



核工业西南物理研究院科学技术丛书

国际核聚变能源研究 现状与前景

中国国际核聚变能源计划执行中心 编著
核工业西南物理研究院

中国原子能出版社

核工业西南物理研究院科学技术丛书

国际核聚变能源研究 现状与前景

中国国际核聚变能源计划执行中心
核工业西南物理研究院

编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

国际核聚变能源研究现状与前景 / 中国国际核聚变能源计划执行中心, 核工业西南物理研究院编著. —北京: 中国原子能出版社, 2015. 4

ISBN 978-7-5022-6399-7

I. ①国… II. ①中… ②核… III. ①核能-研究
IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 229262 号

内 容 简 介

本书系统调研了国际受控热核聚变发展的历程、研究现状,介绍了包括美国、俄罗斯、中国、欧盟、日本、韩国和印度等在内的世界主要核聚变能源研究国家的核聚变研究背景、研究开发现状、主要实验装置和研究成果。同时介绍了正在实施中的国际大科学工程计划——国际热核聚变实验堆(ITER)计划的背景和意义、ITER 计划的科学和工程技术目标,各参与方承担的任务、各方执行情况的最新进展、ITER 计划实施阶段的整体进展。介绍了当前以国际磁约束聚变为主的受控热核聚变研究的前沿课题及各国的聚变研究发展战略。

国际核聚变能源研究现状与前景

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

特约编辑 张一鸣 曾丽萍

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京卓诚恒信彩色印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 22 字 数 578 千字

版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6399-7 定 价 168.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

《国际核聚变能源研究现状与前景》

编委会名单

主 编:罗德隆

副 主 编:刘 永 丁明勤 段旭如

常务编委:张一鸣 张年满

编 委:(以姓氏笔画为序)

丁玄同	丁亚清	王爱科	王 海	王 敏
冯开明	邢 超	李 强	何开辉	严建成
肖成馨	沈欣媛	杨长春	房同珍	张 利
杨青巍	林建龙	姜卫红	康卫红	谢纪康
曾丽萍	董家齐	潘传红		

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)、《托卡马克实验的物理基础》(秦运文编著)和《聚变堆物理——新构思与新技术》(邓柏权编著)等四本著作。

为探索符合我国国情的中长期核聚变能源研究发展乃至商业化的发展道

路,为有关部门部署国内聚变能研究与发展乃至未来能源政策取向提供科学技术研究、分析基础和战略决策依据,2010年至2013年,科技部中国国际核聚变能源计划执行中心和核工业西南物理研究院历时三年共同完成了科技部软科学研究计划“我国核聚变能源研究发展技术预测和战略途径研究”课题。作为本套丛书的第五本著作,《国际核聚变能源研究现状与前景》以完成的上述软科学研究计划课题报告为基础,系统介绍了包括各国聚变发展战略规划等在内,国内外核聚变能源研究的现状和发展趋势,详细描述了中国参加国际热核聚变实验堆(ITER)计划的历程和目前承担的任务,提供了大量世界核聚变研究的第一手资料。

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

2015年1月8日

序 言

《国际核聚变能源研究现状与前景》一书是由科技部中国国际核聚变能源计划执行中心和核工业西南物理研究院历时三年共同完成的科技部软科学研究计划“我国核聚变能源研究发展技术预测和战略途径研究”的课题报告编著而成。本书收集了迄今为止我所看到的最为丰富的国内外聚变研究有关资料,包括各国聚变发展战略规划,具有很高的研究和参考价值。书中详细描述了我国参加国际热核聚变实验堆(ITER)计划的历程和目前承担的任务,展现了我国聚变研究的历史全貌,因此,本书的编著、出版是十分有意义的。

ITER 计划作为人类历史上最大规模的科学工程和研究合作计划之一,集成了当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果,具备可靠的科学依据和坚实的技术基础。其目标是验证和平利用聚变能的科学技术可行性,为实现聚变能源商业化应用奠定科学和技术基础。国际核聚变研究成果表明,托卡马克是已知的最有可能首先实现聚变能商业化的途径。基于托卡马克途径的 ITER 实验堆开始建设,标志着国际聚变能源开发已由基础性研究进入了实验堆研究阶段。

