



核工业西南物理研究院科学技术丛书

聚变堆物理 ——新构思与新技术

邓柏权 编著



中国原子能出版社

核工业西南物理研究院科学技术丛书

聚变堆物理

——新构思与新技术

邓柏权 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

聚变堆物理:新构思与新技术 / 邓柏权编著. —

北京:中国原子能出版社,2013.10

ISBN 978-7-5022-5999-0

I. ①聚… II. ①邓… III. ①聚变堆-反应堆物理学

IV. ①TL61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 191432 号

内 容 简 介

本书是核工业西南物理研究院科学技术丛书的第四本,共分六大部分,二十章,分别讨论了托卡马克聚变堆设计相关的物理与技术问题,示范堆(DEMO)的计算方法;氦系统的理论设计,相关实验,计算机模拟和程序的研制;氦灰问题及其输运的蒙特卡洛模拟;等离子体与壁相互作用和溅射产额计算,高功率密度聚变堆第一壁设计的新思维; $D-^3He$ 先进燃料聚变的特点,优点和难点及其经济、技术可行性研究;附有习题。

本书可作为高等学校学生,研究生和从事聚变堆设计的科研人员和对未来聚变能探索有兴趣的人员学习参考。

聚变堆物理——新构思与新技术

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 付 真

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.875 字 数 293 千字

版 次 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1—3000

书 号 ISBN 978-7-5022-5999-0 定 价 60.00 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

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编审委员会

主 任 刘 永

副主任 童洪辉 段旭如

顾 问 (以下按姓氏笔画为序)

丁玄同 石秉仁 朱毓坤 严建成 李晓东 邱孝明
秦运文 袁保山 高庆弟 董家齐 潘传红

委 员 (按姓氏笔画为序)

王世庆 王全明 王爱科 冯开明 刘德权 李 强
杨青巍 沈丽如 张一鸣 陈燎原 姜卫红 饶 军
宣伟民 谌继明

办公室

主 任 张一鸣

成 员 (按姓氏笔画为序)

肖成罄 张 利 曾丽萍

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 付 真 孙凤春 刘 朔 李 宁
杨树录 张关铭 张铎清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 付 真 孙凤春 李 宁 杨树录 赵志军
谭 俊

总 序

核工业西南物理研究院是我国最早从事核聚变能源开发的大型专业研究院,作为中国聚变能研发的一支主力军,也是我国参与国际热核聚变实验堆(ITER)计划的重要技术支撑单位之一。在近 50 年的受控核聚变研究进程中,我院总共建成了 22 个受控核聚变实验研究装置,先后承担并完成国家重大科学工程项目“中国环流器一号(HL-1)装置研制”、“中国环流器新一号(HL-1M)装置研制”及“中国环流器二号 A(HL-2A)装置工程建设项目”,在探索受控核聚变的道路上取得了重要进展,实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的跨越发展,在具有偏滤器位形的大型托卡马克实验装置的建造、实验和运行及等离子体约束和输运、磁流体不稳定性、高能粒子物理及杂质控制等研究领域取得了一批创新性的科研成果,并在高约束模运行的研究和实验上进行了富有成效的探索。

随着国际热核聚变实验堆计划的启动和受控热核聚变研究的深入开展,越来越多的科技工作者关注和投入到这一高新前沿课题的研究之中。为了将我院专家在长期核聚变与等离子体科学及相关技术领域研究中所积累的经验 and 取得的成果加以总结,并提供给从事核聚变与等离子体科学及相关技术研究领域的科技工作者参考利用,以推动国内核聚变研究及相关领域学术水平的进一步提高,加快人才培养,加强学术交流,促进我国核聚变事业和相关科学技术的发展,决定组织出版《核工业西南物理研究院科学技术丛书》。自 2009 年以来,本丛书已陆续出版了《核真空科学技术》(朱毓坤编著)、《托卡马克装置工程基础》(袁保山等编著)和《托卡马克实验的物理基础》(秦运文编著)等三本著作。邓柏权研究员编著的《聚变堆物理——新构思与新技术》是本丛书的第四本著作。

谨以此套丛书献给近半个世纪以来在受控核聚变与等离子体科学与技术研究领域辛勤耕耘和不懈奋斗的科技工作者!

