

核科学百年讲座

第四讲 核能与核电*

刘 军 许甫荣[†] 郑春开

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

摘 要 文章主要介绍了核能的发展历史、物理机制、主要优点以及核电形式核能的利用. 核电的主要优点以耐用、清洁、经济、安全为特点. 文章还介绍了世界核能利用的历程、现状以及核能在我国的发展和利用.

关键词 核裂变 核聚变 核能 核电

Nuclear science in the 20th century —nuclear energy and its applications

LIU Jun XU Fu-Rong[†] ZHENG Chun-Kai

(Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Nuclear fission and fusion can produce enormous energy. The applications of nuclear energy have been changing the world since its discovery in the beginning of the last century. We review the development of nuclear energy and its applications, particularly nuclear power application.

Key words nuclear fission, nuclear fusion, nuclear energy, nuclear power

人类的一切活动都离不开能源,能源是发展工业、农业、国防、科学技术和提高人民生活水平的重要基础. 1939年原子核裂变的发现,开辟了核能利用的新时代. 核能首先用于军事上,随后转向和平利用,核能发电作为一种新的能源迅速崛起和发展,显示了越来越重要的地位. 核能具有独特的优越性,开发和利用新型的核能源是人类社会生存发展的必然趋势. 我国核电事业刚刚起步,结合我国的实际情况,我国核电在21世纪将有更好的发展前景.

1 核能发现、产生和利用机理

核能的利用是核科学对人类社会的最重要贡献之一. 核能的发现凝聚了众多科学家的智慧和汗水. 1932年,英国物理学家查德威克发现了中子,为人类提供了打开核能利用大门的一把钥匙. 1939年,费米利用中子轰击铀发现反应能产生中等重量的元素. 居里夫人的女儿伊伦·居里进行了类似的研究,但得到了不同的反应产物. 德国科学家哈恩重复他们的实验,证实中子轰击铀能产生重量为铀一半的元素,并确定它是钡,他的进一步工作证实了伊伦·居里实验

的产物是钡. 接着,流亡瑞典的奥地利女科学家迈特纳提出了铀核裂变的概念,并指出裂变能放出能量. 为了能持续地放出核能,匈牙利物理学家西拉德最先考虑了链式反应发生的可能性. 1939年约里奥·居里夫妇等人,通过实验发现一个铀核($U-235$)裂变会释放出2—3个中子,用实验证实了链式反应的可能性. 1941年12月到1942年12月,费米领导一批物理学家在芝加哥大学斯塔克运动场的西看台下,成功地建造了世界上第一座原子核反应堆,发出了200W的电,解决了受控自持链式反应的众多技术问题,这标志着核能和平利用时代的到来^[1].

用中子轰击铀核,铀核结合一个中子之后就变成了一个所谓的复合核,复合核内有过剩的内能,使核处于激发态,是不稳定的,这部分激发能有可能通过 γ 射线释放出来,也有可能使得复合核的形状发生变化,变成椭球形甚至哑铃形. 原子核带正电,哑

* 国家自然科学基金(批准号:10075070)资助项目

2002-11-19收到初稿,2003-01-14修回

[†] 通讯联系人. E-mail: frxu@pku.edu.cn

铃状时的库仑排斥力大于吸引力,使得哑铃状继续畸变而最后分为两个碎片,同时还放出2—3个中子。哑铃状不一定是两头对称的(一般都是不对称的),形状可以各式各样,一次分裂后的两个碎片有各种各样的组合,其质量数在75—160之间。较轻的核素和很重的核素平均结合能较小,而中等质量的核素的平均结合能较大。中子与铀-235发生裂变反应后,得到了中等质量的原子核,所以裂变会有能量的释放,释放出来的能量就是裂变能。较轻的核之间(如氘核与氚核)发生反应生成较重的核也要放出能量,这就是聚变能。按照每一个反应核核子平均来计算,轻核聚变释放的能量要比重核裂变释放的能量还高。一个铀-235裂变大约有200MeV的能量放出,按照这个放能水平,每公斤铀-235裂变所释放的能量相当于燃烧2700吨的优质煤释放的能量^[1]。对于聚变,主要的聚变原料氘在海水中大量存在,每一升海水所含的氘如果完全聚变,所释放的能量相当于燃烧300升汽油释放的热量^[1]。可见,核能是具有很大威力的。