中国是 ITER 计划的重要参与国。作为这一国家重大科技项目的技术支撑单位,核工业西南物理研究院和中科院等离子体物理研究所目前正通过 HL-2A 和 EAST 托卡马克实验装置,为 ITER 计划的顺利推进,开展前沿课题研究和技术研发,并已取得了一系列重大进展。

人类对能源的理想是开发环境可接受度高,固有安全性好,储量又极为丰富的新能源。核聚变能不仅资源丰富,而且是一种无碳能源,对解决地球温室效应具有极大吸引力。因此,作为一种高效、清洁、安全、环境兼容的能源,它是人类未来最理想的新能源之一。磁约束聚变研究的最终目标是获得具有商业

价值的聚变能源。为了获得聚变能源,首先必须将聚变燃料加热并约束到能够发生大量聚变反应的状态——实现“燃烧”。与此同时,“燃烧”获得的功率应等于或大于消耗的功率,即功率倍增因子大于1,达到和超过得失相当条件。此时,聚变能的开发才有实用意义——表明开发聚变能源的科学可行性得到证实。其后必须长时间维持“燃烧”,才能获得具有使用价值的聚变能量而不仅仅是短暂的聚变功率。在开发聚变能源的不同阶段,研究重点有很大差别。在证实科学可行性阶段,主要研究目标是改善约束和发展有效加热手段,以便达到“燃烧”条件和证明可以获得有收益的聚变功率。

对磁约束聚变装置,由于“燃料气体”密度很低(大气压的百万分之一),因此,即便物理上有全新的发现,聚变功率也不可能达到极高水平(如惯性约束),否则聚变装置将非常巨大。由于磁约束聚变堆的体积(规模)不可能无限增大(ITER已经很大了),因此,在磁约束聚变堆上获得大量聚变能源的主要研究目标应当是:实现长时间“燃烧”,以获得有实际使用价值的聚变能源。

在获得聚变能源成功的基础上,对物理和工程技术进一步优化和提高,以获得安全、高效的具有很高商业价值的聚变能源堆是一个长期的发展过程,不是近期就可制定出明确的行动规划或计划的。

随着世界三大托卡马克装置——JET、TFTR和JT-60的成功,表明在托卡马克类型的磁约束装置上开发聚变能的科学可行性已经得到证实,这是国际聚变界经过40多年的共同努力取得的重大进展。在此基础上,聚变能的开发研究应该也必须进入一个新的阶段:实现长时间的聚变燃烧。与追求改善约束和获得短暂的高温聚变等离子体不同,要维持长时间的聚变燃烧,必须深入进行聚变燃烧物理的理论和实验研究:包括稳态燃烧的物理基础与限制;加料效率的物理基础与限制(稳态的加料与排灰);燃烧效率的物理基础与限制;稳态的加热与移能;燃烧等离子体中高能粒子的作用;破裂的物理与控制等等。

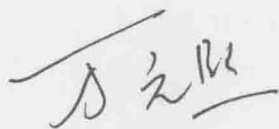
实现稳态燃烧还必须要有强有力的工程技术支持:如稳态的或者非常长脉冲的磁体系统——超导或者高效水冷磁体;稳态的或者非常长脉冲的加热系统,包括 α 粒子加热;稳态的或者非常长脉冲的电流驱动系统,包括自举电流;稳态的高效加料系统;高效、安全、快速的氦大规模回收、分离、再纯化及存储系统;可满足聚变堆氦自持要求的包层技术和系统;破裂的完全避免和控制系统等。

如果不能实现稳态或者有相当平均功率的等效稳态燃烧,就一定不会获得足够的具有实用价值的聚变能量。那样,磁约束聚变将失去支持,如果实现了这一目标,研究的问题将可立即转入未来示范堆(DEMO)或者聚变电站必将面对的更多的工程技术和物理问题:例如高中子辐照下的材料问题;氦的加料效率,燃烧效率,回收效率以及它与环境条件的作用等等,这些将决定氦的初次投

