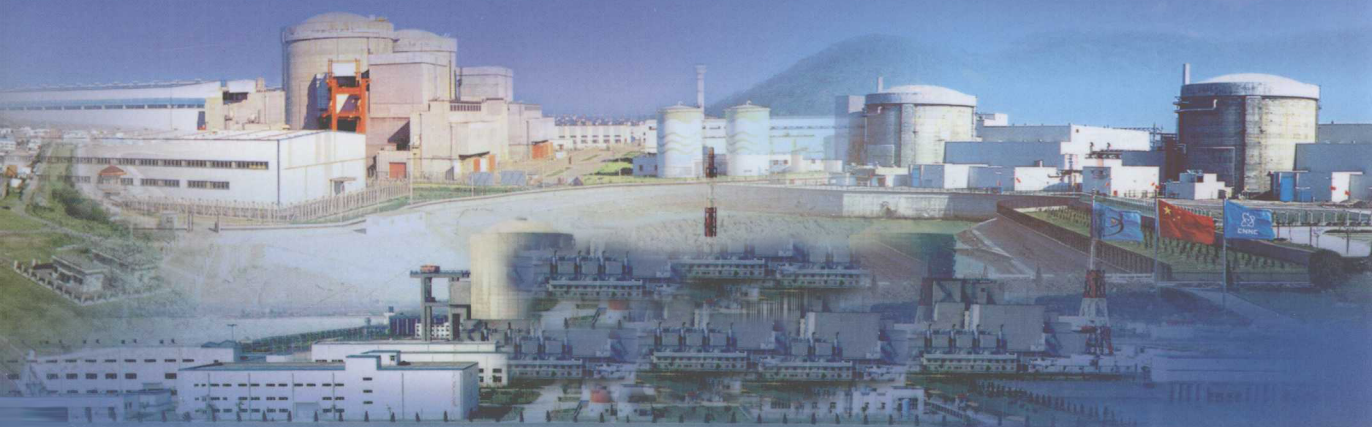


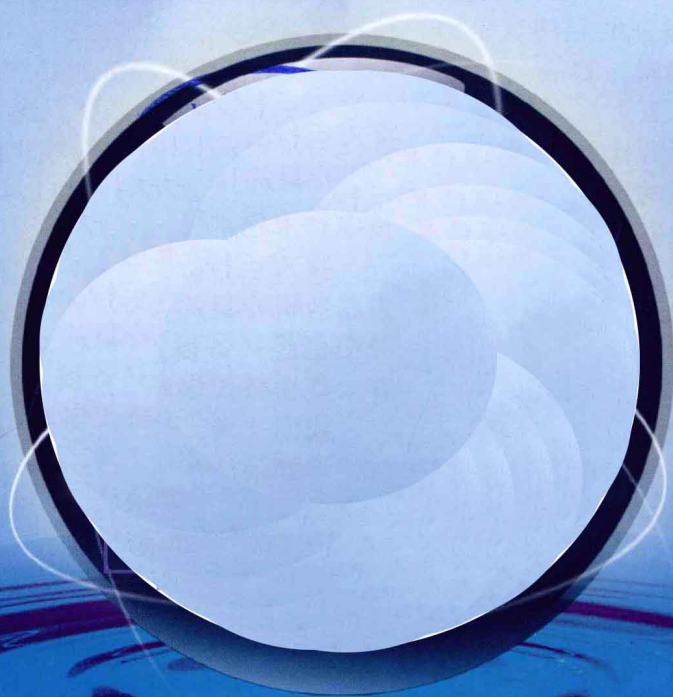
走近核电

中原 编著



中国原子能出版传媒有限公司

走近核电



中国原子能出版传媒有限公司

图书在版编目(CIP)数据

走近核电 / 中原编著. — 北京: 中国原子能出版传媒有限公司, 2011.4
ISBN 978-7-5022-5205-2

I. ①走… II. ①中… III. ①核电站—普及读物
IV. ①TM623-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第053070号

走 近 核 电

出版发行 中国原子能出版传媒有限公司 (北京市海淀区阜成路43号 100048)

责任编辑 杨树录 谭 俊

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

装帧设计 赵 杰

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

字 数 96千字

印 张 3.75

版 次 2011年4月第1版 2011年4月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5205-2 定 价: 20.00元

网址: <http://www.aep.com.cn> Email: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845 010-68422012 版权所有 侵权必究

