

TL271/
42

高等学校试用教材

核反应堆设计原理

(初版)

曹栋兴
王国力
赵兆颐
贾宝山

主编

编著

张敬康

徐及明

花家宏

主审

审校

原子能出版社

前 言

本书是按 1987 年原核工业部教育司规定的对高等学校教材的要求编写的，可作为核反应堆工程与安全、能源与核能利用、核能与能源工程等专业的教材，也可供核反应堆管理、设计和运行人员参考。

核能将在我国能源中占有愈来愈显著的地位。根据我国情况开发 and 设计哪几种堆型比较现实有效，这是值得分析的问题。与此同时，用于核反应堆实际开发、设计计算和审批等的步骤、方法和相应的计算程序也就具有实际意义。这本书是从实用与发展的角度编写的，其中结合实际设计过程的压水动力堆物理设计计算部分占了较大比例，其他各章虽然也是着重于实际设计和应用程序开发，但限于篇幅只能采取典型描述的方式。在堆型上重点放在我国近期主要发展的压水动力堆上。

首先，根据我国国民经济发展规划和对能源的需求情况，从资源、环境、经济力量和国内基础等方面，综合考察了从现在到下一世纪的能源供应情况，提出了可供选择的核裂变和聚变堆型的技术特征。接着，在核反应堆物理、热工水力、结构和安全分析等内容上，由浅入深介绍了设计计算方法和程序，并列出了相应的参考文献。这些程序大都是目前适用的和正在开发应用的。

在较全面地了解了核动力工程内容后，例如阅读了格拉斯登和塞桑斯基合著的《核反应堆工程》第三版，可以从本书中了解我国的情况及进一步熟悉核反应堆的设计计算。

王国力编着了第二、第三章，赵兆颐编着了第四章，贾宝山编着了第六章，曹栋兴编着了其余章节并统稿。

核工业第二研究设计院张敬康、徐及明及花家宏对本书稿进行了审校，并与作者进行过多次讨论。核工业总公司核电部贺嘉忱参加了初审。上述有关人员及俞尔俊、李冶国、贺兴章等参加了审定会，并提出了很多有益的意见，谨在此表示衷心的感谢。

限于水平，书中难免有片面、不妥，甚至是谬误之处，深望读者提出批评和改正意见。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 核能在我国能源发展中的作用	2
第三节 典型核动力堆	6
一、压水堆	9
二、重水堆	10
三、高温气冷堆	10
四、钠冷快中子堆	11
五、聚变-裂变混合堆	11
第四节 本书的内容和范围	12
参考文献	14
第二章 核反应堆设计概论	16
第一节 引言	16
第二节 堆芯设计综述	18
一、堆芯物理设计	18
二、堆芯热工水力设计	20
三、堆芯结构设计	21
四、安全评价与经济分析	23
第三节 堆芯设计准则	25
一、堆芯物理设计准则	25
二、堆芯热工设计准则	26
第四节 堆芯方案设计计算流程	27
一、堆芯总体方案设计模块	27
二、宏观群常数模块	27
三、通量-功率-反应性模块	29
四、热工-水力模块	29
五、控制-调节模块	29
六、燃耗模块	30

七、燃耗经济分析模块	30
第五节 堆芯主要参数的确定	31
一、堆芯方案设计的任务	31
二、堆芯几何大小的确定	32
三、基本燃料栅元的确定	37
四、反应性控制设计	40
五、堆芯内燃料管理方案设计	48
六、堆芯热工参数的确定	52
参考文献	55
第三章 堆芯物理设计计算	57
第一节 堆芯物理设计计算综述	57
一、设计计算流程	57
二、设计计算的计算机程序	60
第二节 群常数的计算	61
一、引言	61
二、核截面数据库	71
三、计算少群常数的基本方法	73
四、栅元的平均少群常数计算程序 (LEOPARD)	78
五、燃料组件平均的少群常数计算	91
第三节 功率分布和反应性设计计算	96
一、引言	96
二、基本的计算理论	97
三、功率分布及不均匀系数	113
四、反应性设计计算	122
五、动态参数的计算	130
第四节 燃耗分析和堆芯燃料管理	135
一、引言	135
二、燃耗分析的基本方法	137
三、燃耗计算程序简介	146
四、燃料栅元燃耗计算	150
五、堆芯燃耗计算与燃料管理	158
参考文献	166