《核工业西南物理研究院科学技术丛书》编审委员会
2013 年 10 月 28 日

序

月球的能源一直引起地球人类极大的关注,因为月球上有两种能源可供地球使用,一种是太阳能,一种是受控核聚变发电燃料。太阳能不可能解决全球60亿、70亿、80亿到以后更多的人类的需求。所以,备受关注的月球的另一个资源就是用于受控核聚变发电的 ^3He 资源。

受控核聚变反应采用氘-氚(D-T)作燃料。海水里的氘很多,但是氚几乎没有。氚是有放射性的,所以科学家提出来能不能找到一种东西替换氚,这就是月球上很丰富的 ^3He 资源。 $\text{D-}^3\text{He}$ 聚变堆属于D-T聚变成功后的下一代先进聚变燃料循环。 $\text{D-}^3\text{He}$ 聚变堆的研究是国际上人们颇感兴趣的课题,在本书第15章和第16章“开发月球 ^3He 资源的经济技术可行性研究”等章中有详尽论述。

受控核聚变发电自1938年有人提出来后,全世界已经建成了200多台实验装置,取得了重大的进展。1998年,国际上完成了国际热核反应堆的设计,2006年11月,包括中国在内的七个国家和组织签署协议,联合在2020年前后共建一个热核反应堆即国际热核聚变实验堆——被称为ITER的大型托卡马克聚变实验堆,大约投资100亿美元。这是一项规模仅次于国际空间站的重大、多边大科学国际合作计划。假如ITER能建成的话,这将是人类一个巨大的进步。如果ITER如期建成并达到设计的实验目标,则一座电功率为百万千瓦级的示范核聚变电站可望在2050年前后建成。此后实现聚变能的商用化也将指日可待。

我国有两家科研院所在从事受控核聚变的研究,分别是中国核工业集团公司的西南物理研究院和中国科学院合肥等离子体物理研究所。两家研究机构目前正在利用其建成的受控核聚变实验装置HL-2A和EAST开展磁约束受控核聚变物理相关技术研究并取得了丰硕成果,两家机构同时也是我国参与ITER计划的重要技术支撑单位。

聚变堆设计的进展是世界上全部托卡马克装置物理和工程实验所取得新

成果的缩影。同样,理论和托卡马克装置的任何新进展都将引导聚变堆设计者去思考商用托卡马克聚变电站的最佳发展途径,特别是它的经济前景。例如 20 世纪 80 年代初期发现的 ASDEX-H 模,托卡马克装置的约束性能大大提高;后来理论提出低径比球形紧凑托卡马克堆 CIT 点火新概念,工程大为简化;为了提高经济前景,由美国十二个聚变研究室和大学联合设计出高极向 β_p 第一稳定区聚变堆设计如 ARIES-I;接着他们又联合设计出高 β ,无 Troyon- β 极限的第二稳定区 ARIES-II 和 ARIES-IV;反剪切特性运用聚变堆设计的 ARIES-RS;先进堆创新工程运用设计的 ARIES-AT;大大改进了堆的经济性能和环境安全和公众的可接受性。堆设计的进步又反馈回来对托卡马克装置的工程和实验提出新的 R&D 要求。可见不断地探索新概念和新构思就是聚变能研究发展真正的历史。

实现聚变能商用化的三个重要步骤是:实验堆→示范堆→商用堆。因此,聚变堆物理和聚变堆设计研究是聚变能研究不可缺少的重要内容。本书作者邓柏权研究员从 20 世纪 70 年代中开始,与核工业西南物理研究院其他同事一起从事聚变堆概念设计研究。从磁镜堆设计到国家高技术 863 计划的托卡马克聚变实验增殖堆 FEB 设计,走过了 35 年多的历程。他新近完成的这本《聚变堆物理(新构思与新技术)》是他 30 多年从事聚变堆物理和聚变堆设计宝贵经验的结晶。

随着国际热核聚变实验堆(ITER)计划的推进,国内越来越多的科研机构、高校包括企业的科研人员投入到核聚变的科学研究和技术开发中。也不断有相关受控核聚变研究的专著出版。但聚变堆物理和聚变堆设计方面的学术著作目前国内还鲜有所见。

很高兴为本书写序并向大家推荐这本新著——《聚变堆物理(新构思与新技术)》。本书覆盖了众多托卡马克聚变堆设计的新概念和新构思,范围很广,可读性强,值得从事聚变堆设计的科研人员和对未来聚变能探索有兴趣的读者,包括高等学校学生和研究生阅读和参考。最后衷心期待聚变能的研究早日取得成功,为人类造福!