目 录

1	核能发展概况.....	2
1.1	世界能源概述.....	2
1.2	世界核电发展现状.....	3
1.3	我国核电的发展现状.....	5
1.4	与日本福岛第一核电站相比我国核电站的优势.....	10
2	核能和核电基本知识.....	11
2.1	核能原理.....	11
2.2	核反应堆.....	13
2.3	核电站.....	15
2.4	核电的优越性.....	24
2.5	核电站的安全保证.....	26
3	辐射与防护.....	32
3.1	什么是放射性.....	32
3.2	日常受到的照射.....	33
3.3	辐射对人体健康的影响.....	34
3.4	放射性核素碘-131、铯-134和铯-137.....	34
3.5	核辐射可以防护.....	35
3.6	核电站对核辐射的监测.....	36
3.7	核电站工作人员的照射情况.....	37
3.8	核电站对人类辐射环境的影响.....	38
4	我国核应急.....	41
4.1	国际核事件分级.....	41
4.2	核应急.....	44
4.3	公众防护措施.....	47
4.4	核应急演练.....	50
5	附录 I 三哩岛核事故.....	54
	附录 II 切尔诺贝利核事故.....	55
	附录 III 福岛核事故.....	57

前言

自19世纪70年代产业革命以来，由于经济发展，世界能耗增长了20倍。迄今为止世界能耗的85%来自煤炭、石油、天然气等化石燃料。大量燃烧化石燃料所产生的二氧化硫、二氧化碳、氮氧化物、一氧化碳和烟灰等物质，一方面给人们赖以生存的环境造成严重污染和生态失衡；另一方面化石燃料的不断消耗使地球上的储量日益枯竭。因此，人类将面临后续替代能源的抉择。

自1954年人类利用核能发电——苏联建成世界上第一座核电站（奥布宁斯克的5兆瓦试验核电站）以来，核电站的发展已走过半个多世纪的历程，核电技术已趋成熟，截至2011年3月底，全世界已有32个国家和地区建有核电厂，投入运行的核电机组443座，总装机容量为37832.4万千瓦，约占世界电力总装机容量的16%。法国核电占全国总电量的比例已达76%。核电在各种能源中已经具备很强的经济竞争力。核电作为一种安全、经济、清洁能源，能够大规模替代煤炭、石油、天然气资源，是发展低碳经济的必然选择。

我国“十二五”规划中指出：未来十年，将致力于调整以煤为主的能源结构，增加清洁能源比重，使我国水电、核电、风电、太阳能等非化石能源占一次能源消费总量的比重由目前的仅为8.3%，提高至2015年的11.4%。在确保安全的基础上高效发展核电。

我国核电中长期发展规划中也指出：积极推进核电建设，是国家重要的能源战略，对于满足经济和社会发展不断增长的能源需求，实现能源、经济和生态环境协调发展，提升我国综合经济实力和工业技术水平，有重要意义。

我国在发展核电的过程中，始终贯彻“安全第一，质量第一”的方针，国务院和有关部门制定和不断完善了核安全防护法规体系，建立了严密的质量保证体系，强化核安全监督，切实做好各项核应急准备、核应急管理工作。这一系列有关核安全的法律、法规和管理措施切实保障了我国核电厂安全运营和持续发展。

为使广大读者对核能及其应用有一个正确的、科学的认识，消除人们对核的神秘感，克服不必要的恐核心理，特编辑出版了本小册子，供广大读者了解和熟悉核能、核辐射、核防护、核应急等基本知识。

中国核工业集团公司科技部对本书的出版给予大力支持和指导，并组织中国原子能科学研究院的有关专家进行了仔细审阅，提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

中原

2011年4月

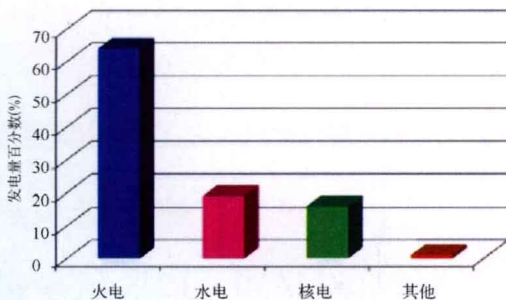
1. 核能发展概况

1.1 世界能源概述

能源是整个世界发展和经济增长的最基本的驱动力，是人类赖以生存的基础。能源按基本形态和利用方式可分为一次能源和二次能源。

一次能源是指自然界中以天然形式存在并没有经过加工或转换的能量资源。其中包括煤炭、石油和天然气在内的三种化石燃料是一次能源的核心，它们成为全球能源的基础；除此以外，水力、核能、太阳能、风能、地热能、海洋能以及生物质能等也在一次能源的范围内。自19世纪70年代的产业革命以来，化石燃料的消费量急剧增长。初期主要是以煤炭为主，进入20世纪以后，特别是第二次世界大战以来，石油和天然气的生产与消费持续上升，石油于20世纪60年代首次超过煤炭，跃居一次能源的主导地位。虽然20世纪70年代世界经历了两次石油危机，但世界石油消费量却没有丝毫减少的趋势。此后，石油、煤炭所占比例缓慢下降，天然气的比例上升。同时，水力、核能、太阳能、风能、地热能等其他形式的能源逐渐被开发和利用，形成了目前以化石燃料为主和可再生能源、新能源并存的能源结构格局。