料总量和在线循环运行所需总量;氦在包层中如何增殖才能实现聚变能源堆氦的自持,因为没有任何其他办法可为聚变能源堆提供如此大量的氦的净消耗量。

因此,在国际磁约束聚变已经获得巨资建造 ITER,同时中国政府已经决定拨大量经费参加 ITER 的情况下,中国聚变能源研究的战略应当是:将主要的人力物力和财力集中支持:ITER 和 ITER 上长脉冲、高有效燃烧时间(duty time)的实验和工程技术研发;ITER 之后中国聚变工程实验堆的稳态燃烧聚变等离子体物理和相关的工程技术研发。

本书提供了大量世界核聚变研究第一手资料并首次系统地调研了以国际磁约束聚变为主的受控热核聚变发展的历程、研究现状、参与 ITER 计划以及包括中国、美国、欧盟、日本、俄罗斯、韩国、印度等世界主要聚变研究国家在内的各国磁约束聚变发展战略,使我们能够对国际聚变研究的情况有比较全面的了解,这对思考我国磁约束聚变能研发的技术途径和总体规划有重要价值。本书既是对国际国内核聚变能源开发历程的回顾和总结,也是对未来发展的一个预测和展望,对制定我国核聚变能源研究的发展战略、实施路线图及必要的政策措施等具有重要的参考价值,可供关心和参与核聚变科学研究各种层次的研究人员及提供政策支持的各级部门参考。



2013 年 12 月

前 言

2010年7月,中国国际核聚变能源计划执行中心和核工业西南物理研究院接受了科技部下达的国家软科学研究计划——《我国核聚变能源发展研究技术预测和战略途径研究》课题的研究任务。其目的旨在:在充分调研和了解国际核聚变能源研究发展中的科学研究及技术突破趋势的基础上,探索符合我国国情的中长期核聚变能源研究发展乃至商业化的发展道路,为有关部门部署国内聚变能研究与发展乃至未来能源政策取向提供科学技术研究、分析基础和战略决策依据。我国聚变能源发展研究技术预测和战略途径研究课题组在广泛文献调研的基础上,积累了大量国内外聚变研究发展现状和未来发展趋势的资料,并通过与国内聚变界相关专家开展合作讨论,听取专家意见,深入开展分析研究,历经三年时间,完成了《我国核聚变能源发展研究技术预测和战略途径研究》课题的研究任务。《国际核聚变能源研究现状与前景》一书便是在该课题报告的基础上编撰而成。

本书分为三章。第一章“世界各国的核聚变研究”介绍了包括美国、俄罗斯、中国、欧盟、日本、韩国和印度等在内的世界主要核聚变能源研究国家的核聚变研究背景、研究开发现状、主要实验装置及其研究成果。第二章“国际热核聚变实验堆(ITER)计划”介绍了正在实施中的国际大科学工程计划——ITER计划的背景和意义、ITER计划的科学和工程技术目标,美国、俄罗斯、中国、欧盟、日本、韩国和印度等ITER计划的参与各方承担的任务、各方执行情况的最新进展、ITER计划实施阶段的整体进展。第三章“国际核聚变能源发展趋势和前景”介绍了当前国际磁约束聚变研究的前沿课题,以及各国针对这些前沿课题利用现有装置开展的研究项目;已经制定、实施或正在拟定或讨论中的聚变研究发展战略、聚变发展路线图、聚变堆开发路线和聚变堆的开发计划,同时对

各国的聚变发展路线图进行了分析比较。

本书的出版,得到了科技部中国国际核聚变能源计划执行中心、中国核工业集团公司以及核工业西南物理研究院各级领导的大力支持和帮助,也得到了包括上述单位以及中科院等离子体物理所、中国科学技术大学、华中科技大学、北京大学、清华大学、北京科技大学、国家核安全局等单位的有关专家对本书内容的有益建议和补充修改。中国工程院院士、中国科技大学核科学技术学院万元熙院长为本书作序。在本书出版之际,谨向各级领导和专家表示诚挚的谢意。

