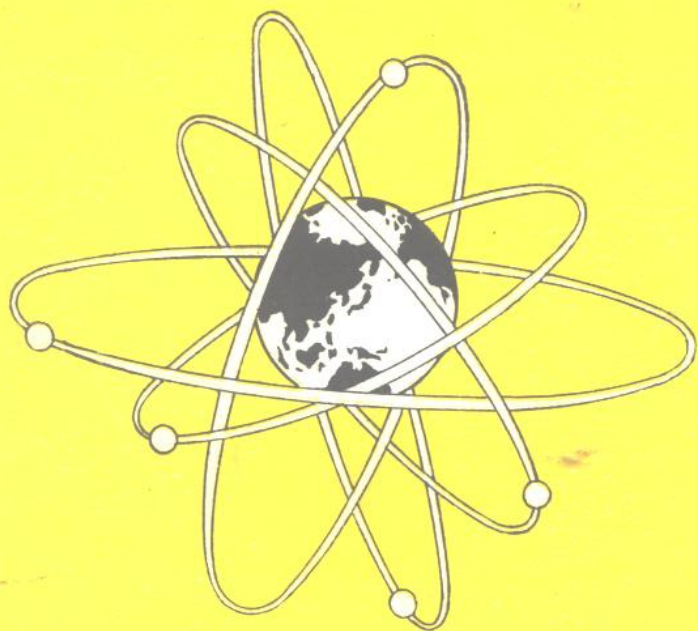




核能： 20世纪后的主要能源

郭星渠

原子能出版社

72.3
429

核能：20世纪后的 主要能源

郭 星 渠

15.02.31
31.03.12

原子能出版社

核能：20世纪后的主要能源

郭星渠

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

燕山印刷厂印刷

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9.5·字数205千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数1—2,300·统一书号：15175·678

定价：1.95元

内 容 简 介

本书系统地介绍了各种核反应堆的基本原理、发展历史、技术经济特点和发展前景，分析了美国、法国、苏联、日本、联邦德国、英国等发展核能的情况及经验。通过对各种能源的相互比较，阐述了核能是20世纪后的主要能源，以及核能在我国的发展前景。

全书共分十一章。前两章通过十八亿年前的天然反应堆及四十多年前的第一座人工反应堆，介绍了现代反应堆的基本知识和早期历史。以后各章，逐一介绍生产堆、动力堆、轻水堆、重水堆、气冷堆、快堆、聚变堆以及国外发展核能的状况和经验，最后一章介绍核能在我国和世界的发展前景。该书思路宽广、材料丰富、历史与技术交叉论述、构思严谨、观点鲜明、文笔流畅，适合从事核能及其他能源研究和管理人员、大中学校师生以及具有高中以上文化程度的干部阅读。

序

1942年第一座人工反应堆诞生后，四十多年来，反应堆的发展史已揭开了许多新的篇章。早在七十年代初，核电的成本已低于火电。由于对核电站的放射性废物采取了严格的隔离和封闭措施，它产生的放射性污染比煤的残渣废气中的天然放射性少。煤电站将大量包括强致癌物质在内的粉尘及有害气体抛入空中，对环境和健康的危害比同等规模的核电站大几百倍。至于煤排出的二氧化碳对地球气候的影响，则是科学家们十分忧虑的事情。根据1942年到1975年美国核工业的统计资料，此间共发生10086起烧伤、触电、跌落等事故。其中放射性事故41起，占千分之四。核工业每百万工时发生的各种事故，不及同期其他工业的三分之一。今天的核工业，比它的发展初期更安全可靠。一座一百万千瓦的火电站，每年烧三百多万吨煤。而相同规模的核电站，每年只需运送三四十吨燃料元件。无数事实证明，核电站在成本、安全、环境保护和减少运输量等方面，都优于火电站。有的国家早在七十年代初就作出决定，以后不再建火电站，只建核电站。

煤、石油和天然气都是不能再生的宝贵的化工原料。按目前剩余可采储量及消费量计算，石油到下世纪中将要消耗完，煤和天然气也只能用一两百年了。虽然煤、石油和天然气的储量还将有新的发现，但它们的最终储量及经济可采储量都十分有限，远远跟不上需求的增长，而且将越来越多地转为化工原料。随着煤、石油和天然气资源的日益枯竭以及转为化工原料，它们在能源中的地位将逐渐为核能所取代。到

