

核电:

应春豹·著

安全清洁的能源

YIN CHUNBAO · ZHU



学林出版社 Xuelin chubanshe



HEDIAN ANQUAN QINGJIE DE NENGYUAN

核电：安全清洁的能源

应春豹 著

学林出版社

责任编辑：褚大为
封面设计：邹纪华

核电：安全清洁的能源

应春豹 著

学林出版社出版 上海文庙路120号
新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 5.25 字数 109,000

1991年1月第1版 1991年1月第1次印刷 印数 1—1,200册

ISBN 7-80510-160-4/T·7

定价 2.90 元

序

自从 1954 年世界第一座核电站在苏联建成以来,核能发电的理论与工程技术日臻成熟,经济效益逐渐提高,核电成本已开始低于火电,加之核燃料运输时对环境污染较小等,因而,核电较火电有优越之处。1966 年以后,全世界核电站装机容量平均每年以 25.5% 的速度增加,至 1989 年底全世界核发电量已占总发电量的 17%。

我国能源工业的发展规划也十分重视把核电作为能源之一。目前,我国自行建造的浙江秦山核电站一期工程已近尾声;位于广东大亚湾的核电站亦进入安装阶段。到 2000 年核电的生产目标是 300 亿千瓦小时。

但是,关于核能发电的科学知识的普及则远不如核电发展速度那样快,这不仅在国内,在国外亦是如此。由于人们对核能发电,特别是对它对环境的影响缺乏了解,有些与事实相悖的误解还很普遍。诸如,认为核电站的安全性很差;核电站比火电站对环境的污染更严重等。尤其是在美苏发生了三里岛和切尔诺贝利核电站事故之后,许多人对核电的安全性更加担心了。

《核电:安全清洁的能源》回答了大家普遍关心的问题。它简明地讲解了核电原理之后,深入浅出地阐明了放射性的原理;核电站对环境的影响;分析了三里岛和切尔诺贝利事故,

论及了有关核电安全的主要问题。

我与作者曾一起从事反应堆工程的设计和实验工作达十余年之久，熟知作者除了具有坚实的反应堆理论和工程的素养外，还擅长反应堆的安全防护设计、辐射屏蔽计算，亦曾专门从事核电站的有关研究工作；近年来，又从事核辐射对环境影响的安管理工作。所以说，他正是《核电：安全清洁的能源》一书的合作者。我知道本书所侧重的方面是与作者专业经历相贴切的，是一本内容严谨通俗的中高级科学普及性读物。

最近，我曾到过秦山核电站，见到大批的人除了参观现场之外还饶有兴趣地在那里围着电站模型发问不止。以秦山的偏僻，每天尚有那么多人前往，足以表明人们急切了解核电站的热情和愿望。由此我可以推断，本书出版之后定会受到读者的欢迎，也将成为明年庆祝秦山核电站启动成功的一束绚丽礼花。

赵 启 正

1990年9月3日

目 录

序.....	赵启正
前言.....	1
第一章 核能发电的基本原理.....	3
第一节 巨大的能源.....	3
一、受欢迎的能源.....	3
二、能量的宝库.....	6
第二节 核能发电的基本原理.....	9
一、原子核裂变反应.....	9
1. 裂变反应初次实现	9
2. 裂变反应的过程	10
3. 裂变产物和活化产物	16
4. 裂变反应产生的能量	18
二、核燃料.....	20
1. 核燃料的性质	20
2. 核燃料的增殖	22
三、实现核能利用的途径.....	25
1. 反应堆芯部结构	25
2. 热量的传递	27
3. 反应堆的控制	32
4. 辐射防护措施	37