核能要真正被利用,必须使得核裂变或聚变反应连续、可控地进行。要使得裂变连续地进行下去,每个中子与铀核反应生成的2—3个中子就要能够引发至少另外一个铀核发生裂变,产生裂变链式反应。在上一讲《核能与核武器》中,我们已经介绍了这种链式反应的物理机制,这里不作重复。反应堆使用的铀燃料经过浓缩,使铀-235的含量由天然的0.7%提高到3%左右,增加了中子与铀-235反应的几率。有关铀燃料的生产过程,也已在《核能与核武器》中详细介绍。根据中子能量的大小,可以将中子分为三类:能量在0.5eV以下的,称为热中子,又叫慢中子;能量在0.5eV—0.1MeV之间的叫中能中子;能量超过0.1MeV的中子叫快中子。实验证明,能量为0.025eV的中子最容易引发铀-235裂变^[2]。但是,铀裂变释放出来的中子能量都很高,为1—2MeV。反应堆使用普通水、重水或者是石墨来慢化中子,这些物质叫做慢化剂。反应堆使用一些吸收热中子很强的材料,做成柱形棒,依靠插入反应堆堆芯原料深浅来控制裂变反应的剧烈程度,实现核裂变可控进行,这些棒就叫控制棒。

裂变能主要表现为裂变碎片的动能,它们占去了整个裂变能的80%^[1],裂变碎片与其他物质相撞,将动能转化为热能,再被反应堆的冷却剂材料吸收,通过循环系统就可以引出,再转化利用。我们以压水堆核电站为例,简单介绍一下核电站的发电原

理。参见图1,与反应堆相连有一个压强约为140atm(1atm=1.01325×10⁵Pa)的高压水循环系统,核裂变反应加热高压水达到350℃左右的温度,引出这些高压高温水,流经一个蒸汽发生器并与那里的水发生热交换(不交换水),使产热器内的水加热汽化。产生的蒸汽通过汽轮机,带动发电机组而发电。同时,从汽轮机里放出的蒸汽,在冷凝器内冷凝,再通过水泵,循环送回蒸汽发生器,再次加热循环。这样反应堆通过核裂变和以上过程,源源不断地产生电力。根据慢化剂和冷却剂的不同,反应堆可以分为很多种类,如轻水堆、重水堆、有机堆、气冷堆、液态金属冷却堆等。通常轻水堆又可以分为沸水堆和压水堆。压水堆是现在核能发电中最普遍的堆型,技术成熟、安全。

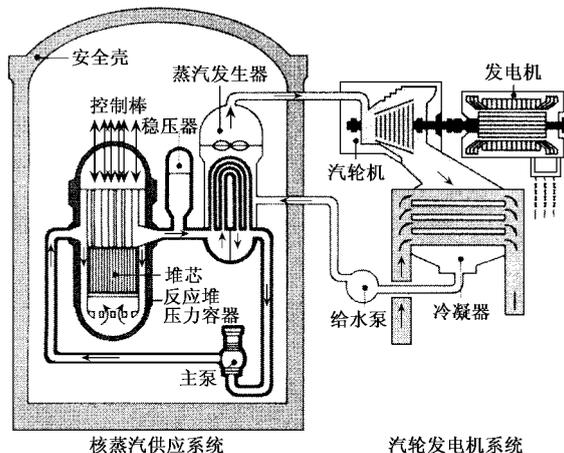


图1 压水堆核电站示意图

2 核能的优点

能源的种类很多,从产生的方式可以分为一次能源和二次能源。在自然界中存在没有经过加工转换而直接开采利用的能量资源就是一次能源,煤、石油、天然气、水能和核燃料都属于一次能源。核能与其他的一次能源相比,具有独特的优点。

2.1 核能耐用

人类长期使用的化石燃料是有限的,它们是不可再生的资源。人们根据已探明的这些不可再生资源的蕴藏量及其可利用的年限估计,石油、天然气在21世纪中叶或稍后即将枯竭。这种情况势必给人类能源供应带来极大压力,为此人们一直在积极寻找能够替代它们的能源资源。铀矿还可以开采一百多年,所以核能可以替代石油、天然气而解决21世纪面临的能源问题。煤很快也会被消耗完,人类不可能长期依靠煤炭资源来提供能量。现在的核能利用还

只是使用占天然铀 0.7% 的铀-235, 而占 99.3% 的铀-238 没有得到利用。铀-238 很容易吸收快中子而再生为新的核燃料钚-239。利用钚-239 可以制造不需要慢化剂而直接利用快中子维持链式裂变反应的反应堆, 即快中子反应堆。钚-239 吸收一个快中子可以平均产生 2.45 个快中子, 假如扣除一个快中子与另外的钚-239 反应, 剩下的 1.45 个快中子能与铀-238 反应生成新的钚-239, 那么就可以实现钚-239 的增殖, 这就是快中子增殖反应堆。这样, 铀矿资源的利用率就可以提高到 60%—70%。按照这样的利用水平, 现存铀矿资源还可以使用 2000 多年^[1]。如果受控的热核聚变实现, 那么核能就能为人类的生存发展提供长期稳定的能源。