二次能源则是指由一次能源直接或间接转换成其他种类和形式的能量资源，例如：电力、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤和沼气等能源都属于二次能源。其中，电力是人类利用二次能源最重要的形式，可以说没有电，就没有现代文明。如今，核电作为核能和平利用的最主要的形式，与火电、水电并称为世界三大电力供应支柱。目前核能发电约占全世界总发电量16%，火电占64%（其中煤炭发电占39%，天然气发电占15%，石油发电占10%），水电占19%，其他发电形式占1%。各国核电装机容量的多少，很大程度上反映了各国经济、工业和科技的综合实力和水平。



世界电力构成图

1.2 世界核电发展现状

世界核电发展情况

煤炭、石油、天然气属于不可再生能源，根据世界各国专家的预测，按照目前人类消耗化石燃料的速度，地球上的石油和天然气资源只能继续供应几十年，煤炭资源稍微长一点，但也只能再供应一两百年。水力属于可再生能源，但目前继续开发的潜力不大。而太阳能、风能、地热能和生物质能都有其内在的缺点和局限性，大规模推广使用并不现实，只有核能是最现实的，可大规模利用的能源。

根据世界核协会的相关统计，截至2011年3月，世界上共有443台运行核电机组，装机容量37832.4万千瓦；在建63台，装机容量约6545.4万千瓦。

世界核电机组情况

国 家 或地区	2011年在运核电机组		2011年在建核电机组	
	数量	总装机容量 (万千瓦)	数量	总装机容量 (万千瓦)
阿根廷	2	93.5	1	74.5
亚美尼亚	1	37.6	0	0
比利时	7	594.3	0	0
巴西	2	190.1	1	140.5
保加利亚	2	190.6	0	0
加拿大	18	1267.9	2	150.0
中国大陆	13	1080.8	28	3087.0
中国台湾	6	492.7	2	270.0
捷克	6	372.2	0	0
芬兰	4	272.1	1	170.0
法国	58	6313.0	1	172.0
德国	17	2033.9	0	0
匈牙利	4	188.0	0	0
印度	20	438.5	5	390.0
伊朗	0	0	1	100.0
日本	55	4734.8	2	275.6
韩国	21	1867.5	5	580.0
立陶宛	0	0	0	0
墨西哥	2	160.0	0	0
荷兰	1	48.5	0	0
巴基斯坦	2	40.0	1	30.0
罗马尼亚	2	131.0	0	0
俄罗斯	32	2308.4	10	896.0
斯洛伐克	4	181.6	2	88.0
斯洛文尼亚	1	69.6	0	0
南非	2	180.0	0	0
西班牙	8	744.8	0	0
瑞典	10	939.9	0	0
瑞士	5	325.2	0	0
乌克兰	15	1316.8	0	0
英国	19	1096.2	0	0
美国	104	10122.9	1	121.8
合计	443	37832.4	63	6545.4

核电在世界电力供应中约占16%。美国、法国和日本三国的核电装机容量占全世界核电装机容量的57%。有15个国家核能发电超过其本国总发电量的四分之一。

日本核电发展情况

日本是仅次于美国、法国的世界第三核电大国。2010年，日本核电发电量约占全国总发电量的三分之一。截至2011年3月10日，日本核电反应堆情况：18座核电站55台核电机组运行，总装机容量4734.8万千瓦，其中沸水堆30台，压水堆24台，快堆1台（文殊核电站，于2010年5月重新启动，现又停堆检修）；2台反应堆（沸水堆）在建，总装机容量275.6万千瓦。目前，日本受9.0级大地震和海啸影响发生核泄漏的为福岛第一核电站。



日本核电站分布图

受地震影响的福岛第一核电站的基本情况

反应堆		类型	额定功率 (万千瓦)	安全壳 设计	运营商/ 供应商	商业运行时间
福 岛 第 一 核 电 站	1	BWR-3	46.0	马克Ⅰ结构	东京/通用电气	1971-03
	2	BWR-4	78.4	马克Ⅱ结构	东京/通用电气	1974-07
	3	BWR-4	78.4	马克Ⅱ结构	东京/东芝	1976-03
	4	BWR-4	78.4	马克Ⅱ结构	东京/日立	1978-10
	5	BWR-4	78.4	马克Ⅱ结构	东京/东芝	1978-04
	6	BWR-5	110.0	马克Ⅲ结构	东京/通用电气	1979-10

