



中国实验快堆系列丛书

快堆物理基础

徐 铎 主编
李泽华 编著

中国原子能出版传媒有限公司



中国实验快堆系列丛书

- 快堆概论
- 快堆物理基础
- 快堆热工流体力学
- 快堆本体及燃料操作系统
- 快堆主热传输系统及辅助系统
- 钠工艺基础
- 快堆蒸汽动力转换系统
- 快堆控制与保护
- 快堆电气系统与设备
- 快堆辐射防护
- 快堆材料
- 快堆通用机械设备
- 快堆安全分析
- 快堆运行

责任编辑：侯草方
封面设计：崔 彤

ISBN 978-7-5022-5190-1



9 787502 251901 >

定价：45.00 元

图书在版编目(CIP)数据

快堆物理基础 / 李泽华编著. —北京:中国原子能出版
传媒有限公司, 2011. 4
(中国实验快堆系列丛书 / 徐铄主编)
ISBN 978-7-5022-5190-1

I. ①快… II. ①李… III. ①快堆—核物理学
IV. ①TL43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037073 号

内 容 简 介

本书是根据《中国实验快堆基础理论培训教材》中的反应堆物理教材大纲编写的,在介绍热中子反应堆物理的基础上,增加了快中子反应堆的特点,同时介绍了中国实验快堆 CEFR 的物理特性。在内容选择和安排上,力求做到由浅入深,浅显易懂,避免艰深的理论和繁杂的公式的推导,以便读者理解和掌握方法和实质。本书特为即将从事快中子反应堆工作的人员基础理论培训所编写,同时也适用于具有大专文化程度及以上的读者和其他感兴趣的读者阅读。

快堆物理基础

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 侯茸方
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 10 字 数 245 千字
版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5190-1 定 价 45.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

总 序

为了裂变核能的可持续应用,我国的基本战略是压水堆—快堆的匹配发展。快中子堆(简称快堆)是主要以平均中子能量比压水堆的热中子高百万倍的 $0.08\sim 0.1$ MeV 的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是,快堆核电站运行时,新产生的易裂变核燃料钚多于消耗掉的钚,即增殖比大于 1,易裂变核燃料得到增殖,因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变且天然丰度占 99.2% 以上的铀-238。快堆的乏燃料经后处理,钚返回堆内再烧,多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并无限次循环则对铀资源的利用率可从单单发展压水堆的 1% 左右提高到 60%~70%。由于利用率的提高,更贫的铀矿也值得开采,这样世界可采铀资源将增千倍。

在热中子反应堆运行时,会产生长寿命次量锕系核素(MA),其产量约为所产工业钚的 1/10。锕系核素需要衰变三四百万年才能将其放射性毒性降到天然铀的水平。但这些核素在快中子场中可以裂变成一般裂变产物,因此,可用快中子焚烧堆将它们裂变掉,获得裂变能,达到变害为利,减少地质贮存的环境风险。

世界上快堆技术的发展已超过半个世纪,发展增殖快堆最适合的冷却剂是液态金属钠,这是所有快堆国家审慎选择的结果。

钠冷快堆是当前唯一现实的增殖堆,在闭式核燃料循环的支持下,可使我国核能实现长期可持续地安全供应。

钠冷快堆在我国是全新的核电工程。前核工业部 20 世纪 60 年代中后期开始组织钠冷快堆技术的基础研究,1986 年快堆技术发展纳入国家“八六三”高技术计划后,1988—1993 年进行了以实验快堆为目标的应用基础研究,1992 年 3 月国务院批准了建造 65 MW 热功率 20 MW 电功率实验快堆的目标,该堆于 2000 年开始建造。

在核工业研究生部的组织下,我们聘请了从事中国实验快堆设计及有丰富专业知识和经验的各专业专家编写了这部中国实验快堆系列丛书,包括如下 14 篇:

- 1 快堆概论
- 2 快堆物理基础
- 3 快堆热工流体力学

- 4 快堆本体及燃料操作系统
- 5 快堆主热传输系统及辅助系统
- 6 钠工艺基础
- 7 快堆蒸汽动力转换系统
- 8 快堆控制与保护
- 9 快堆电气系统与设备
- 10 快堆辐射防护
- 11 快堆材料
- 12 快堆通用机械设备
- 13 快堆安全分析
- 14 快堆运行