第四章 堆芯热工水力设计	169
第一节 引言	169
一、热工水力设计的主要任务	169
二、计算模型和数值分析方法	170
三、设计参数的选择	171
第二节 单通道模型稳态热工设计	173
一、一般步骤和方法	173
二、平均通道计算	173
三、热通道计算	177
第三节 子通道模型热工分析	181
一、引言	181
二、流体动力学方程	182
三、两相流模型	184
四、方程的求解	190
五、全堆芯分析	191
参考文献	200
第五章 核反应堆结构和燃料元件的设计	201
第一节 引言	201
第二节 典型核反应堆简述	201
一、压水堆	202
二、重水堆	208
三、高温气冷堆	208
四、钠冷快中子堆	211
五、聚变-裂变混合堆	213
第三节 结构设计简述	216
一、反应堆结构设计及其作用	216
二、反应堆结构设计要求	221
三、燃料元件的结构设计	222
四、轻水堆燃料元件设计准则和限制	224
第四节 轻水堆燃料元件简化模型程序	227
一、程序适用范围	227
二、计算步骤与公式	228

第五节 燃料元件微观模型程序	237
一、假设条件	238
二、力学方程	239
三、应力的位移解法	241
四、轴向力平衡	244
五、时间步进	246
六、芯块开裂的影响	250
第六节 高温气冷堆燃料元件	251
一、石墨包壳的辐照寿命	251
二、力学方程	252
三、有限元解法	255
参考文献	257
第六章 反应堆安全分析	259
第一节 引言	259
一、反应堆安全分析的目的	259
二、运行与事故工况的分类及其验收准则	263
第二节 安全分析模型与程序概论	270
一、核电厂系统分析模型与程序	270
二、核电厂部件分析程序	274
三、堆芯中子物理分析程序	275
四、燃料元件行为分析程序	278
五、放射性后果分析程序	278
第三节 典型安全分析程序	279
一、TRAC-PF 1 的流体动力学模型	279
二、构件热传导模型	288
三、数值处理和求解方法	292
四、系统的部件模化	300
第四节 典型事故的安全分析	302
一、压水堆系统的部件划分	302
二、压力容器内的节段划分	304
三、稳态和瞬态计算结果的分析	307
第五节 反应堆概率安全评价方法	316

一、概率安全评价的基本方法	318
二、主要研究成果及方法的局限性	325
参考文献	327
附录 A ASME 规范中的一些规定	333
附录 B 弹性力学中的基本符号与公式	337
附录 C 国际单位制 (SI)	350

第一章 绪论

第一节 引言

核能是裂变或聚变等核反应释放出来的原子核能。可控的聚变或裂变是在核反应堆内进行的，可以说人类主要是通过核反应堆利用核能的。在核反应堆内实现热中子裂变已经是成熟的技术，但核反应堆十分复杂，不同的堆型或不同的设计，其技术经济效益明显不同。另外，当今聚变研究的进展^[1]已促使人们考虑其实用的途径。聚变核反应不但资源非常丰富，而且是更安全，更先进的能源，特别是有些聚变核反应，可以不对环境产生有害影响。由此可见，目前技术上比较成熟的热中子反应堆的利用只不过是核能利用的初级阶段，要充分发挥核能的作用，核反应堆的研究设计人员仍然任重而道远。

在利用化石能源存在困难的一些地区，往往可以充分发挥核能的优势。从保护环境的角度来看，利用核能来代替化石能源，可以有效地减少排到大气中的化学燃烧产物 CO_2 、 SO_2 和 NO_x ，从而能遏制温室效应的发展和酸雨的形成。

和国民经济发展规划相适应，应该有一个能源综合发展规划。我国目前限于种种条件只能适当发展核能，但是随着时间的推进，核能的比重必将不断增长。核反应堆的设计更新，堆型更替也将随着科技的进步，向核能利用的高级阶段发展。