1.3 我国核电的发展现状^①

我国核电发展情况

截至2011年3月底,我国已有6座核电站13台机组投入商业运行,装机容量为1080.8万千瓦;正在建造的共28台机组,装机容量为3087万千瓦。我国已成为世界在建核电机组规模最大的国家。

我国已商业运行的核电站情况

核电站名称		堆型	额定功率 (万千瓦)	开工日期	首次并网日期	商业运行日期
秦山核电站		压水堆	31	1985-03-20	1991-12-15	1994-04-01
大亚湾核电站	1号机组	压水堆	2 × 98.4	1987-08-07	1993-08-31	1994-02-01
	2号机组			1988-04-07	1994-02-07	1994-05-06
秦山第二核电站	1号机组	压水堆	3 × 65	1996-06-02	2002-02-06	2002-04-15
	2号机组			1997-04-01	2004-03-11	2004-05-03
	3号机组			2006-04-28	2010-08-01	2010-10-21
岭澳核电站	1号机组	压水堆	99	1997-05-15	2002-02-26	2002-05-28
	2号机组		99	1997-11-28	2002-09-14	2003-01-08
	3号机组		108	2005-12-15	2010-07-15	2010-09-20
秦山第三核电站	1号机组	重水堆	2 × 70	1998-06-08	2002-11-19	2002-12-31
	2号机组			1998-09-25	2003-06-12	2003-07-24
田湾核电站	1号机组	压水堆	2 × 106	1999-10-20	2006-05-12	2007-05-17
	2号机组			2000-09-20	2007-05-14	2007-08-16
合 计			1080.8			

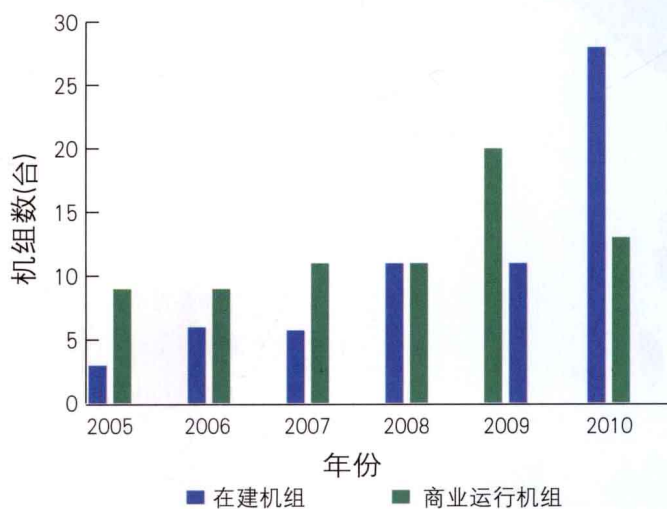
^① 不包括我国台湾省核电情况。

我国已开工建造的核电站情况

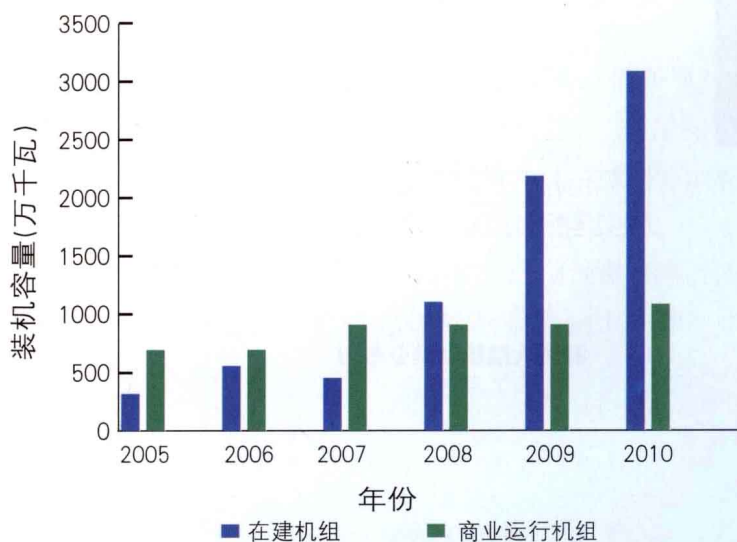
核电站名称		堆型	额定功率 (万千瓦)	开工日期
岭澳核电站	4号机组	压水堆	108	2006-06-15
秦山第二核电站	4号机组	压水堆	65	2007-01-28
红沿河核电站	1号机组	压水堆	4 × 108	2007-08-18
	2号机组			2008-03-28
	3号机组			2009-03-07
	4号机组			2009-08-15
宁德核电站	1号机组	压水堆	4 × 108	2008-02-18
	2号机组			2008-11-12
	3号机组			2010-01-08
	4号机组			2010-09-29
福清核电站	1号机组	压水堆	3 × 108	2008-11-21
	2号机组			2009-06-17
	3号机组			2010-12-31
阳江核电站	1号机组	压水堆	3 × 108	2008-12-16
	2号机组			2009-06-04
	3号机组			2010-11-15
秦山核电站扩建项目 (方家山核电工程)	1号机组	压水堆	2 × 108	2008-12-26
	2号机组			2009-07-17
三门核电站	1号机组	压水堆	2 × 125	2009-03-29
	2号机组			2009-12-15
海阳核电站	1号机组	压水堆	2 × 125	2009-09-24
	2号机组			2010-06-21
台山核电站	1号机组	压水堆	2 × 170	2009-11-18
	2号机组			2010-04-15
昌江核电站	1号机组	压水堆	2 × 65	2010-04-25
	2号机组			2010-11-21
防城港红沙核电站	1号机组	压水堆	2 × 108	2010-07-30
	2号机组			2010-12-28
合 计			3087	