中国科学院院士 中国月球探测工程首席科学家

刘阳自述

2012 年 6 月 6 日于北京

前 言

人类经过近半个世纪的努力,进行等离子体物理和受控核聚变的研究,其最终目标就是为了探索和开发清洁的聚变能并实现其应用,解决日益严重的能源危机。要达到这个目标,最后必定要建成一个能够安全可靠运行的聚变电站来稳定地输出聚变能。所以人们在开展等离子体物理和受控核聚变实验的同时,几乎同步开展了聚变堆概念设计和工程设计研究。自 20 世纪 60 年代苏联带有铜壳的托卡马克装置 T-3 取得很好的实验结果后,70 年代末至 80 年代,世界上许多国家都开始建造托卡马克装置,而且越建越大。美国、欧洲、日本相继建成大型托卡马克装置如 TFTR、DIII-D、JET、JT-60 等,并不断取得令人鼓舞的新物理成果。20 世纪 80 年代中期,美国总统里根和苏联总统戈尔巴乔夫达成协议,决定在世界上联合建造国际热核聚变实验堆,即 ITER。此后世界上更多国家,包括中国、韩国、印度也先后加入了这个计划。ITER 目前正在法国的卡达拉奇建造,计划 2019 年建成并投入实验运行。

20 世纪 80 年代,作为我国最早从事核聚变能源开发的专业研究院——核工业西南物理研究院也建造了 HL-1 托卡马克装置,后来改建为 HL-1M,并在国外重要杂志和国际会议发表了大量的实验结果。进入 21 世纪,我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置 HL-2A 在该院建成并投入运行。

在开展装置实验的同时,20 世纪 70 年代中期核工业西南物理研究院在李正武院士的关怀下组建成立了以黄锦华研究员为首的聚变堆概念设计小组,80 年代后逐步发展成为聚变堆概念设计研究室。在国家 863 高技术聚变-裂变混合堆课题的支持下开展了聚变实验增殖堆 FEB 和 FEB-E 的概念设计。人员也增加到 20~30 人,进行包括堆材料研究。同时与国际上开展学术交流,采用走出去,请进来两条腿走路的方式同时进行。伴随工作的开展,今天已经培养出 60 多人规模的一支年轻的骨干力量队伍加入到 ITER 项目中,他们将为自己的国家作出应有的贡献。

本书大部分内容是作者本人参与过的研究成果。为了让从事聚变堆设计

研究领域的年轻研究生更快进入工作,本书除了介绍聚变堆设计基本理论知识外,也意图引导他们敢于探索新的物理思想和新的技术,因为没有一支创新能力的队伍就不可能占领这个科研领域的前沿阵地。

全书共分为 20 章,第 1 章介绍聚变堆设计相关的物理与工程技术问题,其中包括示范堆(DEMO)设计限制规范和具体计算方法;第 2 章进行聚变堆氦系统设计中的新问题探索性研究,包括提出氦坑深度、氦坑时间、海绵效应、氦-铍合作沉积层和提高氦提取效率的 SPB 方法等新概念;第 3 章介绍氢同位素在 HR-1 不锈钢中迁移特性的热动力方法研究;第 4 章介绍氦循环系统的计算机模拟;第 5 章介绍氦增殖剂,特别是固态硅酸锂等陶瓷氦增殖剂辐照后释氦行为的综述和实验研究;第 6 章介绍稳态增殖包层中氦浓度空间分区计算方法;第 7 章介绍 FEB-E 氦泄漏分析及氦的环境安全评估;第 8 章介绍我们研制的 SWITRIM 程序使用方法及其运用概况;第 9 章介绍聚变等离子体中的氢灰问题研究;第 10 章介绍偏滤器靶板附近氢输运的蒙特卡罗模拟;第 11 章介绍运用射频有质动力提高偏滤器排灰效率;第 12 章介绍快速识别壁释放的氢类中性原子再循环性质方法;第 13 章讨论高功率密度聚变堆第一壁的新设计思维;第 14 章介绍双群模型在偏滤器材料溅射研究中的应用;第 15 章讨论先进燃料聚变 $D-^3He$ 聚变动力可行性研究;第 16 章讨论开发月球 3He 资源的经济、技术可行性研究;第 17 章介绍 $D-^3He$ 聚变等离子体中的快离子压强;第 18 章介绍库仑对的数量子效应;第 19 章讨论 $D-^3He$ 先进燃料聚变反应性增强的新机制;因为聚变堆设计的范围很广,作者不可能全部论述,其他问题只能简单提一下,不能详细讨论。第 20 章即最后一章聚变堆运行技术事故及其他问题简介,并附有聚变堆设计基本知识和基本数据库及思考题。