本世纪末，核电将达到世界发电总量的三分之一左右；到下个世纪初，将超过一半。

第一座反应堆为了确保安全，除了有三人各拿一个盛满了吸收中子的溶液的桶站在堆顶外，还有一人拿了一把斧子站在反应堆旁，以便必要时砍断绳索，让安全棒迅速插入堆内，停止链式反应。今天最大的反应堆，其功率比第一座反应堆大几百万倍，功率监测和控制系统也十分完善。从陆地到海洋，人们正驯服地驾驭着各种反应堆。

今天的核电站，虽然已成为一种安全、清洁、经济的工业能源，比火电站优越得多，但它还只能利用铀资源中极少的一部分。随着可以经济开采的铀资源的日益枯竭和技术进步，到下个世纪初期，能将铀资源中的大部分加以利用的快中子反应堆，将得到大规模运用。聚变能源的开发，也已展现出美好的前景。但聚变反应堆要想在经济上和裂变反应堆竞争，尚须经历一段相当艰难的道路。聚变-裂变混合反应堆，是由裂变堆向聚变堆过渡的桥梁。快中子反应堆和混合堆，将能满足人们几百年到几千年的能源需求，从而使人类能有充裕的时间去迎接聚变堆时代的到来。

经济的发展和人口的增加，使人类对能源的需求与日俱增。如果我们固守在传统的化石能源的基础上，不但会使自己陷入能源危机，而且由于消耗这种宝贵的化工原料并污染环境，将贻害子孙万代。现在科学家已经为我们设想了一系列阶梯，来回答能源的挑战。

四十多年前，核工业作为举世瞩目的军事工业迅速崛起。今天，由于核武器的数量趋近饱和，命中精度、突防能力、生存能力成了主要矛盾，核武器领域内的竞争已逐渐让位于运载工具的竞争。核工业现今越来越成为一种以能源工

业为主，军用及同位素等核技术运用为辅的工业部门。

化石能源的开发，使人类实现了以化石燃料代替薪炭的第一次能源革命。今后一百年内外，人类将开始第二次能源革命，实现由以化石能源为主向以核能为主的转化。未来的世界，将是一个以核能为主，太阳能、生物质能、水能、风能、海洋能、地热等多种能源同时并存的能源极其丰富的世界。今天的核电站，仅仅是核能开发的序幕。聚变能源的研究，将使人类得到一支永不熄灭的核火炬，照亮人类奔向光辉灿烂的未来。开发核能的广阔领域，正一代一代地吸引着无数勇于攀登的人们为之献身。

我国的核工业，从五十年代以来已有相当的基础。我国具备铀矿的勘探、开采、冶炼，铀-235的浓缩，核燃料元件的制造，反应堆的设计、建造和运行，核燃料辐照后的处理，以及一些大型设备的制造能力。世界上只有少数几个国家，才具有这样完整的核工业体系。为满足国民经济发展对能源的需求，我国已开始建设核电站。和世界上其他国家一样，我国能源结构向核能为主的转化不但不可避免，而且难以推迟。在这个时候，研究一下核能发展的道路及各国发展核动力的经验教训，将是有益的。

科学技术的发展史，也是人类由浅入深、由简单到复杂认识自然的历史。本书前两章，通过对十八亿年前的天然反应堆，以及四十多年前的第一座人工反应堆的说明，介绍了裂变堆的早期发展史和基本知识。对于缺乏专业知识的读者，这两章较难读懂，他们不妨继续阅读其余各章，然后再回过头来重读前两章。其余各章，逐一介绍目前正在使用和研究的各种反应堆的技术特点、发展状况，以及各国开发核能的政策、经验和教训，并对核能的发展前景作了一些初步探

讨。马克思1853年9月3日在给恩格斯的信中指出,历史是从相互矛盾的陈述中清理出来的。我们研究反应堆历史的目的,是为了更自觉地掌握它的发展规律,以便更好地推动反应堆技术的发展。

作者所从事的研究领域是十分狭窄的。但是二十多年来有幸从事的研究工作,使我处于核能发展的前沿阵地上,不断吸取新鲜的知识,直接感受国内外进展的脉搏。然而本书涉及的范围十分广泛,书中的缺点和错误在所难免,切望各方面专家和读者指正。