第三节 核电站废物的处理	41
一、废气的处理	41
二、废水的处理	43
三、固体废物的处理	46
四、乏燃料的处理	46
第二章 环境中的辐射及其影响	50
第一节 放射性是普遍存在的	50
一、放射性	50
1. 什么是放射性	50
2. 射线的性质	52
3. 放射性的衰变规律	54
4. 放射性的防护	56
5. 放射性的度量	58
二、环境中存在的放射性	59
1. 天然放射性	59
2. 人工放射性	60
3. 放射性广泛存在于环境	61
三、辐照的生物效应及其限值	68
1. 辐照的生物效应	68
2. 核电站的辐照限值	70
第二节 核电站对环境的辐射影响	72
一、核电站的选址	74
1. 一般条件	74
2. 人口分布	75
二、核电站正常排气的影响	77
1. 气象因素	77

2. 气体排放	79
3. 对居民的影响	80
三、核电站事故排气的可能影响	81
四、核电站排水的影响	85
第三节 核电站非放射性排放物的影响	86
一、废热排放	87
1. 废热排放对生态的不良影响	87
2. 废热的利用	91
二、抽水卷吸作用的影响	92
三、化学物排放的影响	93
第四节 核电与煤电对环境影响的比较	94
一、放射性的影响	94
二、化学污染物的影响	96
1. 二氧化碳的影响	97
2. 二氧化硫的影响	101
三、综合比较	103
第五节 核电站辐射环境的监督	104
一、环境辐射本底调查	106
1. 本底调查的目的	106
2. 本底调查的内容	107
二、运行期间的环境辐射监测	109
1. 环境辐射监测的目的	110
2. 环境监测计划	110
三、事故时的环境辐射监测	115
第三章 核电站事故对环境的影响	119
第一节 三里岛核电站事故	122

一、预防辐射泄漏的措施·····	122
二、事故的发生·····	124
三、事故影响分析·····	127
1. 放射性的排放量 ·····	127
2. 环境监测结果及影响 ·····	128
3. 处理不当造成的混乱 ·····	129
4. 结论性意见 ·····	130
5. 国际合作长期研究 ·····	131
第二节 切尔诺贝利核电站事故·····	132
一、事故的发生与紧急处理·····	132
1. 事故的发生 ·····	133
2. 紧急处理 ·····	136
二、事故的影响·····	139
1. 事故中放射性的释放过程 ·····	139
2. 对环境的影响 ·····	140
3. 对人的影响 ·····	144
4. 对邻国的影响 ·····	148
5. 长期的影响 ·····	151
第三节 两次事故的比较·····	152
一、核物理特性上的差别·····	152
二、堆芯结构上的差别·····	154
三、两次事故综合比较·····	156

前 言

人类第一次打开微观核子世界，获得核能发电至今已有 30 多年的时间。30 多年来核电发展走的是一条不平静的道路，应该说比其他的工业发展具有更多的争论，更多的担心和疑虑。其原因可以说是多方面的，在这诸多的原因中，主要有两条，一条是核能第一次在公众面前出现，竟是一种杀伤力强大的核弹形式，两枚核弹就杀死了长崎和广岛两地的 10 多万人，以致直到今天日本人民还要年年纪念这个可怕的日子，这也在全世界人的心里留下难以忘却的印象，似乎将核电站也当成为原子弹的“后代”；另一个原因就是核技术不够普及，人的本能无法直观地感知核辐射的存在，以至披上一层神秘的色彩，平添一层惶恐心理。

但是核能的好处和不断提高的安全性，给人们带来的诱惑也与日俱增。因而世界的核电一直是在快速的发展。尤其当今煤、油等能源对环境的污染被人们重视后，核能更显出它的优越性。甚至原先怀疑核电的人，如今也转而主张建设核电。现在全世界每年实际的核能发电量已超过 1800 吉度（1 吉度为 10^9 度），给各国的社会经济发展和人民生活提供了充足的电力。我国在改革开放搞活经济的浪潮中，正在建设的两座核电站，即浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站，计划分别在 1990 年和 1992 年发电，功率分别为 300 兆瓦和 1800 兆