由于国民经济的迅速发展、人口增长和生活水平提高等因素，我国能源供应不足已持续了相当长的时间，比较明显地表现为严重缺电；能源结构也不合理。这已造成了不可低估的影响。主要影响有：

(1) 制约了国民经济的发展(每缺 1 kWh 电力造成的国民

经济损失约为电价的 20 到 100 倍)；

(2) 大量燃烧化石燃料，使一些地区环境污染超过规定标准，有的地区出现酸雨，影响生态环境；

(3) 能源严重短缺迫使一些地区森林的砍伐速度大于生长速度，造成水土流失，相应地肥料损失量大于增补量，使土地日益贫瘠化，沙化面积不断扩大，形成恶性生态循环。

另外，我国主要能源资源煤产区集中在山西、内蒙等地，运输困难，能源和环保工作者等都已逐步认识到必须开发新能源，其中主要是发展核能，以此来改善能源结构，填补能源的短缺。

第二节 核能在我国能源发展中的作用

我国缺能状况已持续了相当长的时间，目前正在积极发展常规能源，情况有所改善。但是从长远的观点看，可能的解决方案是加快核能的开发，使核能时代早日到来。届时，不但可能解决能源问题，而且也可能使生态系统、生态环境转向良性循环。

世界银行对我国 1979 年能源消费进行了统计，估计总消费量为 8.71 亿吨标煤当量，其构成列于表 1-1 中。表中的国民生产总值是市场经济国家采用的指标，对计划经济国家用国民收入。我国在进行对比时，将国民收入乘以 1.13 后相当于国民生产总值。可以看出能源消耗与国民生产总值间有一定关系，经常用能源消费弹性系数 C 来联系，它是能源消费年增长率与国民生产总值年增长率之比。一般来说，对发达国家 C 小于 1，对发展中国家 C 大于 1。表中也列出了 1980 年我国商品能源消费与一些发达国家的能源消费，以供比较。

按照我国国民经济发展规划，从 1980 年到 2000 年国民经济翻两番，到 2050 年达到一个中等发达国家的水平，到那时预计人口为 15 亿，人均国民生产总值为 4000 美元，国民生产总值将达 6 万亿美元，为 1980 年的 20 多倍。

在作为起始点的 1980 年能源消费中已缺电 17%，缺能比例

表1-1 能源消费构成

项 目	中 国		中 国	美 国	苏 联	日 本
	1979年 商 品 能 源	1979年 包括非商 品能源	1980年	1980年	1980年 (1979年)	1980年
总消费(亿吨标煤)	6.21	8.71	6.03	27.14	15.642 (14.68)	5.65
煤 %	72.6	51.8	71.8	20.5	(33.8)	15.0
油 %	20.9	14.9	21.1	45.0	(34.1)	67.7
气 %	3.1	2.2	3.1	26.8	(30.3)	6.1
水、核 %	3.4	2.4	4.0	7.7	(1.8)	10.3
柴草、小窑煤 %		28.7				
人口(亿)	9.7092		9.8255	2.2764	2.6667	1.1678
人均能耗(吨/人年)			0.6134	11.92	5.865	4.838
国民生产总值(亿美元)	2530		2703	23490	16247	10216
人均国民生产总值(美元)			275.1	10318.0	6092.5	8748.0

更大。

按照国民生产总值的增长比例，能源需求也应相应增长。考虑到我国单位产值能耗偏大可能得到的节能潜力，也考虑了为减少森林破坏等必需的能源补充，到2050年能源年总消费量将达40—50亿吨标煤当量。即使以煤为主的能源结构基本不变，按照煤的年开采量、运输能力等可能条件来计算，到时也还需要有10%—20%的能源由核能提供。从当前世界平均核发电量已达总发电量的17%看，这个比例并不高，但是对我国来说，实际上也是要努力后才能实现的。如果世界性环境保护要求（如限制CO₂量）提上日程，这个比例还得增加。如果把能源规划往21世纪下半叶延伸，一定会更明确地得到这样一个结论：必须发展核能。