借此机会,作者感谢核工业西南物理研究院刘永院长及各级领导对本书撰写工作的关怀和支持,感谢中国科学院院士欧阳自远先生在百忙中为本书亲自撰序,同时也向在本书编写过程中给予热忱帮助的同行、同事和朋友,向中国工程物理研究院核物理与化学研究所提供的帮助和支持表示诚挚的谢意。

黄锦华研究员及院科技丛书编审委员会对本书各章做了审阅,在此表示衷心感谢。

由于作者知识有限,本书难免会有不妥之处,恳请读者批评指正。

核工业西南物理研究院 邓柏权

2012 年 1 月于成都

目 录

第 1 章 聚变堆设计相关的物理与技术问题	1
1.1 聚变商用堆的发展途径——五种可供选择的托卡马克堆工作模式	2
1.2 先进聚变堆设计的几个关键物理品质因子 FOM(Figure of Merit)	2
1.3 如何从物理方程式画出先进托卡马克工作区的划分图形	3
1.4 聚变堆设计中 H 模和反剪切特性运用问题的讨论	4
1.5 一种可供参考的示范堆(DEMO)设计限制规范和具体计算方法	4
1.5.1 物理设计基础	5
1.5.2 磁体应力极限和厚度的计算	6
1.5.3 提供磁通量变化的空心变压器中心螺线管空腔内半径的决定	8
1.5.4 面对等离子体部件(PFC)的应力和热通量极限	8
1.5.5 真空室过压强应力极限	10
1.5.6 包层和屏蔽的厚度	10
1.5.7 到达 PFC 上的功率和中子注量率的计算	11
1.5.8 聚变堆的大半径的最后决定	13
参考文献	13
第 2 章 聚变堆氦系统设计中的新问题探索性研究	14
2.1 氦滞留量和投料量	14
2.2 氦坑深度,氦坑时间	15
2.2.1 新概念的提出	15
2.2.2 平均停留时间 AST 模型	16
2.2.3 数值计算与输入参数	17
2.2.4 计算结果	18
2.2.5 稳态运行聚变堆要求的最少氦贮存量	18
2.3 减少氦滞留量和提高氦回收效率的新机制	19
2.3.1 “海绵效应”	19
2.3.2 建立“氦-铍的伴同”沉积层减少氦滞留	21
2.3.3 提高氦增殖效率和载氦气提氦效率的 SPB 新方法	22
2.4 总结	23
参考文献	23