2005年至2010年年底核电机组及装机容量变化情况

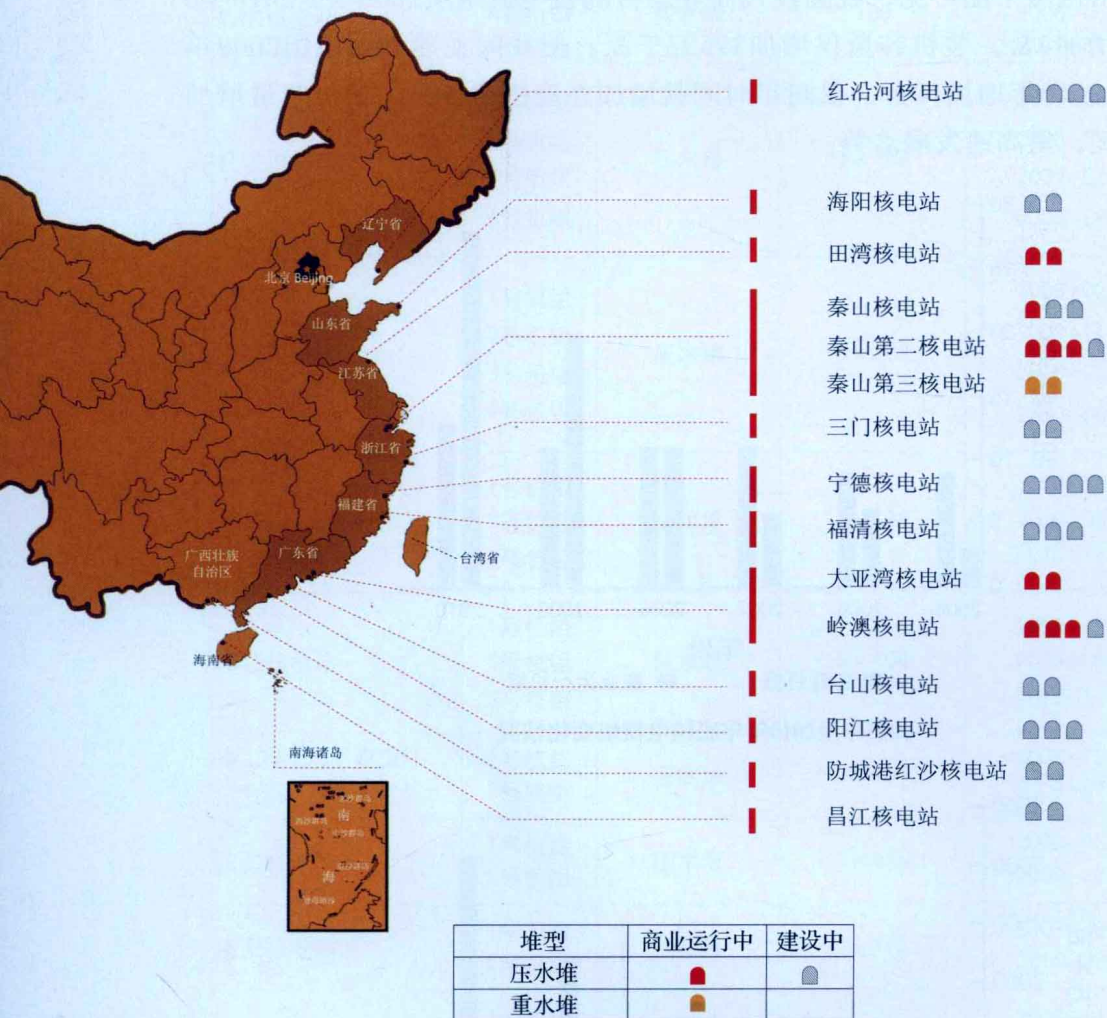
2005年至2010年我国在建和商业运行的核电机组及装机容量变化情况如图所示。由这两个图可见，我国投入商业运行的核电机组从2005年至2010年6年时间仅增加4台，装机容量仅增加395万千瓦；但我国在建核电机组2009年增加9台，2010年增加10台，仅两年时间就增加在建机组19台，装机容量增加1985万千瓦，呈高速发展态势。



