

原子能知识丛书



核电站



原子能知识丛书

核 电 站

〔美〕 R. L. 莱尔利
W. 米切尔, II
柴芳蓉 译

著

原子能出版社

核 电 站

【美】R.L. 莱尔利、W. 米切尔，著

柴 芳 蓉 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国大街8号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092^{1/32}·印张1^{3/4}·字数 35千字

1981年8月第一版·1981年8月第一次印刷

印数001—1,800·统一书号：15175·319

定价：0.22元

出版说明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人来说还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书（*Understanding the Atom Series*）。这套丛书取材广泛，内容丰富，语言生动，深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

在科学技术的迅速发展的今天，书中引用的有些材料稍嫌过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

目 录

为什么要利用原子能?	(1)
从原子能到电能	(2)
反应堆的类型	(3)
沸水反应堆	(5)
压水反应堆	(7)
气冷反应堆	(8)
重水反应堆	(9)
增殖反应堆	(10)
典型核电站的设计	(13)
反应堆压力壳	(16)
堆芯	(17)
主冷却系统	(20)
核电站概貌	(22)
核能发电的成本	(23)
美国核电站简介	(25)
世界各国核动力发展概况	(39)
加拿大	(40)
英国	(41)
法国	(42)
日本	(43)
苏联	(45)

西德.....	(46)
其它国家.....	(48)
结束语.....	(48)

为什么要利用原子能？

目前美国已有数百万人使用原子能转换成的电力。正在兴建的核电站还将为另外几百万人的家用照明和其它电气设备供电。将来，我们和世界上其它各国人民无疑会看到：我们所使用的电力中的大部分来自原子能。

为什么会发生这种变化呢？为什么几年前人们还不熟悉的核电站，今天已达到工业应用阶段，并能以低廉的成本可靠地发电呢？要回答这些问题，我们不仅要看到目前的情况，而且还要考虑到长远的发展。

在我们这个正在发展的世界上，能源需要量的增长甚至比人口的增长还要快。看一看规划中的未来能源需要，我们就会强烈地感到，必须使用原子能发电，否则就要面临着化石燃料资源——煤、石油和天然气消耗殆尽的局面。简言之，从保存和节省燃料两方面考虑，都要求我们利用原子能发电，来维持人类文明。

只要核电站还没有同火电站或水电站一样普及，很多人就会想知道：核电站怎样工作？发电成本是多少？它们建造在什么地方？采用哪种类型的反应堆？这本小册子的目的就是回答这些问题。在说明时仅考虑为大型电网供电的中心电站。

从原子能到电能

核电站与常规火电站的相似之处是：二者都用蒸汽推动汽轮发电机产生电力。蒸汽的热能在汽轮机里转换为机械能，再由发电机把机械能转换成电能。蒸汽的来源虽然对汽轮机的工作无关紧要，但这正是核电站与常规电站的不同之处。

蒸汽是怎样产生的呢？常规电站是烧煤，石油或天然气的，它们产生的热把水变成水蒸汽。然而，在核电站里并没有燃烧什么东西，却是利用核裂变。裂变反应产生热量，这些热量有时直接传给水，有时间接地传给水，使它变成蒸汽。因此可以说，核电站中的裂变反应与常规电站中燃烧化石燃料的目的——都是产生热量。稍后我们将介绍核反应堆系统，现在让我们先来说明一下裂变反应。

裂变过程需要一种特殊的重元素——例如铀或钚——作为基本材料。以铀为例，天然铀是三种同位素的混合物，它们的原子的化学性质相同而质量不同。其中之一是铀-235的原子，当它中心的重核受到一个自由中子（高能亚原子粒子）的撞击时，很容易发生裂变。此时核分裂成两个高速飞行的碎片；除此之外，还放出两个或三个新的中子，如图1所示。飞行的裂变碎片同周围的原子碰撞时，把动能转变成热能，而释放出的中子又引起其它铀-235原子的裂变，形成链式反应。

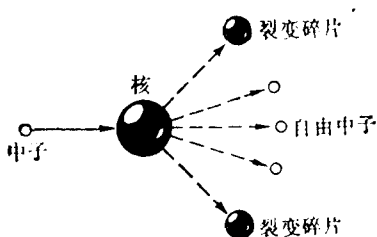


图1 典型的裂变反应

维持链式反应十分重要，因为必须在1秒钟内发生 3×10^{10} 次裂变才能释放1瓦的能量。要使链式反应具有实用价值，裂变必须按要求的速率进行，而且在此过程中产生的热必须被带走。于是就出现了核反应堆，反应堆是能够引发、维持和控制裂变反应的一种装置，而且它能回收产生的热量。