各篇编者多从本专业物理原理、尤其是从钠冷快堆独有的特征出发,结合中国实验快堆的设计成果深入浅出地编写成册,因此既适于大学本科毕业的主控室操纵人员培训也适于快堆高级管理人员学习快堆知识,也可供一般操作人员培训参考。

我国快堆工程分三步发展,各阶段目标具有主要技术选择的一致性。本丛书针对性强,因此对新参与我国后续的示范快堆和大型高增殖快堆的设计者们也是一种实用的入门教材。

这是我国钠冷快堆首部运行操作人员的培训丛书,由于经验不足,疏漏和错误在所难免,敬请各位专家、使用者们不吝指正。

徐 练

2011 年 1 月 3 日

前 言

核反应堆是利用易裂变物质使之发生可控自持链式反应的一种装置,它是核电厂产生热能的主要设备。它凝聚了多学科的综合性科学知识。因此,要想掌握反应堆的基本知识,就必须学习反应堆基础理论。

本书是根据《中国实验快堆基础理论培训教材》中的反应堆物理教材大纲编写的。编写时以编者在中国实验快堆操纵员基础理论培训班上的讲稿为基础,加以补充而成。

由于快中子反应堆物理的参考书不多,因此本书在热中子反应堆物理的基础上,增加了快中子反应堆的特点,同时介绍了中国实验快堆(CEFR)的物理特性。CEFR已于2010年7月达到首次临界,物理启动试验中的特性参数与设计参数能很好地吻合。

本书特为即将从事快中子反应堆工作的人员基础理论培训所编写。同时也适用于具有大专文化程度及以上的读者和其他感兴趣的读者阅读。

在编写时,尽量从原理上着重讲清概念,再逐步将这些基本概念提高,直到能实际运用于核反应堆的设计和运行。在内容选择和安排上,力求做到由浅入深,浅显易懂,避免艰深的理论和繁杂的公式的推导,以便读者理解和掌握方法的实质。

感谢田和春研究员在繁忙的工作中对本文进行了详细的审校,对本书提出了中肯的意见,使本书增色不少。

限于水平,加之时间仓促,书中难免有片面、不妥,甚至谬误之处,敬请读者批评指正。

李泽华

2011年1月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 核能	(1)
1.1.1 利用核能的优点	(2)
1.1.2 快中子增殖堆在核能中的地位	(3)
1.1.3 我国核电的发展与展望	(4)
1.2 反应堆	(6)
1.2.1 按反应堆的用途分类	(6)
1.2.2 按冷却剂类型分类	(6)
1.2.3 按引起裂变的中子能量分类	(9)
1.3 快中子反应堆的增殖	(9)
1.3.1 转换链	(9)
1.3.2 转换比和增殖比	(10)
1.3.3 倍增时间(RDT)	(11)
1.3.4 堆芯和转换区的布置	(12)
1.3.5 CEFr 反应堆基本特征	(12)
1.4 快中子反应堆的发展概况	(12)
1.4.1 美国	(12)
1.4.2 俄罗斯	(13)
1.4.3 法国	(13)
1.4.4 英国	(14)
1.4.5 德国	(14)
1.4.6 日本	(14)
1.4.7 意大利、比利时、荷兰和印度	(15)
1.4.8 中国快堆发展概况	(15)
第 2 章 原子核物理基础和中子物理学	(16)
2.1 物质的组成	(16)
2.1.1 原子核的组成	(16)
2.1.2 同位素	(17)
2.2 核衰变	(18)
2.2.1 核力	(18)
2.2.2 衰变类型	(19)
2.2.3 衰变规律	(20)
2.3 质量和能量的关系	(22)
2.3.1 质量亏损	(22)