2005年至2010年年底核电机组变化情况



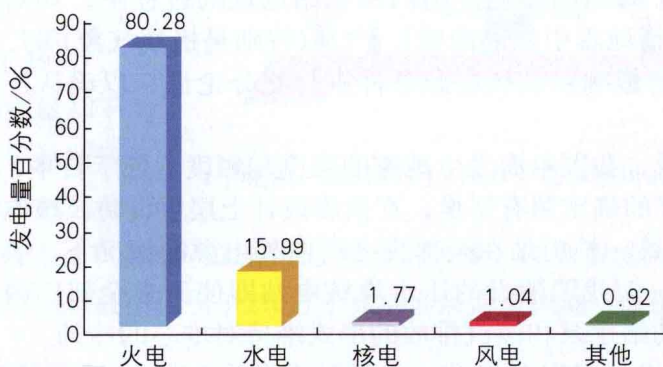
2005年至2010年年底核电装机容量变化情况



我国大陆核电站分布图

在役核电站运行情况

我国大陆在役核电机组数达到13台，装机容量达到1080.8万千瓦，占全国电力总装机容量的1.1%。2010年，我国在役核电机组继续保持安全稳定运行，年累计发电量747.4亿千瓦时，同比增加6.6%；年累计上网电量704.3亿千瓦时，同比增加6.5%。



2010年我国发电量构成图

“十一五”期间，我国核电累计发电量为3318.1亿千瓦时，累计上网电量为3129.4亿千瓦时，五年平均负荷因子达到85.7%。没有发生国际核事件分级表界定的2级和2级以上运行事件；职业人员个人剂量和集体剂量均在较低水平；核电厂放射性流出物排放指标远低于国家标准限值。

按世界核电运营者协会（WANO）11类、13项性能指标对照，在全球400余台运行机组中，我国在役核电机组总体处于中等偏上水平，其中8台机组处于世界先进行列。

1.4 与日本福岛第一核电站相比我国核电站的优势

日本福岛第一核电站建造于20世纪60年代,各台机组从70年代初陆续投入商业运行,均采用沸水堆技术。目前,我国运行的核电机组大部分是上世纪八九十年代从国外引进的第二代改进型压水堆,大亚湾核电站一号机组最早于1994年2月1日投入商业运行,秦山第二核电站三号机组最晚于2010年10月21日投入商业运行。我国所有已建和在建的核电站在建设过程中都充分汲取了1979年三哩岛事故和1986年切尔诺贝利事故的沉痛教训,核电安全性得到了持续改进。我国的核电站与日本福岛第一核电站相比主要有以下三个方面的区别:

(1) 日本处于环太平洋火山带上,是一个地震高发国家。福岛第一核电站就位于地震带上。而我国核电站建设时已充分考虑了地质结构的稳定性要求,同时考虑了海啸的影响。国内核电站选址的过程中,均对厂址的地震、地质、水文(包括地震引发的海啸)、气象(特别是极端气象)等厂址自然条件、外部人为事件的影响以及核应急条件进行充分论证,以确认厂址适宜建设核电站。

从历史上看,我国沿海发生地震的强度和频度远低于日本,对于厂址地震和设计地震水平的确定留有裕量,在抗震设计上层层设防,核电站是安全的。

(2) 福岛第一核电站在全部失去厂内外电源的情况下,就会失去堆芯冷却的全部功能。而我国建设的压水堆核电站即使失去全部厂内外电源,也能通过自带的气动给水泵和蒸汽排放的形式维持对堆芯的冷却。

(3) 压水堆技术安全壳设计有氢气消除系统和喷淋冷却降压系统,而福岛第一核电站的内层安全壳没有氢气消除系统和喷淋冷却降压系统,此次氢气爆炸与此设计上的不足有着直接关系。而针对可能出现的氢气爆炸情况,我国核电站均设置了多种可靠的监测方式监测主系统中的氢气浓度,并通过氢气复合器和氢气点火器等专设安全设施,可以控制事故情况下氢气水平,避免其浓度的上升,防止出现氢气爆炸的情况。此外,福岛第一核电站的安全壳容量与我国核电站的安全壳相比要小得多,承受放射性物质释放的能力也要小得多。