反应堆的基本组成部分是：

1. 燃料，它裂变以产生中子和释放能量。
2. 控制部件，用来控制能量释放速率。
3. 冷却剂，用来带走反应堆中产生的热。

反应堆和实际产生的蒸汽之间的关系以及某些常见的核供汽系统在下节介绍。

反应堆的类型

如果你走进百货公司，对售货员说：“我想买一只打火机”。他会问：“要哪一种？”你的回答可能是“要一只气

体打火机”，也可能要一只电子打火机或者是其它品种的打火机。每一种打火机都能引火，但它们引火的方法并不一样。当然，反应堆不是打火机，但反应堆都有一种共同的产物——热。并且反应堆也确实有好几种类型。

在说明反应堆的类型之前，我们要先谈一件与核电站发展有重大关系的事情——我们的核燃料资源并不是无限的。很明显，如果核电站在较短的时间内就会把可以取得的燃料用完，那么，它们在将来就不会有多大前途了。

在不同类型的核反应堆中，核燃料的净消耗有很大差别，这一点不是一眼就看得出来。第一类反应堆具有很高的净燃料消耗；目前美国正在运行的大部分商用核电站中都采用这一类。第二类反应堆具有低的净燃料消耗。最后一类反应堆，就燃料守恒来说，具有负的净燃料消耗，意思是说它产生的新燃料比它用掉的燃料还要多¹⁾。这种反应堆称为增殖反应堆，要在中心电站大量采用这种反应堆还需要一段时间。增殖的原理已被证明是可行的，现在需要研制出经济上合算的反应堆来，这样才有可能建造增殖反应堆电站。

在下面的说明里，我们要注意各类反应堆燃料的相对消耗。我们将看到，每一类动力反应堆实际上都是一个核供汽系统，也就是说，它们实际上都只是一个给电站发电部分提供蒸汽的设备。电站发电部分见图2。在这一部分内，蒸汽流过汽轮机，把能量传给汽轮机轴，使它旋转。汽轮机轴再带动发电机转子发出电力。

1) 实际上，它们生产的是经过处理可用作燃料的新的可裂变材料。

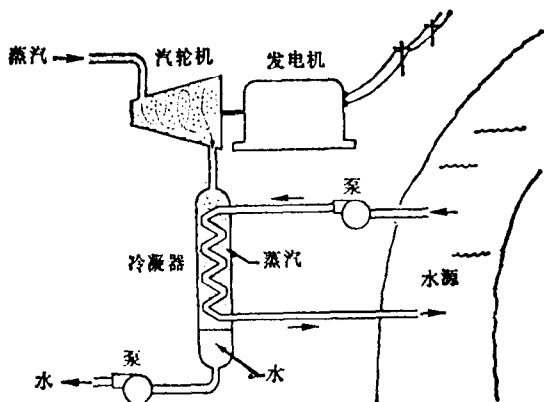


图2 核电站的发电部分

“废”蒸汽离开汽轮机后进入冷凝器，在其中的冷却管外流动并重新冷凝成水。这些冷凝水由泵打回核供汽系统，重新开始循环，水又变成高温高压的蒸汽。图2表示的是最普通的冷却方法：由泵抽送的冷水通过冷凝器管，然后再流回水源（河流、湖泊或其它大的水池）。

不管提供热量的反应堆是哪一种类型，核电站发电部分的基本设备都是一样的。

沸水反应堆

这类反应堆的名称就说明了它的特点。如图3所示，水进入反应堆，在核燃料元件之间的通道内向上流动，同时被加热而沸腾，蒸汽很快聚集在反应堆上部，并经过出口管道流出反应堆。标有“蒸汽”和“水”的管道与图2中标有相同记号的管道连接，这样就形成了一个完整的核电站。

在典型的沸水反应堆中，水和蒸汽的压力为每平方厘米

70公斤，它相当于海平面下面700米深处的压力。该压力使反应堆内水的沸点达到一个很高的值，这样一来，产生的蒸汽的温度和压力都很大，完全可以推动汽轮机发电。

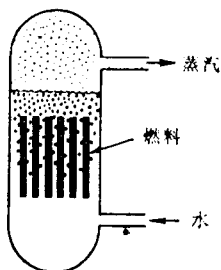


图3 沸水反应堆的核供汽设备

大家都知道，从厨房炉子上的开水壶里冒出来的蒸汽，温度为 100°C 。这种温度下的蒸汽所含的能量太少，没法在汽轮机里利用。要增加能量，必须提高蒸汽温度。这在反应堆里是用加高压力的办法达到的。其原理与高压锅相同。高压锅的温度较高，所以做饭就比较快。在典型的沸水反应堆内，压力为每平方厘米70公斤，蒸汽的温度大约为 285°C 。