2.3.2	质能定律	(23)
2.3.3	比结合能曲线	(23)
2.3.4	原子核的稳定性与核能	(23)
2.4	中子与物质的相互作用	(24)
2.4.1	概述	(24)
2.4.2	中子与物质核的相互作用机理	(26)
2.4.3	中子反应截面	(27)
2.5	核裂变反应	(30)
2.5.1	核裂变机理	(30)
2.5.2	裂变截面	(32)
2.5.3	裂变产物	(32)
2.5.4	裂变中子	(34)
2.5.5	反应堆的热功率	(36)
2.5.6	衰变热	(38)
第 3 章	反应堆稳态物理	(40)
3.1	中子链式反应	(40)
3.2	中子扩散理论	(41)
3.2.1	概述	(41)
3.2.2	斐克定律	(42)
3.2.3	中子的泄漏	(43)
3.2.4	中子扩散方程及其边界条件	(44)
3.2.5	点源产生的单速中子扩散	(45)
3.2.6	中子扩散系数和中子扩散长度	(47)
3.3	均匀裸堆的临界计算	(48)
3.3.1	单群扩散方程	(48)
3.3.2	平板裸堆	(49)
3.3.3	有限高圆柱形均匀裸堆	(50)
3.3.4	临界条件	(53)
3.3.5	中子通量密度分布不均匀系数	(56)
3.3.6	中子通量密度分布的展平	(57)
3.4	有反射层的均匀堆	(58)
3.4.1	反射层作用	(58)
3.4.2	反射层节省	(59)
3.4.3	反射层对中子通量密度分布的影响	(59)
3.5	双群扩散方程和双群临界方程	(60)
3.6	快中子反应堆的物理计算特点	(62)
3.6.1	数据库	(62)
3.6.2	反应堆的多群计算	(63)
3.6.3	多群中子扩散方程	(64)

3.6.4	群常数	(65)
3.6.5	扩散方程的解法	(65)
3.6.6	CEFR 反应堆稳态物理特性	(66)
3.7	输运理论	(68)
3.7.1	输运方程	(68)
3.7.2	输运方程的求解	(68)
第 4 章	反应堆动力学	(70)
4.1	中子动力学基础	(70)
4.1.1	不计缓发中子时的中子动力学	(70)
4.1.2	缓发中子效应	(72)
4.1.3	反应性的定义和单位	(73)
4.1.4	反应堆周期	(74)
4.2	点堆动力学	(76)
4.2.1	基本方程	(76)
4.2.2	方程的讨论	(77)
4.3	小反应性阶跃变化时点堆动力学特征	(78)
4.3.1	有外源时的稳定态	(78)
4.3.2	小反应性阶跃变化时的中子密度响应(多组缓发中子)	(81)
4.3.3	倒时方程	(84)
4.3.4	瞬发临界	(84)
4.4	动力学方程的近似解法	(85)
4.4.1	单组缓发中子模型	(85)
4.4.2	常源近似	(89)
4.4.3	瞬跳近似	(90)
4.5	反应性反馈	(91)
4.6	CEFR 反应堆中子动力学特点	(91)
第 5 章	反应性的变化和控制	(94)
5.1	反应性温度效应	(94)
5.1.1	反应性温度系数及其对反应堆稳定性的影响	(94)
5.1.2	堆芯几何尺寸变化引起的反应性变化	(96)
5.1.3	钠密度变化引起的反应性效应	(98)
5.1.4	Doppler 效应	(99)
5.2	反应性功率效应	(101)
5.2.1	钠密度变化引起的反应性效应	(101)
5.2.2	钠体积份额变化	(101)
5.2.3	组件的膨胀引起的反应性效应	(102)
5.2.4	燃料组件弯曲引起的反应性效应	(102)
5.2.5	Doppler 效应	(103)
5.3	失钠反应性	(104)

5.4	燃料的燃耗效应	(104)
5.4.1	物理过程	(104)
5.4.2	燃耗深度	(105)
5.4.3	反应性随燃耗深度的变化	(107)
5.4.4	转换比	(108)
5.4.5	裂变产物的中毒	(108)
5.5	反应性控制	(108)
5.5.1	反应性控制任务	(108)
5.5.2	反应性控制中所用的几个物理量	(109)
5.5.3	反应性控制原理	(109)
5.5.4	控制棒控制特点	(110)
5.5.5	控制棒材料	(110)
5.5.6	控制棒价值	(111)
5.6	中国实验快堆(CEFR)控制棒价值及其安全评估	(113)
5.6.1	控制棒布置	(113)
5.6.2	控制棒价值	(114)
5.6.3	反应性平衡	(115)
5.6.4	符合安全要求	(116)
第6章	堆内核燃料管理	(117)
6.1	核燃料循环概述	(117)
6.2	堆芯燃料管理	(119)
6.2.1	概述	(119)
6.2.2	换料方式概述	(119)
6.2.3	停堆装料换料布置方式概述	(120)
6.3	CEFR 反应堆装换料方案	(123)
6.3.1	平衡态装换料	(123)
6.3.2	堆芯向平衡态过渡	(125)
6.4	堆芯装换料的最佳化研究	(129)
第7章	快中子反应堆物理启动	(131)
7.1	目的和任务	(131)
7.2	法规要求	(132)
7.3	临界试验	(132)
7.3.1	原理与方法	(132)
7.3.2	临界点的选取	(134)
7.4	装料前的准备	(135)
7.5	装料的方法和原则	(135)
7.6	分批装料和外推	(136)
7.6.1	装料方案	(136)
7.6.2	计数率倒数及外推临界装载	(138)