日本福岛第一核电站发生的核泄漏事故,是继1979年美国三哩岛事故、1986年苏联切尔诺贝利事故之后,世界核工业历史上发生的最严重的核事故。核安全再次引起全世界的广泛关注,将促进各国核电同行加强合作和交流。我国政府高度重视核安全工作,核电界也一定会认真汲取日本福岛第一核电站事故的经验教训,针对薄弱环节采取有力措施,进一步提高安全意识、质量意识和风险意识,更加注重提升应对自然灾害的能力,更加注重对核安全的管理监督,更加注重对严重事故的预防,以最先进的安全标准确保在建核电站的建设质量,确保已建核电站的安全运行。

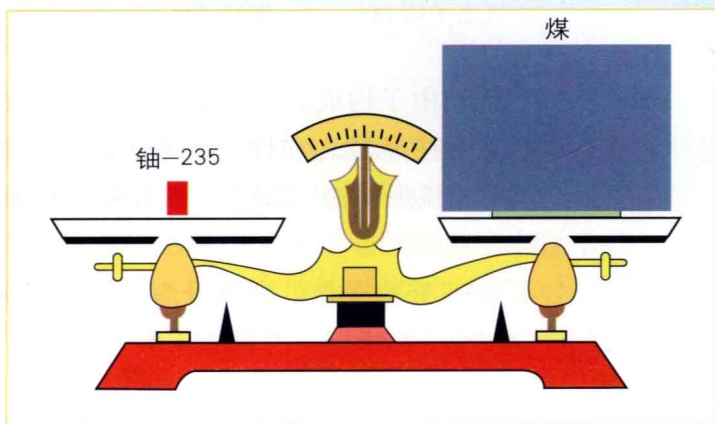
2· 核能和核电基本知识

2.1 核能原理

核能俗称原子能，它是指原子核中的核子重新分配时释放出来的能量。可以大规模应用的核能分两类：一类称裂变能；另一类称聚变能。

别看原子核小，它内部蕴藏的能量却不小。例如，核电站所用的核燃料中的有效成分

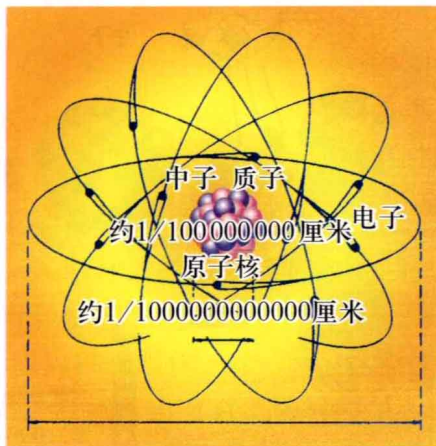
是铀-235，如果让1千克铀-235的原子核全部裂变，即分裂成两个质量轻一些的原子核，则它可以释放出相当于270万千克标准煤完全燃烧所放出的能量。

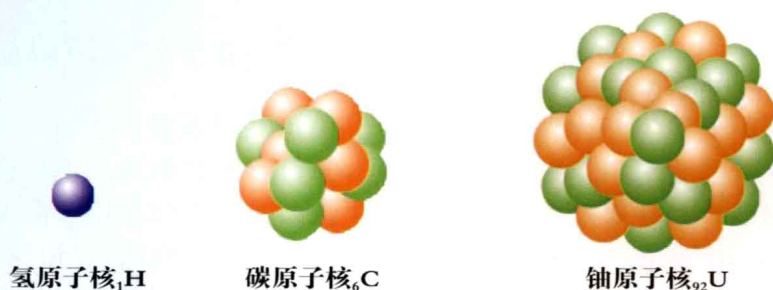


1千克铀-235相当于270万千克标准煤的能量示意图

原子和原子核

世界上一切物质都由元素构成。天然存在的元素有92种，人工制造的元素有20余种。任何元素都由原子构成，原子由带正电的原子核和围绕它高速旋转的带负电的电子构成。50万个原子排列起来相当于一根头发的直径。

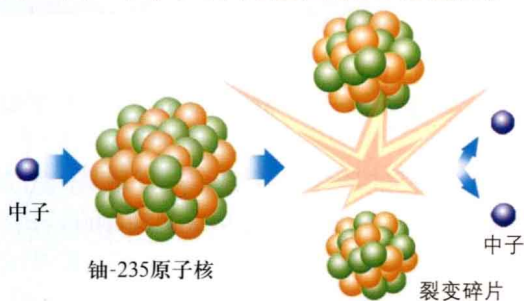




原子核由质子和中子构成。质子数（即原子序数）决定了这个原子属于何种元素。质子数和中子数之和称为该原子的质量数。最简单的氢原子核只有一个质子。常用的核燃料铀-235原子核有92个质子和143个中子。