罗安仁、沈俊雄、李盈安同志审阅了本书初稿,提出了不少宝贵意见,在此表示感谢。

郭星渠

1986年5月21日

于中国原子能科学研究院

目 录

序

第一章	十八亿年前的天然反应堆.....	1
1.1	十八亿年前奇特的自然现象.....	1
1.2	铀-235 的裂 变	5
1.3	中子的慢化.....	18
1.4	反应堆的临界.....	26
第二章	人工反应堆的诞生.....	34
2.1	第一座反应堆奠定了反应堆的技术基础.....	35
2.2	缓发中子使反应堆便于控制.....	44
2.3	核能的传递需要冷却剂.....	54
第三章	生产堆是反应堆发展的先导.....	63
3.1	生产堆是获得核武器装料的重要途径.....	64
3.2	生产堆的改进推动了动力堆的发展.....	71
第四章	动力堆是反应堆发展的主流.....	78
4.1	核潜艇的研制揭开了核动力发展的序幕.....	80
4.2	核电站已成为安全、清洁、经 济的工业能源.....	85
第五章	轻水堆当前占统治地位.....	106
5.1	水的特性决定了轻水堆的特点.....	107
5.2	压水堆已成为成熟堆型.....	110
5.3	从压水堆衍生出沸水堆.....	120
第六章	重水堆节约核燃料.....	124
6.1	重水的特性决定了重水堆的特点.....	124
6.2	压力管式天然铀重水堆已成熟.....	129

6.3	重水堆的改进尚在探索	138
第七章	气冷堆走过了曲折道路	142
7.1	气冷堆发展的三阶段	142
7.2	高温气冷堆吸引着人们去探索	150
第八章	快堆的大发展将要到来	155
8.1	快堆的发展不可避免	155
8.2	快堆已日臻完善	174
第九章	国外发展核工业的状况和经验	188
9.1	美国	189
9.2	法国	198
9.3	苏联	201
9.4	日本和联邦德国	207
9.5	英国	210
9.6	加拿大、瑞典和印度	212
9.7	几点主要经验	213
第十章	聚变堆的研究将造福子孙万代	217
10.1	聚变能是无限丰富的优越能源	217
10.2	受控聚变已显示出胜利的曙光	222
10.3	混合堆是过渡的桥梁	234
第十一章	未来的世界是使用核能的世界	242
11.1	世界能源向以核能为主的转化势在必行	242
11.2	核能的开发为人类展现出灿烂前程	261
11.3	开发核能是我国经济长期持 续增长的重要条件	271
	参考文献	288

第一章 十八亿年前的天然反应堆

自1942年12月2日费米在美国芝加哥大学建成了第一座反应堆后，已有四十多年了。现在，反应堆已获得了越来越广泛的发展。

现已查明，由于大自然的巧妙安排，远在18亿年前，在非洲加蓬共和国境内，曾出现过6座天然反应堆。今天，遍布世界各地的成千座大大小小的反应堆所依据的原理，与这些天然反应堆完全相同。因此，分析一下18亿年前大自然创造的奇迹，就可以找到一把钥匙，去熟悉今天世界上的各种反应堆。

1.1 十八亿年前奇特的自然现象

自然界里的物质，是由各种元素组成的。不同元素的原子不同。原子非常小。比如氢原子，要9400万个排成一排，才有一厘米。原子由电子和原子核组成，电子绕着原子核运转。原子不但很小，而且里面十分空旷。如果我们将原子放大成上百米直径的大气球，原子核只是气球中央的一颗小米。原子核的体积约占整个原子体积的几百万亿分之一，而它的质量却占整个原子质量的99.94%以上。

质量是物质多少的量度，以克、公斤、吨为单位。由于在地球上相同的地方，物体质量越大，它的重量也越大，所以有时将质量与重量混为一谈。但是这两个概念是不同的。

质量是物体所含物质的量；地球上的重量是物体所受地球引力的大小。在人造地球卫星上，由于一部分地球引力用来产生向心加速度，物体处于失重状态，重量减少甚至消失。而物体的质量并无变化。但在日常生活和贸易中，习惯上称质量为重量。

单位体积的质量称为密度。原子核的密度比水的密度大一百多万亿倍。除了最轻的原子核只有一个质子外，其余的原子核都由质子和中子组成。中子和质子的质量差不多，中子只比质子重千分之一点三几。当然它们的质量都很小，大约要六千万亿个中子才有一克。中子和质子统称核子，它们组成原子核。绕原子核转的电子是按一定层次排列的。最里面的第一层最多排两个电子，第二层可排八个。电子多时，还有第三层、第四层等。因此有时将电子层称为电子壳层。电子就象几层外壳一样，将原子核包住。

电子的质量大约是质子质量的 $1/1836$ 。质子带正电，电子带负电，中子不带电。电子的带电量与质子的带电量相等，只是符号相反。而且任何原子中，电子与质子的数目相等，所以原子不带电，呈中性。如果原子中的电子一部或全部脱离了原子，则原子的负电减少了，整个原子带正电。这种原子称为正离子。如果所有电子全部脱离了原子，这时的正离子就是裸露的原子核本身。如果原子得到了外来电子，就成负离子。