以沸水反应堆供热的核供汽系统，与后面讨论的其它一些系统比较起来要简单一些。虽然沸水堆系统只有几个主要设备，但这些设备比另一些系统，例如压水堆系统的设备要大得多。一个电功率输出为80万千瓦的中心核电站，其沸水反应堆要求有一个高21.4米，直径6.1米的压力壳（放置核燃料的容器）。而一个功率输出相同的压水堆的压力壳大约只需高12.2米，直径4.9米。然而，压水堆系统内还要有另外

一些大型设备，这样一来，压水堆与沸水堆的设备总重量大体就相当了。

多年来，沸水堆不断建造，不断改进，今天，沸水堆已在美国商业市场上销售。沸水堆同压水堆一样，净燃料消耗比较高。下面我们就来讨论压水堆。

压水反应堆

压水反应堆是在水流经反应堆时不沸腾的条件下运行的。反应堆和与它相连的管道回路（见图4）中的压力，大约为每平方厘米158公斤，比沸水反应堆高一倍以上。这样高的压力可以使水被加热到 316°C 还不至于沸腾。加热的水进入蒸汽发生器。蒸汽发生器的作用从它的名称就可以看得出来，就是产生推动汽轮机的蒸汽。

在蒸汽发生器里，从反应堆来的热水在管内流动，管外则是来自电站汽轮机部分的水；这个水的压力比反应堆水系统的压力要低得多。反应堆热水通过管壁加热了管外的水，使它变成蒸汽，它在大约 260°C 的温度下流入汽轮机。反应

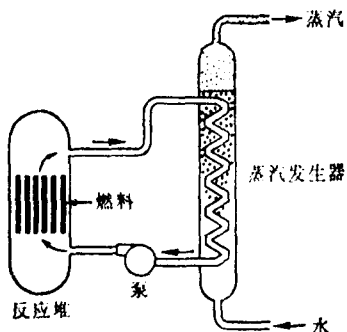


图4 压水堆的核供汽设备

堆内的水离开蒸汽发生器时已放出部分热量而冷却，然后它由泵打入反应堆再次加热，并开始下一次循环。

你可以看到，采用压水堆的核供汽系统有两个独立的水系统，它们在蒸汽发生器内相遇。一个系统的水与另一个系统的水不相混合，但是热量却从反应堆系统传给了蒸汽系统。

后面我们将对压水反应堆作详细的介绍。

气冷反应堆

图5中画出了气冷反应堆的示意图，它与压水反应堆非常相似。两者的运行原理相同：都是用某种工作介质把热量从反应堆输送到蒸汽发生器，再在那里产生汽轮机用的蒸汽。

在气冷反应堆中，工作介质是气体，通常是氦气或二氧化碳。这种气体靠鼓风机（风扇）于每平方厘米几十公斤的压力下通过反应堆、管道和蒸汽发生器进行循环。顺便提一句，这种鼓风机是一种大得吓人的机械。一座80万千瓦电站的反应堆用的鼓风机（有时是几台）所需要的电力，可以带动40万台家用50厘米窗式电风扇。

图5中标有“慢化剂”的材料以前还没有讲过。慢化剂是一种放在反应堆内慢化中子用的材料，中子慢化后容易引起裂变。在水冷反应堆中，不需要再加固体慢化剂，因为冷却水就可以起到这个作用。然而，气体并不是很好的慢化剂，因此，在气冷反应堆中要加入一种特殊的材料——通常是石墨，来作为慢化剂。