况。国家还打算在 2000 年以前,要建成几座核电站。一些地区和单位正在开展前期工作,为建站做准备,迈出我国核电建设的第一步。

核电在其发展过程中,设计出了各种类型的反应堆,如压水堆、沸水堆、石墨堆、重水堆、快中子增殖堆等等。现在,全世界正在运行的核电站中,压水堆占一半以上,因为它造价低廉,运行方便,结构简单紧凑,稳定可靠,技术成熟,最早实行标准化生产,成为核电站中的佼佼者,格外受到开始发展核电国家的青睐。我国也选择以压水堆起步,正在建设的二座核电站都采用压水堆,这是因为:第一,世界上采用这种堆型的核电站占多数,而且历史长久,在设计、建造和运行各方面都有比较丰富的经验可以借鉴,对于刚开始建设核电来说,这是重要的因素;第二是压水型反应堆体积较小,建设周期短,造价较低;第三是压水堆采用低浓缩铀作燃料,这种浓缩技术已经成熟,我国也已经掌握;第四是压水堆电站带有放射性的冷却系统,自成一体,与二回路提供蒸汽发电的系统是分隔的。放射性物质不容易进入二回路而污染汽轮机,也使在二回路的工作人员,减少受放射性的影响。故此我国也采用压水堆为开建核电站,因而本书也以压水堆为主要内容,但是不管哪种类型的反应堆,其发电的基本原理,即产能——取能——发电都是一样的,只是巧妙不同而已。

本书得到赵启正教授和夏益华副研究员的帮助,在此一并表示感谢。

第一章 核能发电的基本原理

第一节 巨大的能源

能源是指能够提供可以利用能量的资源。如煤、石油、天然气等,在燃烧时就会释放出能量,这类物质就是能源;另一类如水力、太阳能、风能、地热等,不是从燃烧方式获得能量,而是以做功或其他物理效应获取能量的,也是能源。此外,我们把电力、煤气、蒸汽、焦炭和石油制品等,也称为能源,不过它们不是直接来自自然界,而是经过一定的加工之后才获得的,故称作二次能源,那么直接采用自然之物获得能量的能源,自然就叫一次能源了。

核能利用发展到今天,技术已经成熟,十分安全可靠,而且经济上也可以和燃煤电站相比,对于建设核电站较多的国家,实现了系列化和标准化以后,甚至比煤电站更加经济。因此,核电站受到各国的重视,似乎成了能源中的宠儿。

煤、石油、天然气一类能源,其前身都是有机体,故常统称它们为化石燃料。燃烧是一种化学反应。核能则是从原子核内部释放出来的能量,核裂变反应是核能释放的一种形式,从产能的机制来说,两者是完全不同的,后者释放的能量要大得多。

一、受欢迎的能源

早在1938年发现原子核裂变现象时,人们就惊奇地发

现,除了在裂变过程中产生放射性物质以外,还会释放出巨大的能量。在化学反应中原子产生的能量是以电子伏特作为计算单位,而核裂变产生的能量要用百万电子伏特计,也就是说裂变能要比化学能大上百万倍,这实在太惊人了!

要开发这一巨大的能源,不可缺少的是提供一个发生裂变反应的设施,即反应堆,这在1942年就已经建造成功。但是要把能量取出来利用而又不使放射性物质泄漏,是相当复杂的事。直到1954年,世界上第一座实用的核电站终于在苏联建成,向工业电网并网发电,虽然电功率只有5000千瓦,不算大,重要的是它证明了核能发电是可行的,核能是清洁、安全的一种新能源,有着广阔的前景。

30多年来,核能在世界上的发展相当迅速,尤其在能源资源缺乏的国家,核能升为第一位,成了主要的能源。从国际原子能机构公布的结果知道,到1989年年底为止,全世界五大洲的27个国家和地区,已经运行的核电站有434座反应堆,总共发电功率有318吉瓦,占到全世界总电量的17%。此外,正在建设的核电站有97台机组,总共77吉瓦。