7.6.3 堆芯装载与反应性的关系	(138)
7.7 堆芯装料的控制	(139)
7.8 装料过程中的监测	(139)
7.9 临界试验中的安全要求	(139)
附录	(141)
附录 A 物理常数	(141)
附录 B 换算因子	(141)
附录 C 能群结构	(142)
附录 D 一些有用的数学公式	(143)
附录 E 贝塞尔函数	(144)
参考文献	(147)

第1章 绪论

1.1 核能

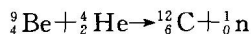
随着人类社会的不断进步,世界能量消耗的增长也不断加快。一方面,随着生活水平的提高,人均对能量的消耗也越来越高;另一方面,世界总人口还在不断地增加。更主要的是在工业、农业、交通运输方面按每人平均所消耗的能量增加了。世界上有些国家和地区因能源不足而延缓了经济发展的例子很多。

核裂变现象的发现表明,核能时代开始了。核能以它本身的特点越来越得到人类的重视。核能,最初由于人们对此物理现象的不确切了解,称为原子能。实际上它是由于原子核内部发生裂变反应或聚变反应而产生的巨大的能量。

目前在反应堆中,用不带电的粒子(中子)去轰击靶核 ^{235}U 使之裂变从而释放出大量的核能。但核能的产生并非容易,因为原子核很小,又带正电,击开它并非易事。

早期人们一直是设想用加速的带电粒子作为轰击原子核的炮弹。为了使原子核分裂,曾设计了大型静电加速器和回旋加速器,通过这些设备甚至可以把带电粒子加速到近千万电子伏,但仍然很难击开原子核,成千上万发的炮弹很可能只有一发炮弹能击中原子核。如同爱因斯坦所说,“我们好比是一些蹩脚的射手,在黑暗的郊外打鸟,那里的鸟又非常少”。

1932年查德威克(Chadwick)等人发现了中子,可用下式表明。



中子不带电荷,与原子核之间没有库仑力的相互作用,容易接近原子核而引起核反应。中子的发现开创了核物理学的新纪元,也为重核裂变提供了强有力的“炮弹”。

1938年哈恩(O. Hahn)和斯特拉斯曼(F. Strassmann)用放射化学的方法发现和证实了 ^{235}U 在中子的轰击下发生裂变的现象,但当时把放出的新的中子给忽略了。

后来,许多科学家利用各种方法(如电离室、云雾室等)来证明中子轰击铀核后,铀核分裂成2个质量近似相等的碎片,同时放出2~3个的次级中子,还释放出大量能量和射线。1946年钱三强、何泽慧夫妇发现了铀核在中子的轰击下有时会分裂成3块或4块,但这种机会要小得多,这种分裂现象一般称为三分裂或四分裂。

1942年费密(Fermi)在美国芝加哥大学建成世界上第一座天然铀石墨热中子反应堆CP-1,用了40 t天然铀(其中6 t金属铀),385 t石墨,2 000根铀棒组成的 $10.5\text{ cm} \times 10.5\text{ cm} \times 42\text{ cm}$ 的栅格,验证了核反应堆的基本原理,宣布世界进入现代科学巨大潜力的“原子时代”。

1951年12月20日钠化钾冷却实验快堆EBR-I首次发电点亮4个灯泡(热功率1.2 MW,电功率200 kW)则是理论指导实践的范例与核能成功跻身能源行列之光,是核能应用中第一座快中子试验性核电站。