2.2 核能清洁

1992 年召开的联合国环境与发展会议通过了以可持续发展为核心的《里约热内卢宣言》和《21 世纪议程》等文件, 第一次正式提出了可持续发展的思想, 能源与环境的协调发展就是其中的重要要求^[3]。然而, 现在的化石能源却是环境污染的主要根源, 环境和能源发展极不协调。现在全球面临的主要环境问题有 CO₂ 大量排放引发的温室效应, SO₂ 增加引起的酸雨, NO₂ 增加破坏臭氧层等。这些主要是由于大量燃烧化石燃料造成的。因此, 从人类的生存发展考虑, 我们应当积极地改善能源结构, 减少化石燃料的使用, 开发不产生以上主要污染物的新能源。

核能来源于原子核的分裂或聚合, 不像化石燃料产生与氧结合的污染物。现在核能的应用主要是裂变形式的核能, 它只产生极少量的辐射, 在正常操作运转下, 这些辐射对环境的影响很小。国际辐射防护委员会 ICPR(International Commission on Radiological Protection) 1993 年统计, 人体所受的辐射 76% 来自宇宙射线, 周围环境中的放射性物质辐射占 20%, 医疗辐射占 4%, 而核电辐射不到 1%。国际原子能机构安全部的对比统计表明: 每年一座 100 万千瓦以煤或石油发电的电厂, 在城市居民中引起死亡的人数和生病的人数可以分别达到 3—30 人和 2000—20000 人, 而一个发电量相仿的核电厂在正常运作下引起死亡和生病人数不超过 1 人。聚变核能是一种最理想的能源, 它的主要原料是海洋中大量存在的氘, 产物也是很干净的轻元素。从对环境的影响来看, 一贯被认为清洁能源的水电, 在利用中的问题也暴露出来, 它改变了水文, 淹没土地, 改变了原有的生态平衡, 并且其引起的后果很难恢复。核能是一种清洁的能源, 增加核能的利用将为解决

现在全球面临的环境问题实现人类的可持续发展做出贡献。

2.3 核能经济

核能是高密度能源, 从单位体积原料中得到的能量很大。核电站是一种高能量、低消耗的电站。我们比较一下 3000 MW 发电能力核电站和燃煤电站的每天运行情况。如果铀-235 每次衰变产生 190 MeV(实际超过此值) 的能量, 经过计算, 需要铀-235 大约 3300 g, 而需要热值为 6550 千卡的优质煤 9600 吨。如果用 50 节车厢, 每节车厢 100 吨运载量的火车运送这些煤, 每天需要 2 辆专车负责运送。可见, 核电站的运输成本很低, 原料费用很少, 对于缺乏煤、石油、天然气和水力资源的地区, 核电应该具有无可替代的优势。

电站的经济指标以每度电的成本来计算。以燃烧煤或石油为原料的电站每度电的发电成本, 其基本费用与运行费用的比约为 1:2, 而核电站的发电成本差不多反过来。基本费用主要来自建造费用。核电站技术要求高、安全要求指标高, 所以目前基本费用较高。但是, 从长远看, 随着技术水平的提高, 核电设备的改进, 核电规模扩大, 核电的费用会逐步降低。而煤、油电站随着环境要求的提高, 需要增加环境保护设备来减少煤电释放物的污染, 其成本会逐渐增加。现在, 一些国家和地区(法国、日本和美国东部) 的核电成本已经低于煤、油发电的成本。其中法国最明显, 达到了 1:4 的水平^[1]。另外, 水电的开发面临着居民迁移与安顿的巨大费用, 严重影响了它的经济性。相比来说核电是一种运行起来非常经济的能源。

2.4 核能安全

核反应堆一般用的是浓度约为 3% 的低浓缩铀, 而且它的全部设计是为了实现裂变反应并使其能有控制地连续进行, 与核弹的高浓缩原料、非受控目的绝然不同。因此, 核电站绝对不会发生像核弹那样的爆炸。当反应堆的功率过高时, 反应堆可以通过可靠的安全控制系统迅速实现停机。反应堆还有冷却系统, 以保证在正常工作或者是发生事故时将燃料的热量带走, 避免燃料元件烧毁。所以, 正常操作和运转下的核电站是很安全的。核电安全问题最重要的是避免和防止放射性物质泄漏对环境造成的危害。核电站本身就有四道天然的屏障(见图 1): 第一道屏障是抗辐射的固体芯块, 它可以将绝大部分的裂变产物包容; 第二道屏障是密封的燃料包壳, 核燃料芯块和放射性的裂变产物都被密封在锆合金包壳

内,第三道屏障就是坚固的压力容器,整个堆芯密封在 20 多厘米厚的钢制压力容器内,可以挡住万一泄漏的放射性物质,第四道屏障是安全壳,它高六七十米,壁是厚 1m 的钢筋混凝土物质,内表面还有 6mm 的钢衬里。核电事故的发生主要是人为造成的,不是技术上的问题。随着核电技术的发展,操作运行核电站会更加的简便,核电的安全水平会越来越高的。

