堆的经济性将如同压水反应堆一样,会受到不利的影响。

(二) 气冷反应堆

在反应堆发展的早期阶段,当美国集中于轻水冷却堆的研制时,英国和法国则着手气冷石墨慢化反应堆的设计(图 1.7)。不久,法国便放弃气冷石墨慢化反应堆而采用压水反应堆,英国继续致力于气冷石墨反应堆的研制。

1954 年,苏联声明,他是将核能用于发电的商业目的的第一个国家,美国中央情报机构显然是承认这个声明的(CIA 1985: 52)。然而,英国认为科尔德霍尔 1 号反应堆才是世界上第一个将核电送入国家电网的(Dancy 1986)。那是一个镁合金反应堆,之所以这样叫法,是由于天然二氧化铀燃料被包在镁合金罐中。镁合金反应堆的设计已被具有较高蒸气压、较高温度和在较高效率下运行的改进型气冷反应堆(AGR)所取代。这些反应堆均使用不锈钢包壳的浓缩铀二氧化物陶瓷燃料,因而燃料的燃耗要比镁合金燃料更有效得多。早期的镁合金反应堆用钢压力壳,而稍后的此类反应堆,以及改进型气冷反应堆都使用预应力混凝土壳作为辐射防护层,以构成厚度超过 5 米的混凝土外壳。混凝土外壳都镶有低碳钢。

一个 140 MWe 的镁合金反应堆电站起始堆芯装料约 230000 公斤铀。一个 600 MWe 的改进型气冷反应堆的起始装料为 150000 公斤铀。改进型气冷反应堆可在负荷下更换燃料,燃料元件可以留在堆芯中长达 5 年之久。在热效率 40% 的情况下,镁合金反应堆并非有效

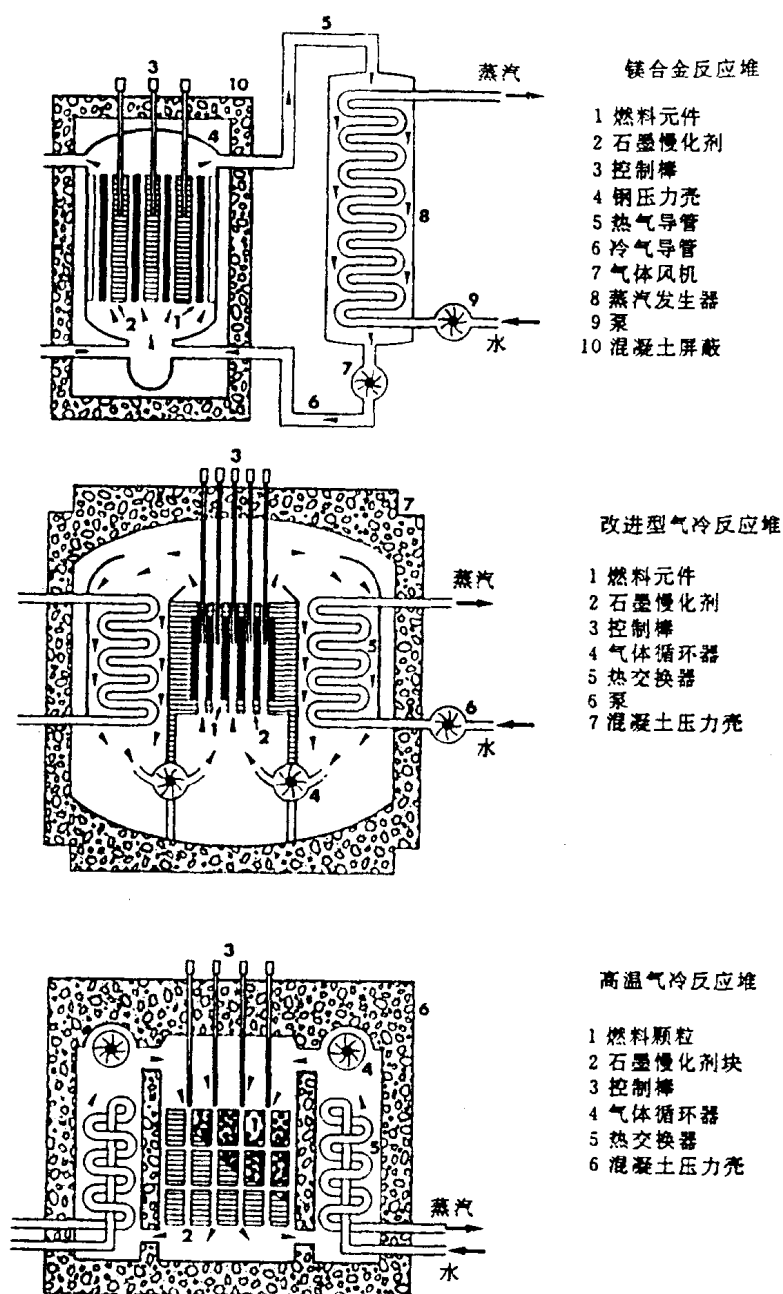


图 1.7 镁合金反应堆、改进型气冷反应堆和
高温气冷反应堆的主要特征示意图

的燃料使用装置,而改进型气冷反应堆则是。它们使用燃料都比轻水反应堆更有效。这是由于它们可以采用过热蒸气常规汽轮机技术所致。钢筋混凝土压力壳的固有安全性和石墨堆芯的大热容量能力意味着在涉及第一循环破裂可能的影响时,不需要专门的外壳保护;改进型气冷反应堆是一种固有安全性反应堆。然而,它需要有支撑这项技术的重工业;它需要浓缩铀;在同压水反应堆和沸水反应堆相竞争时,它尚未显示出足够的经济优越性而保证其在