1956年5月第一座气冷堆核能厂Carder Hall在英国建造完成,首次临界,10月商业运行。

1957 年,美国 Shippingport 压水堆核电厂运转并发电。

1.1.1 利用核能的优点

一个重原子核在中子的轰击下,分裂成 2 个(有时是 3 个)中等质量的原子核,同时释放出巨大能量。2 个轻原子核聚合成 1 个中等质量的原子核的时候,也释放出巨大能量。这种由于原子核内部结构组成的变化而释放出来的能量称为核能,这些能量早期也称为原子能。原子弹和氢弹爆炸时释放的能量是非受控的核裂变和核聚变反应的结果。目前,人类尚未掌握受控的核聚变。因此,通常所说的核能(或原子能)是指在核反应堆中由受控核裂变链式反应产生的能量。

核电厂中产生的能量是由于在反应堆装置中,靶核 ^{235}U 在中子的轰击下,产生裂变反应同时释放出大量的能量。那么核能有哪些特点呢?

1. 能值高

核能的能值高,1 kg 铀全部裂变所释放的裂变能,大约与 2 700 t 煤或 2 000 t 石油完全燃烧产生的能量相当。煤和石油的发电是利用物质的化学反应,而核能的释放是由于原子核的内能变化而产生的能量。特别是在煤资源、水力资源缺乏的地区,如果用核能来发电,将是很适宜的方案。世界上很多国家纷纷发展核能动力,在这些国家和地区中,核动力在本国或本地区总动力容量所占的份额各有不同,多的高达 85% 以上,低的则占 0.2% 左右。截至 2007 年年底,中国的核动力占国内总动力容量的 2.3%。

2. 储藏量丰富

核能利用的发展使得核燃料的资源愈来愈丰富,从最初只能利用 ^{235}U ,到现在 ^{238}U (在快中子增殖反应堆中),而这些同位素的矿藏量也比较丰富。

聚变核反应的原料是氘和氚。在海水中氘所蕴含的能量储藏量丰富广泛。如果氘和氚聚变核能的发展研究完成时,人类再也不会为能源匮乏而发愁了。

目前能源的主要来源是化石燃料,也就是煤、天然气和石油,以及水力。但露天采矿和烧煤对地表的破坏和对环境的污染很严重。更主要的是煤和石油还能生产化学制品(包括药品、染料、纤维、橡胶和塑料等)提供基本的原料,从长远看,将化石燃料用于原料比用作能源可能更有价值。而水力资源并不是任何地区都有的,且往往是缺少水力资源的大城市、沿海城市却需要更多的电力。

3. 价格具有竞争力

随着核技术的不断完善,核能已被公认为一种价格上能和其他能源相竞争的发电用能源。1998 年,美国核电每度电的电价低于煤电 1.83 美分,而 1999 年则为 2.07 美分。截至 2002 年年底,芬兰每度电的电价分别为,核电是 2.18 欧分,煤电是 2.43 欧分,天然气发电是 2.6 欧分。显然,核电电价要低于常规电站的电价。

还应指出,稳定的核电电价与原材料价格有密切的关系。核电燃料费仅占电价的 25% 左右(天然气燃料费用占电价的 60%~70%),其中只有 5% 取决于外部因素(一方面,天然铀供应采取多元化措施,另一方面,多数产铀国国内政治稳定)。

4. 对环境污染小

核能对大自然的环境污染小。我国能源消费结构中,煤和石油的消费占到 96.4% (1997 年 6 月数据)。煤和石油的燃烧造成严重的环境污染,恶化了人类的生存条件,危及

子孙后代。我国许多城市的污染物浓度已达世界前列。

核电厂不排放二氧化碳、二氧化硫和氮的氧化物,不会造成温室效应和酸雨,从而保护了人类赖以生存的生态环境。

当前作为核能利用的主要装置是核电厂。由于安全措施严格,运行经验丰富,因而发生事故的概率很小。为了做到安全可靠,万无一失,并防止事故引起放射性扩散,核电厂中设置了三道放射性屏障和应急事故处理系统。图 1-1 为压水堆核电厂放射性三道屏障示意图。第一道屏障是核燃料元件棒包壳,它能承受约 200 atm 的压力。放射性裂变产物被限制在包壳管内;第二道屏障是反应堆压力容器和一回路耐压管道。即使燃料元件包壳破损,其放射性物质也只能外漏到一回路中;第三道屏障是安全壳,它将反应堆及一回路系统的主要设备密封在安全壳内。因而,即使第二道屏障破损,其放射性物质也只能密封在安全壳内。也有人将堆芯芯块称为第一道屏障,反应堆运行时放射性裂变产物保持在芯块内,这样反应堆的实体屏障共有四道。