在这些国家中,建得最多的是美国,有110座已成为商用核电站,核电占了全国总电量的16.6%;其次是苏联,也建了57座,核电所占的比例是10.6%。值得一提的是法国,其国土面积只有55万平方公里,人口只有5千多万,然而到1989年底就建成了55座核电站,平均每1万平方公里或每100万人口就拥有一座核电站,密度是很高的。1989年,核电在法国总电量中的比例占到75%,而且他们骄傲地宣称,核电从来都没有出过重大事故。

在亚洲国家中,日本的核电发展较快,到1989年底已建

成 39 座,计划到 2000 年还要增加 7 座,使核电的总功率达到 62 吉瓦。此外,南朝鲜已经运行的核电站有 9 座,计划到 2000 年使核电站数量达到 14 座。我国台湾省已有 6 座核电反应堆在运行,欲建的有 2 座反应堆。某些主要核电国家和地区的建设情况可参看表 1-1。

表 1-1 主要国家和地区核电建设一览表

(截止 1987 年 7 月 31 日)

国家或地区	运行中		建造中		1986年发电量	
	反应堆数量(个)	装机容量(吉瓦)	反应堆数量(个)	装机容量(吉瓦)	发电量(吉度)	核电所占比例(%)
美国	109	100.323	13	15.809	414	16.6
法国	47	46.693	14	18.477	241.4	69.8
苏联	57	34.334	29	29.620	148	10.6
日本	37	28.146	1	10.068	166.5	24.7
联邦德国	21	19.911	4	4.325	112.1	29.4
英国	39	12.796	5	3.822	5.18	18.4
加拿大	19	12.553	4	3.740	67.2	14.7
比利时	8	5.740	—	—	37.1	67.0
南朝鲜	7	5.816	2	1.900	26.6	43.6
台湾	6	5.144	2	—	25.8	43.8
捷克	7	3.002	9	6.210	16.2	21.0
民主德国	5	1.835	6	2.640	12.2	11.6
保加利亚	4	1.760	4	4.000	11.2	30.0
印度	7	1.243	6	1.410	4.5	2.7
中国			3	2.172		

从核电发展的速度来看，一开始就相当迅速，以五倍于常规电站的发展速度稳步向前。目前，不但工业发达的国家大力发展核电站，不少发展中国家也在积极发展核能。不但能源缺乏的国家，如法国、意大利、日本都在大力发展核电，而且有相当丰富化石能源的国家，如美国、英国、德国也在积极发展核电，就像目前能源充足并有余量的苏联等国也都很重视核能的发展。核电受到普遍的欢迎，即使是发生了严重事故，也没有改变这一现实。

二、能量的宝库

原子核虽然非常微小，要用很高放大倍数的电子显微镜才能看到它的面目，然而在它里面却贮存着巨大的能量，这只要拿核燃料和煤稍加比较，就可看到这一点。

从大量的核物理实验和理论计算证实了核燃料铀-235每次裂变反应大约产生 190 兆电子伏特，而每 1 兆电子伏特又等于 1.6×10^{-18} 瓦·秒，两者的乘积就是每次裂变时产生 3.04×10^{-11} 瓦·秒的功率，那末每产生 1 瓦·秒功率所需的裂变数就为该数的倒数，即 3.3×10^{10} 次裂变，也就是说要消耗这么多个铀-235 的原子核。如果一座核电站总的热功率为 3000 兆瓦，运行 1 天（即 86400 秒），那么总共要消耗掉的铀-235 数目，就只要将上叙三个数相乘就可得到，即 8.55×10^{24} 次裂变，也是每天要消耗的铀原子个数。

另一方面，我们知道铀-235 的原子量是 235，即 235 克铀的原子个数是阿佛加得罗常数，为 6.023×10^{23} 个，这样，一天所消耗的铀-235 的重量就是：

$$\frac{8.55 \times 10^{24} \times 235}{6.023 \times 10^{23}} = 3300 \text{ (克)}$$