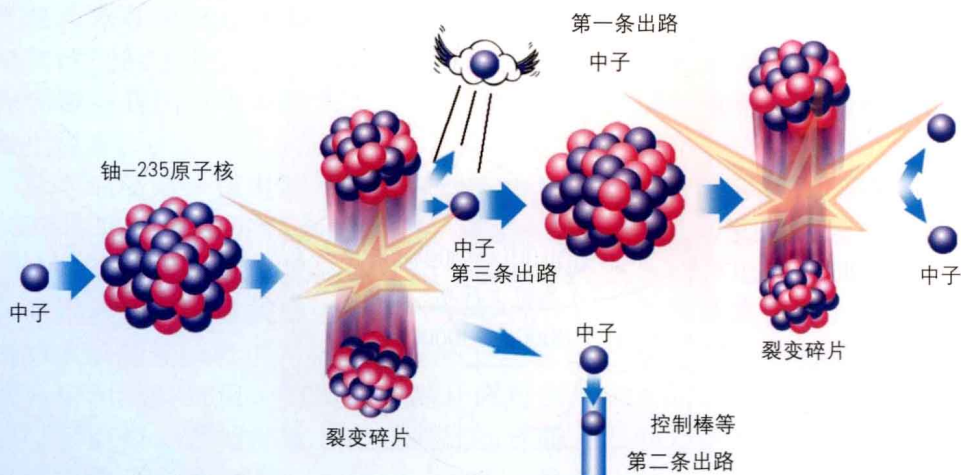
核裂变、链式反应和临界

用中子轰击铀-235原子核，它会分裂成2个（偶尔3个）较轻的原子核，同时放出2个（有时3个）中子，并释放出很大的能量。



裂变反应示意图

核裂变放出的中子有三条出路：（1）飞走；（2）被无效吸收，不引起新的裂变；（3）被铀-235原子核吸收引起新的裂变。



链式裂变反应示意图

如果第三条出路的中子数目是1，裂变反应就会继续下去，称为“链式反应”。如果大于1，反应就越来越强，如果小于1，反应就越来越弱。

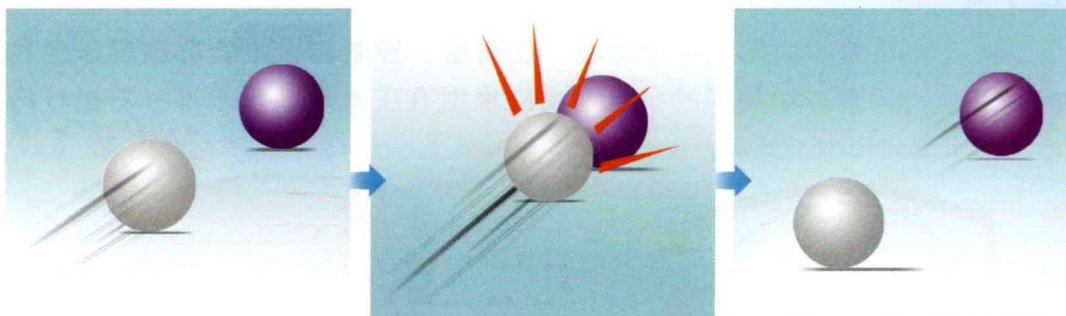
设法增减第二条出路的中子数，就可对链式反应加以控制。

要维持链式反应，第一条出路的中子数不能太多，为此，按一定比例和一定布置的裂变物质和其他物质只有达到某个体积时，才有可能维持链式反应，这个体积称为“临界体积”，其中所含的裂变物质的质量称为“临界质量”。

中子的慢化和吸收

裂变产生的中子速度高达光速的 $1/10$ 。为了使它易于被铀-235原子核吸收，必须将它的速度减到2200米/秒左右。中子慢化过程就像台球碰撞一样，当白球（中子）与质量相近的色球相撞时，速度就会立即慢下来。这些色球就像氢、氘、铍、碳的原子核，因此合适的慢化剂是轻水、重水、铍、石墨等。

为了改变第二条出路的中子数，要用吸收中子能力大的材料，如镉（Cd）、硼（B）和铪（Hf）等。它们是压水堆内常用的控制材料。



两个台球的碰撞过程示意图

2.2 核反应堆

世界上第一座反应堆

1942年，以费米为首的一批科学家在美国建成了世界上第一座反应堆，首次实现了人类历史上铀核的可控自持链式裂变反应。核反应堆是使核能以可控方式释放的装置。人们建造核裂变反应堆的目的有2个：（1）把它当作一个“中子源”，利用裂变产生的大量中子以生产军用与民用同位素，或开展科学研究及实验；（2）将它当作一个“热源”，利用核反应释放的热量以供热、发电或提供动力。当然，也有将上述目的集于一体的反应堆。