只要原子核中质子数目相同，所组成的原子的化学行为就基本相同。这样一来，区别元素的唯一标志就是原子核中的质子数目。化学家就是根据质子的数目给元素排队的。所以质子数就是元素在周期表中的原子序数。一种元素，在元素周期表中只占据一个位置。因此元素是质子数目相同，因而化学性质基本相同的一类原子的总称。

但是质子数相同的原子核，中子数不同时，它的核特性则完全不同。因此1947年，经库曼建议后，人们以原子核内的质子数和核子总数来区分原子核，于是又出现了核素这个专有名词。正如不同元素的化学性质完全不一样，不同核素的核特性完全不同。核素是一个比我们常用的同位素范围更广的概念。质子数相同而中子数不同的核素，是同一种元素，它们在元素周期表中占据同一个位置，因而叫同位素。质子数不同的核素，在周期表中的位置不同，因而不能叫同位素。但人们现已习惯将核素称为同位素。

各种同位素的物理性能特别是核特性虽然不同，它们的化学性质却基本相同^①。自然界中共存在91种元素，其中最轻的是质子数为1的第1号元素氢，最重的是质子数为94的第94号元素钚^②。在这之间的镅、铈、镦，自然界中都不存在，是人工制造出来的。第95到第109号元素，也都用反应堆和加速器制造了出来。其中108号元素是1984年3月29日才由联邦德国科学家发现的。这些元素，一共有2500多种同位素，其中265种是稳定同位素，2300多种是放射性同位素。

放射性同位素会自发地放射出 α 、 β 或 γ 等射线，并衰变成别的核素。 α 射线是氦原子核，有两个质子和两个中子，带正电； β 射线是电子，带负电； γ 射线是一种电磁波，又叫光子，不带电，没有静止质量。每一种放射性同位素都按自

① 实际上同位素由于原子核内的中子数目不同，电子壳层的结构也略有差别，因而化学性质有非常细微的区别。例如它们的化学反应速率就略不相同，因而可以用化学的方法，来分离同一种元素的不同同位素。

② 第94号元素钚，它的一种同位素钚-244，半衰期为0.83亿年，在地球上尚有极微量存在。

已固定不变的速率衰变为别的核素，这个速率不受通常的温度、压力和各种化学变化等因素影响。我们将放射性同位素的衰变速率用半衰期来衡量。半衰期是放射性同位素原子核衰变一半所需要的时间。

由于同一种元素的原子核的中子数目不同时，会形成核子总数不同的多种同位素，因此在核科学领域，就不能仅仅指明元素，还应指明核子总数，以区别不同的核素。核素有两种表示方法：一种是在元素符号的左上角标明核子总数，在左下角标明质子数。例如 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ，就表示质子数为94，核子总数为239的核素。有时将左下角的质子数省略，因为写出了元素符号，就可以知道质子数，例如与钚对应的质子数就是94。另一种方法是在元素的名称后，标明核子总数。例如铀-235，就表示核子总数为235的铀的一种同位素。

地球上存在的91种元素中，第92号元素铀，是唯一容易裂变的元素。我们称自然界中存在的铀为天然铀，它有三种同位素：一种是铀-238，占99.27%；一种是铀-235，占0.724%；一种是铀-234，占0.006%。这三种同位素的原子核，都含有92个质子，因此化学性质基本相同。但它们的中子数目不同：铀-238有146个中子，铀-235有143个中子，铀-234有142个中子。这三种同位素的核特性相差很大，只有铀-235的原子核才容易分裂成两个中等质量的原子核，也就是我们所说的裂变。其它两种同位素不易裂变。

无论是那个国家，也无论是陆地和海洋，七十年代初以前人们找到的天然铀，其中铀-235的含量都在0.724%左右。1969年7月美国阿波罗11号飞船从月球取回的岩样，其中铀-235在铀元素中占的比例，也差不多是上面的数值。我们称0.724%为铀-235的天然丰度。也就是说，自然界里的铀，

不管它是单独存在，还是以极低的含量存在于矿石或海水中，我们任意找来十万个铀原子，其中的铀-235原子是七百多个。

可是，1972年6月，法国皮埃尔拉特铀矿分析室的工作人员鲍齐涅，却惊奇地发现，有些矿石里，铀-235在铀中的比例，明显地低于上述天然丰度。后来顺藤摸瓜，发现非洲加蓬共和国奥克洛矿区的铀矿，铀-235的含量普遍偏低，有的竟不到0.29%。这个惊奇的发现，引起了各国科学家的注意。1975年6月应加蓬政府和法国政府的要求，国际原子机构组织了专门的学术讨论会。根据现场勘测的大量资料，专家们认为，远在人类诞生前，距今18亿年时，由于大自然的巧妙安排，在奥克洛矿区，至少有6座天然反应堆断断续续地运行了几十万年，释放出相当于约两千万吨煤燃烧放出的热量。