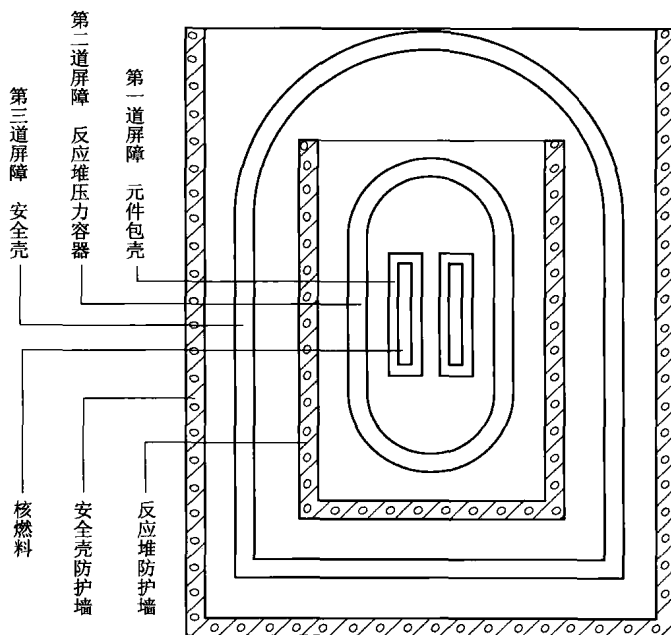


图 1-1 压水堆放射性屏障

由于核能的能值高,烧过的燃料还能进行后处理再做成新的燃料。特别是快中子增殖反应堆的出现,它能对燃料进行增殖,能把不能裂变的 ^{238}U 转变成核燃料 ^{239}Pu ,大大地增加了对铀资源的利用。

现代人类所能利用的能源,不外乎是水力、化石燃料、核能以及太阳能、风力、潮汐能、地热能等。水力能源虽有一定的经济价值,但往往受到地理条件的限制,建造费用庞大,电力输送费用高。至于太阳能、潮汐能、风力及地热发电,目前虽然经过研究试验已开始应用,但要大规模地利用及开发却受到很多条件的限制。因此,核能是当前比较有现实意义的能源。

1.1.2 快中子增殖堆在核能中的地位

快中子反应堆是利用快中子引起重核的链式裂变反应的装置。

快中子反应堆能增殖核燃料。在快中子反应堆中,一个中子被燃料核吸收除引起燃料核的裂变产生大量的能量外,还能产生 2~3 次级中子(η)。快中子反应堆的 η 大于热中子反应堆的 η 。在快中子反应堆中,除了应有一个次级中子用来维持裂变链以外,还必须能有一个以上的中子用来将可转换核转化为易裂变核。此外,还必须考虑由于逸出反应堆系统以及结构材料与冷却剂等寄生俘获而不可避免地损失的中子。因此,对于有意义的增殖来说, η 必须显著地大于 2,例如至少为 2.15。以 ^{239}Pu 为易裂变物质的快中子反应堆的增殖最为有效。这就是人们主要感兴趣的快中子反应堆类型。在热中子反应堆中,看来只有用 ^{233}U 才能实现增殖,但其效率将不会很高。

转换的意义是指,可裂变材料 ^{238}U 吸收一个中子生成 ^{239}U ,由于 ^{239}U 是不稳定的核素,进行两次 β^- 衰变,最终生成易裂变核素 ^{239}Pu 。快中子反应堆的投入运行,将使铀资源的利用率由普通热中子反应堆的不足 1%,提高到 60%~70%,这将有效地防止铀资源枯竭的威胁。