在气冷反应堆中选择石墨作慢化剂是非常合适的，因为它可以承受气冷反应堆中的高温，在某些气冷反应堆中，气体被加热到接近760℃。高的工作温度有很大的优点，产生蒸

汽的温度可以高达 540°C ；用这种温度和相应高压下的蒸汽推动汽轮机，可以得到很高的效率。

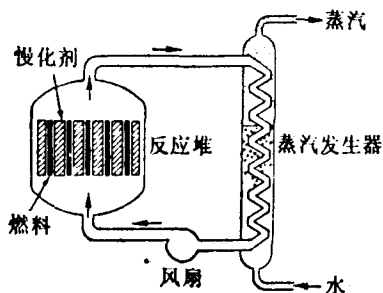


图5 气冷反应堆的核供汽设备

除了温度高之外，气冷反应堆还有一个吸引人的优点，就是它的净燃料消耗低。事实上，非常先进的气冷反应堆甚至能够生产核燃料，即新产生的核燃料比消耗掉的还要多。但是，它并不是尽善尽美的，也有一些缺点，主要的缺点是在相同的热功率下，反应堆的体积较大。另外遗憾的是，气体正好不能很好地把热量带走。因此，为了与气体较差的散热能力相适应，反应堆单位体积内的发热率只能十分低。

重水反应堆

重水 (D_2O) 有很多性质与普通水 (H_2O) 相似。(在分子式 D_2O 中，D代表氘，是氢的一种重同位素。) 其实重水并不很重(如果你拿一瓶重水和一瓶普通水相比较，并不会感到重水重多少。) 但是，在反应堆中用氘代替普通氢，在核性能上却有明显的优点。不过它对反应堆的经济性也有相当强烈的影响，因为 D_2O 的价格大约是每磅28.50美元。

重水通常在管式反应堆中使用，其中核燃料放在穿过水箱的工艺管里。水箱装有重水，它们包在装有燃料的管道外面，起慢化剂的作用，与气冷反应堆中的石墨的作用几乎一样。燃料在工艺管内并不占有全部空间，空出一部分地方给冷却剂，让它沿燃料元件流动，把发出的热量带走。图6表示重水反应堆的一般布置。

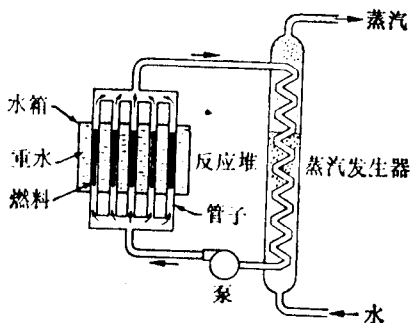


图6 重水反应堆的核蒸汽供应系统简图

因为重水慢化剂和冷却剂是被工艺管管壁分开的，所以有好几种冷却剂——有机化合物、气体、水或者重水——可以在重水反应堆中应用。重水反应堆里的温度取决于用哪一种冷却剂，产生蒸汽的温度可达 370°C 以上。

从核燃料利用角度来看，重水反应堆是一种过渡类型，它的净燃料消耗十分低，而且可以用天然铀作燃料。因此，在经济上合算的增殖反应堆设计成功以前，采用重水反应堆在某些国家中是很合适的。

增殖反应堆

有些反应堆因为所用材料（或者说材料的组合）不同而

具有增殖能力，也就是说它生产的燃料比消耗的还要多。

怎样才能增殖呢？前面已经说过一个铀-235原子核吸收一个中子后可以裂变。裂变反应释放出几个自由中子（见图1），这些自由中子又可以引发其他裂变，但是它们不会全部被可裂变材料吸收，有些则被反应堆的结构材料，控制元件或冷却剂吸收，有些则从反应堆中泄漏出去而被屏蔽材料吸收，还有一些被可转换材料吸收。当可转换材料的一个原子核吸收一个中子时，这个原子可能转变成为一个可裂变材料的原子，即转变成能产生核链式反应的物质。通过仔细地选择和配置反应堆中的各种材料——当然包括可裂变材料和可转换材料，维持裂变链式反应剩下的那部分中子可以十分有效地把可转换材料转化为可裂变材料。增殖反应堆从两个方面改善了中子过程的效率：一是增加每次裂变释放出的自由中子数；二是减少耗损的中子数。这样，就可以有较多的中子供可转换材料吸收。如果在反应堆内每消耗一个可裂变材料的原子，可有一个以上的可转换材料原子变为可裂变材料，则这样的反应堆就叫做增殖反应堆。有一种可转换材料是铀-238，它在自然界中总是与铀-235在一起。铀-238吸收中子后转变为可裂变的钚-239。另一种可转换材料是钍-232，它可以转变为可裂变的铀-233。

在可能增殖的反应堆中，有一些在实践中可能被证明并没有增殖能力。但是有一类反应堆正在几个电站成功地运行着。这就是图7所示的液态金属冷却增殖堆。

增殖反应堆的系统和设备与其它类型反应堆的不同。它在反应堆冷却系统与汽轮机水-汽系统之间有一个中间传热回路。这在其它反应堆的示意图中是没有见过的。反应堆主