那么，大自然是怎样创造出这一奇迹的呢？为什么铀-235原子核容易裂变，而别的原子核不易裂变？为什么世界各地的铀矿中，别的铀矿不容易形成天然反应堆，奥克洛矿区却容易形成，并在18亿年前出现呢？为说明这些问题，我们先看看铀-235原子核为什么容易裂变。

1.2 铀-235的裂变

现代科学证实，原子核密度为每立方厘米一亿多吨。原子核之所以能如此紧密地结合在一起，是由于各个核子之间有强大的核力互相吸引。核力是一种在一万亿分之几毫米的极短的距离以内才起作用的力，叫短程力。中子与中子，中子与质子，质子与质子之间的核力基本相同，与质子所带的

电荷关系不大。因为核力是短程力，只在万亿分之几毫米的范围内才起作用，就只有邻近的几个核子之间，才会由于核力而相互吸引。而且当两个核子之间的距离进一步减少时，核子之间还会产生排斥。由于核子之间相互作用的核力很强，所以称核力为强相互作用。对于核力的上述特点，科学家们在本世纪初已有所了解。但是对于核力的来源，自从1935年日本科学家汤川秀树提出介子理论以后，才逐渐有所认识。介子是质量介于电子和质子间的基本粒子。正如物质之间由于交换光子而产生电磁相互作用一样，汤川秀树认为，核子间是由于交换介子而产生强相互作用。现在科学家们正在进一步研究核力的性质。高能物理的研究，将有助于解开基本粒子世界的一些疑团，加深我们对原子核的认识。然而，这不影响我们对于原子核裂变行为的了解和核能的利用。人类今天已经拥有足够的知识和技术手段，去开发蕴藏在原子核内的巨大能量。

由于核力的上述特点，原子核内部各处核子的密度近似相等。只是在原子核表面的核子，由于外面没有别的核子与它相互作用，所以密度有所降低。正是由于不同的原子核内，中子、质子的排列密度差不多，所以，三十年代丹麦物理学家尼·玻尔提出了液滴模型，认为原子核就象一滴密度均匀的球形液滴一样。近年深入的研究表明，不同原子核的形状有差别，它们并不完全象球，有的呈扁平椭球状。因而科学家们还提出了一系列模型，来解释原子核里的各种现象。但是在解释原子核的集体行为如裂变时，液滴模型还是适合的。用液滴模型对原子核裂变所作的计算，与实验结果相近。

正如液滴是由液体分子组成一样，原子核也象一个由它

的核子组成的“水滴”。原子核内部的核子，四面八方都有别的核子与它相互吸引；而原子核表面的核子，只有内部的核子与它相互吸引。因而原子核也和水等液滴一样，有表面张力。正如液滴由于表面张力形成一个稳定的球形体一样，我们可以近似地认为，原子核也由于表面张力成为一个球形体。中子由于不带电，所以与带正电的原子核之间不存在静电斥力，也最容易穿透原子核外的电子壳层。因此，外来的中子最容易挤进原子核。

当一个中子挤进原子核这种球形体时，原子核就增加了由这个中子带来的多余的结合能。它是中子与原子核结合过程中产生的过剩的能量。实际上，当两个分离的东西结合为一体时，都会放出一部分能量。例如一个在空中的石头下落到地面时，它的位能就会转化为动能释放出来。

中子与原子核结合时带来的多余的结合能越大，原子核受到的激发就越大，因而原子核就越不稳定。这个受到激发的原子核，就象受力的液滴一样，处于不稳定状态，发生振荡。于是就可能出现两种情况：如果中子带来的多余的结合能不够大，或者中子带来的多余的结合能虽大，但很快以 α 、 β 、 γ 等射线的形式放出了相当大的一部分，则原子核的振荡很快会稳定下来，分裂无法发生；如果中子带来的多余的结合能足够大，而且吸收中子后形成的复合核来不及将获得的结合能释放的话，原子核就由球形体变成椭球，由椭球变成哑铃状。由于距离的加长，两半哑铃之间的吸引力已相当微弱，复合核就会进一步分裂成两个各自独立的新球体。这种新球体是原来的原子核的裂变产物，又称裂变碎片。这个裂变过程约需万亿分之一秒。裂变产生的这两个新原子核也是不稳定的。它们还会进一步衰变，释放出多余的核子及能量，才