煤是我国主要能源，储量占世界第三，消费量占首位。可经济开采的储量约数千万亿吨。1989年原煤产量已超过10亿吨，2000年产量估计只能达14亿吨。过量开采既不容易也不合理。另外，我国煤价偏低，煤的预处理粗糙，使用过多的地区环境污染十分严重。

我国水力资源占世界首位。水力是干净的能源，但资源分布

集中在少数地区，可以合理、安全开发的量也有限。

核能是安全、干净的能源。由于多种原因我国核电发展缓慢，到2000年投入运行的核电厂装机容量约为600万kW，都采用压水动力堆。到那时对严重缺电、能源资源不足的华东、华南和东北等地区，核电将具有较大的竞争能力。要实现核能在我国大量应用的愿望，还要解决好几方面的问题。首先是进一步提高核电的安全性和经济性。在苏联切尔诺贝利事故后，强调要提高核电厂的固有安全性方面的设计要求；在我国由于煤价明显地人为偏低，核电的经济性也被迫要求进一步改善。其次是核资源的充分利用问题，如果只发展当前燃料利用率较低的压水堆型，我国可经济开采的裂变核资源只相当几十亿吨标煤当量，对热中子堆作一定改进，可以提高一些。但到2000年我国年能耗已超过十多亿吨标煤当量。应该发展能充分利用核资源的增殖堆型，这样裂变核资源相当于千亿吨的标煤当量，和我国能经济开采的煤资源具有同一数量级。从资源来说，核裂变能就可以在相当长一段时间内起作用。其三是国家经济能力有限，要解决发展核电的资金积累问题。现在，我国用于电力的投资已达总投资的6%左右。如果采取一些有效措施降低核电成本，如实行标准化成批生产等，进一步提高核电竞争能力，到2050年使核能占总能源百分之十几是有可能的。

从世界核能发展史看，有少数国家（或地区）在完成相似的目标中，已做出了成功的先例。由表1-2可以看到，发展核电不仅是发达国家（或地区）的事情，也是发展中国家（或地区）解决能源问题的有效途径。法国是执行核电计划成功的例子，由于国家的重视与扶植，不但赶上了美、苏等国，国内核电比例已达76%，而且对外出口也很成功。我国大亚湾核电站的核岛部分就是从法国引进的。

许多国家不论国内能源资源如何，都在发展核能利用，因为这不仅是单一的能源资源问题，还有环境保护、资源保护、能源多样化等需要。

表 1-2 世界各国（或地区）已运行和在建的核电厂统计表
(至1989年6月)

序 号	国 家 (或地区)	运行的 核电厂数	总电功率 MW	运行加建造 的核电厂数	总电功率 MW
1	阿根廷	2	935	3	1627
2	比利时	7	5500	7	5500
3	巴 西	1	626	3	3084
4	保加利亚	5	2585	8	5444
5	加拿大	18	11872	22	15396
6	中 国	6 ⁺	4884	8	6984
7	古 巴			2	880
8	捷克斯洛伐克	8	3264	16	8384
9	芬 兰	4	2350	4	2350
10	法 国	54	51386	63	63378
11	民主德国 *	5	1702	11	5134
12	联邦德国 *	22	22607	24	24185
13	匈牙利	4	1655	6	3655
14	印 度	7	1374	20	6200
15	意大利	2	1120	3	1150
16	日 本	38	28198	55	44492
17	南朝鲜	8	6300	11	9120
18	墨西哥			2	1308
19	荷 兰	2	507	2	507
20	巴基斯坦	1	125	1	125
21	菲律宾			1	620
22	波 兰			8	5736
23	罗马尼亚			5	3100
24	南 非	2	1840	2	1840
25	西班牙	10	7526	17	14348
26	瑞 典	12	9667	12	9667
27	瑞 士	5	2951	5	2951
28	英 国	40	13892	41	15067
29	美 国	110	97170	125	114341
30	苏 联	47	31023	76	58273
31	南斯拉夫	1	620	1	620
	总 计	421	311681	565	435471