第 3 章 氢在 HR-1 不锈钢中迁移特性的热动力方法研究	25
3.1 引言	25
3.2 电解法渗氢与热抽取实验方法	25
3.2.1 实验描述	25
3.2.2 热抽取法	26
3.3 大气压气相氢渗透与真空加热氢释放研究	27
3.3.1 实验样品和理论方法	27
3.3.2 实验安排和数据拟合	28
3.4 讨论	32
参考文献	32
第 4 章 FEB-E 氚循环系统的计算机模拟	33
4.1 引言	33
4.2 氚增殖包层设计细节	34
4.3 三维蒙特卡罗模拟	35
4.4 物理模型	35
4.4.1 子系统的构造和物理描述	35
4.4.2 方程组及定解条件	37
4.4.3 输入参数(参考情况)	38
4.5 结果与讨论	38
参考文献	41
第 5 章 硅酸锂等陶瓷氚增殖剂辐照后释氚行为研究	42
5.1 引言	42
5.2 氚增殖剂的分类和比较	43
5.3 陶瓷增殖剂内氚质量转移和表面释放理论模型	44
5.4 锂陶瓷被中子辐照后性能的改变	47
5.4.1 辐照对锂陶瓷结构及物相组成的影响	47
5.4.2 辐照引起热力学性能改变	47
5.4.3 辐照后增殖剂被活化水平	47
5.5 锂陶瓷的辐照产氚行为	48
5.5.1 中子注量对产氚形态的影响	48
5.5.2 温度及升温速率对释氚行为的影响	49
5.5.3 载气条件对释氚行为的影响	49
5.5.4 颗粒尺寸对氚在颗粒内扩散的影响	50
5.5.5 晶粒表面加催化活性元素对释氚行为的影响	50

5.6	辐照引起的缺陷对氚释放的影响	50
5.7	新建议和国外研究进展总结	51
5.8	国内硅酸锂晶粒辐照释氚实验研究	52
5.8.1	实验描述	52
5.8.2	结果与讨论	53
5.8.3	国内实验小结	56
	参考文献	56
 第6章 稳态增殖包层中氚浓度空间分区计算		58
6.1	引言	58
6.2	增殖包层设计基本特性	59
6.3	包层各区氚增殖率的慢化近似计算模型	60
6.4	包层各增殖区的氚浓度计算	62
6.5	Be 中的氚投料量	64
6.5.1	增殖区温度低于 680 °C 情况下 Be 中的氚投料量	64
6.5.2	增殖区温度高于 680 °C 后 Be 中的氚投料量	64
6.6	FEB 堆系统的氚的回收	65
6.6.1	等离子体排出气体中燃料的净化和分离	65
6.6.2	FEB 液态锂包层中氚的回收	65
6.7	结论	67
	参考文献	67
 第7章 FEB-E 氚泄漏分析		68
7.1	引言	68
7.2	计算根据	68
7.3	氚在包层液态锂中的溶解度计算	69
7.4	正常状态下包层液态锂中的氚泄漏	69
7.5	正常状态下等离子体抽气系统中的氚泄漏	70
7.6	事故状态下的氚泄漏分析	71
7.7	结论	72
7.8	FEB-E 的氚环境安全评估	72
7.8.1	评估的必要性	72
7.8.2	评估的假定条件	73
7.8.3	包层液态锂中氚的溶解度计算方法	73
7.8.4	正常状态下包层中的气相氚分压	74
7.8.5	正常状态下堆芯抽气系统氚污染	75

7.8.6 事故状态下氙污染	76
7.8.7 危险不在包层	77
参考文献	77

第 8 章 SWITRIM 程序的研制和使用概况	78
8.1 引言	78
8.2 SWITRIM 程序包组成	79
8.3 SWITRIM 程序运行过程和使用方法	79
8.3.1 SWITRIM 程序运行条件	79
8.3.2 平均停留时间 (AST) 提氙模型	79
8.3.3 文件说明	80
8.3.4 输入/输出文件	80
8.3.5 IZPT 提氙模型	81
8.4 SWITRIM 程序包应用举例	82
8.5 结论和程序的推广	82
参考文献	83

第 9 章 聚变等离子体中的氦灰问题研究	84
9.1 引言	84
9.2 FEB 热化后的 α 积聚及其影响	84
9.3 排灰效率的数值研究	86
9.3.1 二维蒙特卡罗模拟偏滤器靶板附近的氦输运	86
9.3.2 排灰效率的参数模拟	87
9.4 结论	88
参考文献	89

第 10 章 偏滤器靶板附近氦输运的蒙特卡罗模拟	90
10.1 引言	90
10.2 靶板附近中性氦原子的主要过程	91
10.3 中性源粒子的抽样	92
10.4 碰撞事件的抽样	93
10.5 计算结果和讨论	95
参考文献	98