3 核能利用的历程和现状

核能的利用首先是在核弹上实现的。第二次世界大战的爆发,使得原子核裂变这一核科学的新成就用于军事,制造了原子弹。1945 年 8 月,美国在日本的广岛、长崎投下了两颗原子弹,造成了很大的人员伤亡,这是一种灾难。由此,人们往往把核能和灾难、恐怖联系在一起,蒙上核恐怖的阴影。

1951 年 12 月,美国利用它的“增殖一号”快堆产生的高温蒸汽,带动发电机发出 200kW 的电,人类第一次利用核能发出了电^[1]。1954 年,前苏联建成了世界第一座核电站。反应堆技术不断改进,核电技术逐渐成熟,核能事业得到了蓬勃的发展。20 世纪 60 年代初到 70 年代初是核电发展的黄金时期。1979 年美国宾州三英里岛事故和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站事故使得人们更加冷静地对待核能。世界各国更加重视核电的安全,在核电安全上投入了大量的资金,使核电的安全性得到了进一步保证,促进核能利用事业进一步向前发展。比如,1989 年德国和法国联合推出“欧洲压水反应堆计划”,将过去 2 个冷却系统提高到 4 个,外部保护设备也大大加强。

核电作为一种新兴的能源,正在向前发展。在过去的五十年中,核电在世界能源消费中的比重上升最快。另外,据世界银行统计,到 1996 年底,全世界有 32 个国家共拥有核电站 443 座,总消费比重已经占到世界总用电量的 17%。1999 年,全世界年核发电量为 23946 亿度,约占全部所需电能的 1/4^[1]。现在正在建设中的核电站有 30 座,装机容量为 21642MW。可见,核电已经并正在向前发展。

为了核能更加安全、清洁、高效地造福人类,人们做出了很多的努力。世界上第一座沸水反应堆前不久在日本的柏崎核电站投入商业运行。它把反应堆安全方便性能提高到了新的水平。法国的 120 万 kW 大型商业验证快堆和美国、日本等示范快堆都投入运行。1998 年我国的实验快堆已开始了建造,快中子增殖反应堆在 2010 年也即将投入建造^[1]。这

将大幅度提高铀的使用率,极大地延长铀矿资源的使用年限。许多国家积极发展小核电,以减少核电建设的前期投资,促使核电更大范围地利用。同时,人们在托卡马克装置上的热核聚变研究也取得了巨大进展。1991 年,欧共体的欧洲联合环(JET)第一次实现了氘-氘聚变反应;1997 年,它又创造了核聚变输出功率 12.9MW 的新纪录,随后又提高到 16.1MW^[1],越来越接近点火条件。尽管聚变能的利用还在不断探索之中,还会遇到很多的困难,但是,聚变能的和平利用有一天终将到来,它将成为最理想的能源造福人类,解决人类自古以来存在的能源问题。

4 核能在我国的发展和利用

我国的核能事业起步于 20 世纪 50 年代,首先也是应用于军事上。1964 年 10 月 16 日,我国第一颗原子弹装置爆炸成功,标志着我国核工业初步建立。我国的核工业从主要为军用服务迅速发展起来。然而,对比其他国家的核能从军用到民用的过程,我国民用起步很晚。美国以及前苏联,核电站的运行是在 20 世纪 50 年代中期,英国和法国是在 20 世纪 60 年代,我国直到 1991 年 12 月浙江秦山核电站并网发电,才有了自己的第一座核电站,比上述国家慢了 27—37 年。所以,相对来说我国核电事业起步很晚。

我国核能利用与许多国家存在较大的差距。我国核能利用总量很少,远远低于美国、法国、日本等发达国家,核能消耗量占整个一次能源消耗的比重也远远低于法国、日本,甚至低于发展中国家印度。法国核电在电力中的比重已经超过 75%。

与东亚相邻国家、地区相比,我国大陆地区的核电所占总用电量的比例远远低于日本和韩国以及台湾地区,1995 年日本和韩国的核电比例分别是 30% 和 36.2%,台湾地区是 31%,而我国大陆只有 1.29%。

我国现在运行中的核电站有浙江秦山 I—300MW,秦山 II—2×900MW,广东大亚湾—2×900MW,发电量不到总发电量的 1%;正在建设中的有秦山—III—2×700MW,广东岭澳—2×900MW,江苏连云港—2×1000MW,等到 2005 年全部投入运行,发电量还不到预期发电总量的 2%。所以,核能利用和核电事业在我国还有很大的发展空间。

目前,我国能源消费结构依然是以煤为主,全国年消耗煤的量已超过 13 亿吨,核电的比重虽然有所上升,但所占比例很低,处于百分之零点几的水平^[4]。这样的能源结构很不合理。我国煤燃烧效率低,所以