+ 建在台湾省。* 当时德国尚未统一。

如果当前尚未完全弄清的温室效应的成因和危害得到证实，那么要减轻这种危害，就必须由水电、核电去替代一批火电，这可能就是 21 世纪初的事情。

到 21 世纪下半叶，我国现在起作用的能源资源都会出现不同程度的短缺，那时聚变核能应该占有相当的地位。在这以前可望用更多的裂变能去替代化石能源，但长半衰期放射性废物的贮存问题解决得如何，也决定了聚变核能投入商用的进程。

从核能发展史看，要一种堆型成为商用，需要几十年的时间。虽然我国已有相应的发展计划，但发展核能利用的任务仍较艰难。现在就应明确地认真地发展三类堆型：

(1) 为使核能具有明显的竞争能力，要发展更安全和经济的成熟堆型，这就是压水堆型。它能解决近期能源，特别是电力供应短缺问题，并为解决环境和大气层保护问题作准备。

(2) 为能充分利用裂变核资源，要发展安全、经济的增殖堆型。

(3) 为在 21 世纪后半叶避免发生能源危机，从根本上解决能源和环境保护问题，应该着手开发聚变核能。现在就有条件开发既能利用聚变能，又能增殖供裂变堆用的易裂变核素的聚变-裂变混合堆。

可见，根据我国情况，并非只用一种堆型的核电厂就能实现核能利用的全部目标。先进的堆型现在尚未达到商用阶段，而可以商用的堆型并不十分完美。下一节将考察和讨论几种能在不同时期完成相应任务的实用堆型。

第三节 典型核动力堆

核反应堆的发展受很多因素的制约。从 50 年代开始到今天，国际上成熟的商用堆型主要有轻水堆、重水堆和气冷堆三大类。就是说，在某些地区和场合下，核电在经济技术指标上已具备竞争能力；相应的一套开发设计、加工制造、施工安装和调试运行

表 1-3 典型核动力堆参数

项 目	压水堆 PWR 西屋公司	沸水堆 BWR/6	高温气冷堆 HTGR	钠冷快堆 LMFBR	气冷快堆 GCFR (参考)	重水堆 PHW (CANDU)
总体参数						
电功率(MW)	1150	1200	1170	1000	1000	500
热功率(MW)	3411	3579	3000	2410	2530	1612
效率 (%)	33.7	33.5	39	39	39.5	31
燃料类型	UO ₂	UO ₂	UC + ThO ₂	PuO ₂ , UO ₂	PuO ₂ , UO ₂	UO ₂
冷却剂	H ₂ O	H ₂ O	He	Na	He	D ₂ O
慢化剂	H ₂ O	H ₂ O	C	-	-	D ₂ O
结构材料	Zr-4	Zr-4	C	不锈钢	不锈钢	Zr-4
堆芯参数						
堆芯高度(cm)	366	376	643	91	148	410
堆芯等效直径 (cm)	337	366	844	222	270	680
堆芯平均功率密度 (W/cm ³)	104	56	8.4	380	297	12.4
燃料重量(t)	90.2	138	39	19	28	80
比功率(kW/kgu)	37.8	25.9	77	126	90	20.4
燃耗(MWd/tu)	33000	27500	98000	100000	100000	10000
转换比或增殖比	0.5	0.5	0.7	1.3	1.5	0.45
燃料组件参数						
组件数目	193	732	3944	394	347	473
燃料元件排列	17×17	8×8	132根	六角形	六角形	压力管
每一组件内燃料元件数	264	63	132	217	225	28
燃料元件总数	50952	46116	35496	85464	77031	13244
燃料元件参数						
燃料元件节距 (cm)	1.25	1.62		0.725	1.14	1.65
燃料元件外径 (cm)	0.94	1.25	1.56	0.579	0.805	1.52
包壳厚度(cm)	0.0572	0.0864		0.038	0.0295	0.038
芯块直径(cm)	0.819	1.056	1.56	0.66	0.739	1.44
燃料富集度 (%)	2.1/2.6/ 3.1	2.2—2.7	93.5	10—15	10—15	天然铀
热工水力参数						
系统压力(MPa)	15.5	7.2	5.0	1.4	8.6	8.9
冷却剂流量(t/h)	62000	47000	5000	50000	10000	23900
冷却剂入口温度 (°C)	300	269	337	380	332	249