第 11 章 射频有质动力提高偏滤器排灰效率探讨	99
11.1 问题的提出	99

11.2	机理	99
11.3	物理依据	99
11.4	计算排灰效率的改善	101
11.5	结果与讨论	102
	参考文献	104
第 12 章 快速识别壁释放的氢类中性原子再循环性质方法		105
12.1	引言	105
12.2	两能群模型物理	105
12.3	与 SPUDNUT 程序的结果比较	109
12.4	再循环性质判断	110
	参考文献	111
第 13 章 高功率密度聚变堆第一壁的新设计思维		112
13.1	液态锂第一壁设想	112
13.2	液态锂包层表面温度 T_{Li} 对 Z_{eff} 的影响	112
13.3	蒸发对堆芯性能的综合影响	114
13.4	液态锂包层表面的最大温升	116
13.5	氢同位素饱和状态下液态锂溅射	118
13.6	讨论	119
	参考文献	119
第 14 章 双群模型在偏滤器材料溅射研究中的应用		121
14.1	溅射理论的发展史	121
14.2	溅射理论的双群模型	122
14.3	基于双群模型的溅射产额计算方法	122
14.4	结果和讨论	124
	参考文献	127
第 15 章 $D-^3He$ 聚变动力可行性研究		129
15.1	引言	129
15.2	$D-^3He$ 聚变的物理特征	130
15.3	等离子体模型	132
15.4	$D-^3He$ 托卡马克点火的难度估计	133
15.5	高径比 $D-^3He$ 托卡马克堆参数学研究	135
15.6	缩短聚变商用化的可能性	137

15.7 其他相关工程技术问题简介	137
15.8 讨论	138
参考文献	138
第 16 章 开发月球³He 资源的经济技术可行性研究	139
16.1 引言	139
16.2 地球上 ³ He 资源贫乏	140
16.3 太阳风的参数分析与月球 ³ He 贮量的估计	140
16.4 月球氦的开采成本估算	141
16.5 He 气的抽取	141
16.6 月球上就地 ³ He/ ⁴ He 同位素分离	142
16.7 从月球运输 ³ He 返回地球	142
16.8 能量偿还因子的比较	142
16.9 单位电价的比较	142
16.10 讨论	143
参考文献	143
第 17 章 D-³He 聚变等离子体中的快离子压强	145
17.1 快离子压强的重要性	145
17.2 快试验粒子能量慢化速率	145
17.3 能量传递份额	147
17.4 快离子压强	147
17.5 对一些结果讨论	149
参考文献	151
第 18 章 库仑对数的量子效应	152
18.1 引言	152
18.2 高能带电试验粒子在本底等离子体中的热化	152
18.3 库仑对数的量子力学效应 ^[2]	153
18.4 结论	156
参考文献	156
第 19 章 D-³He 先进燃料聚变反应性增强的新机制	157
19.1 D- ³ He 先进燃料聚变新的物理过程	157
19.2 核力弹性散射和次级反应的传播	157
19.3 库仑散射总截面与核弹性散射总截面	158

19.4	库仑散射的微分截面·····	161
19.5	核-核弹性散射加上 NI 的微分截面·····	161
19.6	NI 散射的平均能量损失 ·····	162
19.7	结果与讨论·····	164
19.8	结论·····	166
	参考文献·····	166
 第 20 章 聚变堆运行技术事故及其他问题简介 ·····		167
20.1	堆芯等离子体运行中的技术事故·····	167
20.2	等离子体电流转换成的逃逸电子电流·····	168
20.3	真空丧失事故(LOVA=Loss of Vacuum Accident) ·····	168
20.4	第一壁的损坏或破裂·····	168
20.5	中子辐射损伤·····	168
20.6	第一壁的物理溅射腐蚀率·····	168
20.7	聚变堆包层 LOFA 和 LOCA 事故 ·····	168
20.8	材料的活化放射性计算程序·····	169
20.9	放射性废物处置标准·····	169
20.10	活化放射性和余热(afterheat)计算目的 ·····	169
20.11	包层冷却系统出问题使温度失控事故 ·····	169
20.12	超导磁体失超事故 ·····	169
20.13	屏蔽事故 ·····	170
20.14	聚变堆中子学计算简介 ·····	170
20.15	中子倍增剂 ·····	170
20.16	中子倍增剂 Be 的性质 ·····	170
20.17	堆设计基本知识和基本数据库 ·····	171
20.18	思考题 ·····	171