再来看看相应情况下，煤的消耗量。我们拿热值为 6550 千卡的煤来作比较，一吨这种煤燃烧后产生的能量为 2.7×10^{10} 瓦·秒。同是 3000 兆瓦运行了 1 天 (86400 秒)，两者相乘就是一天耗的功率，即 2.6×10^{14} 瓦·秒。这样，一天里所消耗的煤量就为：

$$\frac{2.6 \times 10^{14}}{2.7 \times 10^{10}} = 9600 (\text{吨})$$

将消耗的煤量与消耗的铀-235 量相比较，我们便知用煤量是用铀-235 量的近 3 百万倍。这两者间相差如此之悬，给人们一个很大的启示，就是利用核能可以大大减少对燃料的需要量，也即大大减少长途运输量，无疑这是一个很大的优点。要知道燃煤电站的运煤工作是一项长期繁杂又无法摆脱的难题。

从我国情况来看，常用的能源如煤、石油、水力等都受到产地分布不均的限制。经济发达的沿海地区正是缺少能源的地区，需要从产地运入燃料。为了保证能源不渴，运输就是必然碰到的问题。试想一座电功率为 1000 兆瓦的电站，热功率约为 3000 兆瓦，每天就要用近万吨的煤，这些煤若用火车运输，每节车厢如装 50 吨，那么需要 200 节车厢，或者说每天要有 50 节一列的火车四列运煤到站。如用船运，则每天要有一艘万吨轮到站。这里还没有把路途时间和装卸时间考虑在内，其艰巨性可想而知了。

问题还有另一个方面，煤资源开采满足不了需要的增长，也是长期难以解决的问题。目前我国能源总产量相当于 600 多兆吨的标准煤，按需要缺煤每年约 100 兆吨。长期以来我国电力一直处于紧张状况，按人口平均分配的话，每人每年只

有 300 多度电，而香港人均产电约 3000 度，法国是 6000 度，美国 10000 度，挪威达到 20000 度。比较之下，我国的电量太少了。因此，城市普遍感到电力不足，工厂必须轮流停工，甚至商业区、居民区也不能保证供电，出现经济发要量“电力”而行的局面。就拿 1987 年来说，全国缺电约 700 亿度，使 25% 的工业生产能力的发挥不出来，损失价值达 4000 亿元，国家少得利税 500 多亿元，多大的损失呀！

可见，古老的化石能源的生产、运输和需要之间不能获得满足，出现当今社会发展的不协调。如果仍然停留在这种状况，显然经济就不能快速发展。从长远着想，应迅速打破这种旧的格局，必须开辟其他能源途径。自然界的太阳能、风能、潮汐、地热、甚至火山、雷电、海啸，科学家们都在研究如何利用，希望能对人类服务。但目前来说，技术上还不够成熟可靠，经济上还难以和古老的能源相竞争。有的还处在探索试验阶段，因而一下子还难以解决目前大量需要能源的问题。

核电无论从技术上、经济上都比较稳定，已经成为一种使用多年的商品。最方便的是可以在需要的地方就地建设，不受物源的影响，因为燃料的用量极少，不存在运输难的问题。核电是最现实的一种能源，受到人们的重视，因而也得到快速发展。进入 80 年代以来，世界上每年都以建成 20 多座反应堆，近 20 吉瓦电量的速度发展着，核电在总电量发展中的比例不断在提高，在世界范围内已经达到 17%。中国的核工业主要是国防工业，起步并不晚，在发展中国家来说，还属比较早的，成果也显著，核弹、氢弹都成功爆炸。但核电的发展已经是比较晚了，全世界已有 400 多座，而中国大陆起码到 1990 年以后才会有核电产出。现在有把军事工业转为民用工业的