续表

项 目	压水堆 PWR 西屋公司	沸水堆 BWR/6	高温气冷堆 HTGP	钠冷快堆 LMFBR	气冷快堆 GCFR (参考)	重水堆 PHW (CANDU)
冷却剂出口温度 (°C)	332	286	755	552	642	293
平均线功率密度 (W/cm)	178	206	78.7	295	217	200
最大线功率密度 (W/cm)	426	440	229	492	390	528
最高燃料温度 (°C)	1788	1829	1410	2000	2200	1500

方法, 质量保证、安全审批等管理办法也是可行的。由于各种原因, 我国目前重点发展的堆型是轻水堆中的压水堆。表 1-3 中列举了当前世界上正在运行和建造的各种核电厂用典型堆的主要参数, 对它们的详细介绍见参考文献[2、3、4]。

由于三里岛和切尔诺贝利核电厂事故, 人们对核电厂, 主要是对相应核反应堆的安全性提出了更高的要求。分析这些事故的发生原因, 发现它们是在出现了异常工况、运行人员判断和操作严重失误、核电厂设计和维护制度上的不完善等共同作用下发生的。就是说, 原来设计指导思想和管理制度不完善。

为此, 设计者提出了新的设计指导思想和相应的改进措施。基本设想是新一代的核反应堆和相应的核电厂的安全保证, 不能主要依靠运行人员和专设安全设施的主动动作, 而要更多地依靠核反应堆以及相应核电厂本身固有安全性。与此同时, 可以省去一批专设安全设施, 简化系统、设备等, 以得到经济上的补偿, 使新一代的核反应堆以及相应核电厂向干净、安全、经济的目标前进一步。

现在已经有一批堆型是按这一指导思想设计的, 有些进行了局部的试验论证, 但都没有建成相应的原型堆。这就为各国提供了新的竞争机会。我国正在对压水堆、高温气冷堆、钠冷快堆和聚变-裂变混合堆的新一代进行开发工作。它们也是能在不同时期发挥核能作用的堆型。

一、压水堆

压水堆核电厂是世界上最多的核电厂，我国也有这方面的基础。压水堆广泛应用与常规技术相似的工艺，又有体积小、重量轻的特点，所以首先作为移动式动力堆运用于潜艇和舰船上，积累了一定的经验和具有较坚实的技术基础。

为适应新一代堆型的设计要求，世界上各主要核电厂生产国和制造商都提出了不少改进方案。美国西屋公司已经完成了先进非能动安全式压水堆 AP-600 的方案设计^[5,6]。虽然还未能全达到新一代堆型的全部设计要求，但它是在原有技术基础上的全面改进，可以直接投入商用。和目前运行的压水堆相比，在安全性、技术先进性和经济性上有明显提高，其主要改进列在表 1-4 中。

表 1-4 现行和先进压水堆核电厂比较

项 目	电厂利用 系数, %	寿命, a	低放废物, m ³ /a	剂量, 人·Sv/堆·a	建造周 期, a	发电成本 \$/kWh
现行压水堆	70	40	289—758	26	6—10	0.108
先进压水堆	87	60	71	21	4	0.065

我国也在进行相当于先进压水堆 AC-600 的设计^[7]。

按照新一代核反应堆的设计思想，瑞典推出了按过程固有最终安全 (PIUS) 原则设计的 SECURE 堆系列^[8]，从低参数供热堆到 PIUS-600 MWe 压水堆核电厂用堆。由于水堆系列核电厂要达到高的技术经济指标，压水堆必须工作在高压下，这给设计和工艺带来一定的难度。这种类型的堆采用的一些新技术，最后要由原型堆验证，并且在开发过程中还要继续改进，所以达到商用阶段还要一定时间。

在低参数的供热堆或工业用热堆中，容易实现固有安全要求，而且工艺、设备简单，也较容易达到有竞争能力的经济技术指标，更适合发挥核能的优点。

轻水堆系列中的沸水堆也有相似的发展可能^[9]。