快中子反应堆的另一个优点是能将长寿命的放射性重同位素(例如锕系元素)嬗变为短寿命的同位素,利于核废料的储存,这对核工业的发展和保护环境都是十分重要的。

目前,随着核电技术的发展,对核电的安全性、经济性和防扩散的要求越来越高。经历了核电技术的发展里程:第一代的核电解决了工程上应用;第二代核电厂主要是实现商业化、标准化、系列化、批量化,以提高经济性;第三代核电提出了下一代核电站的安全和技术要求,它包括了改革型的能动(安全系统)核电站和先进型的非能动(安全系统)核电站,并完成了全部工程论证和试验工作以及核电站的初步设计,它们将成为下一代(第三代)核电站的主力堆型;第四代核能系统将满足安全、经济、可持续发展、极少的废物生成、燃料增殖的风险低、防止核扩散等基本要求。而目前,第四代核能系统在 2002 年最终确定了 6 种核能系统作为开发重点,分别是气冷快堆系统(GFR)、铅冷快堆系统(LFR)、熔盐堆系统(MSR)、钠冷快堆系统(SFR)、超临界水冷堆系统(SCWR)、超常高温气冷堆系统(VHTR)。其中气冷快堆系统、铅冷快堆系统、钠冷快堆系统为快中子反应堆,超临界水冷堆可快中子谱设计,也就是说,6 种新型核能系统中有 3~4 个为快中子反应堆系统,见表 1-1。

表 1-1 6 种第四代核能系统

堆 型	缩 写	能 谱	燃料循环
钠冷快堆系统	SFR	快	闭式
铅冷快堆系统	LFR	快	闭式
气冷快堆系统	GFR	快	闭式
超常高温气冷堆系统	VHTR	热	一次
超临界水冷堆系统	SCWR	热和快	一次/闭式
熔盐堆系统	MSR	热	闭式

1.1.3 我国核电的发展与展望

综上所述,国家要发展,能源是头等重要的事情。实践表明,常规电站虽然能满足能源的增加,但它带给人类的却是环境的污染和人类赖以生存的生态环境的恶化。

与常规电站相比,核能有许多优点。它是一种清洁的能源,能值高,环保性能好,安全可

靠。由于用核能来代替部分煤和石油,必将使交通紧张得到缓解,节省下来的煤和石油可以为生产化学制品(包括药品、染料、纤维、橡胶和塑料等)提供基本的原料。

我国的民用核动力事业起步较晚,早期核动力仅限于军用(核潜艇)。1992年7月我国第一座核电厂(秦山一期核电厂)投产,结束了我国大陆没有民用核动力的历史,秦山一期是我国自行设计自行建造的核电厂,属于压水堆类型,电功率为300 MW。广东大亚湾核电站1号机组和2号机组相继于1994年2月和5月建成投入运行,电功率均为900 MW。秦山二期1号机组已于2002年4月投入运行,电功率为600 MW,其2号机组已于2004年5月建成投入运行。岭澳核电站1号机组已于2002年5月建成投产,电功率为1 000 MW,其2号机组已于2003年1月建成投产。电功率为1 000 MW的田湾核电站1号机组和田湾核电站2号机组分别在2007年5月和2007年8月投入运行。到2007年年底,我国大陆有6座核电厂,共11个机组,核电装机容量达到9 120 MW,约占总动力的2.3%。上述核电厂中,秦山一期、二期核电厂,大亚湾核电站、岭澳核电站和田湾核电站都属于压水堆,而秦山三期属于CANDU型的重水堆。表1-2列出了中国大陆已经建成投产、计划建造和申请报批的核电站。

表 1-2 中国大陆核电站一览

核 电 站	电功率/MW	运行时间
秦山一期	300	1992年7月
大亚湾1号机组	900	1993年
大亚湾2号机组	900	1994年
秦山二期1号机组	600	2002年2月
岭澳1号机组	1 000	2002年6月
秦山三期1号机组	700	2002年11月
岭澳2号机组	1 000	2002年12月
秦山三期2号机组	700	2003年7月
秦山二期2号机组	600	2004年5月
田湾1号机组	1 000	2006年5月
田湾2号机组	1 000	2007年7月
中国实验快堆(CEFR)	20	2010年7月
岭澳3号、4号机组	2×1 000	2010年
浙江三门	6×1 000	2014年
广东阳江	6×1 000	2010年2月, 2016年4月
福建台山 EPR	2×1 750	2013年12月, 2014年10月
山东海阳 AP1000	8×1 250	2014年2月, 2020年6月
福建宁德 CPR1000	6×1 000	2013年2月
辽宁红河沿	4×1 000	2011年
原型快堆 CFR	800	2030年