需要说明的是,由于编者知识和认知的有限,以及本书所收集资料时间的局限,且资料的来源既有来自官方的,也有来自会议资料或个人的著作和意见,再加之核聚变能源科学研究进展、状态变化很快,聚变相关政策随之有可能进行相应调整等因素,本书对国际核聚变能源研究发展趋势和前景的介绍以及预测、分析等有一定的局限性,仅供读者参考。本书的编撰也将随着国际核聚变能源研究的深入开展,进一步补充和完善,并期待读者对本书的内容提出积极的建议和宝贵的意见。

《我国核聚变能源发展研究技术预测和战略途径研究》课题组
2014年6月

目 录

总 论	1
第 1 章 世界各国的核聚变研究	8
1.1 美国	8
1.1.1 美国核聚变研究的背景及总体概述	8
1.1.2 美国核聚变研究的经费与政策支持	11
1.1.2.1 20 世纪 70 年代的经费与政策	11
1.1.2.2 80 年代的经费与政策	11
1.1.2.3 90 年代的政策调整	12
1.1.2.4 21 世纪初的政策调整	13
1.1.3 美国主要实验研究装置	17
1.1.3.1 TFTR 托卡马克装置	17
1.1.3.2 DIII-D 托卡马克装置	18
1.1.3.3 Alcator C-Mod 托卡马克装置	22
1.1.3.4 NSTX 球形环磁聚变装置	23
1.1.4 美国主要装置的研究成果	26
1.1.4.1 TFTR 装置的研究成果	26
1.1.4.2 DIII-D 成果介绍	27
1.1.4.3 Alcator 2003—2008 年的主要研究成果	32
1.1.4.4 NSTX 对托卡马克物理学和 ITER 的贡献	34
1.1.4.5 2009 年研究进展	35
1.1.5 美国聚变动力堆发展进程及研究现状	35
1.1.5.1 ARIES 计划	35

1.1.5.2	APEX 计划	36
1.1.6	聚变材料计划	37
1.1.7	虚拟技术实验室	37
1.1.8	美国激光聚变研究的情况	40
1.1.8.1	背景及美国国家点火装置(NIF)概况	40
1.1.8.2	NIF 的任务与装置研究的意义	41
1.1.8.3	NIF 取得的最新进展	42
参考文献		43
1.2	俄罗斯	44
1.2.1	俄罗斯聚变研究背景	44
1.2.2	俄罗斯聚变研究历史及主要聚变装置	45
1.2.3	俄罗斯聚变研究的困难和经费投入	49
1.2.4	俄罗斯主要聚变研究机构	50
1.2.4.1	俄罗斯原子能机构/集团(ROSATOM)	50
1.2.4.2	库尔恰托夫研究所(KI)	50
1.2.4.3	俄罗斯科学院约飞物理技术研究所(PTI RAS)	51
1.2.4.4	俄罗斯应用物理研究所(IAP RAS)	52
1.2.4.5	叶菲莫夫电物理仪器研究所(NIIEFA)	52
1.2.4.6	俄罗斯特罗伊茨克创新和热核研究所(TRINITI)	52
1.2.4.7	俄罗斯 A. A. Bochvar 无机材料高科技研究所(VNIINM)	52
1.2.5	俄罗斯磁约束聚变研究	53
1.2.5.1	俄罗斯主要托卡马克装置和成果	53
1.2.5.2	国际领先技术——回旋管	57
1.2.5.3	俄罗斯聚变堆研究概况	57
1.2.5.4	其他途径的研究概况	58
1.2.6	俄罗斯惯性约束聚变及其他聚变研究	59
1.2.6.1	激光聚变	59
1.2.6.2	聚爆箔	60
1.2.6.3	爆燃式聚变反应堆	60
参考文献		61
1.3	中国	63
1.3.1	中国核聚变能源研究发展历程	63
1.3.2	中国主要核聚变研究装置	64
1.3.2.1	中国环流器一号(HL-1)及中国环流器新一号(HL-1M)	64
1.3.2.2	中国环流器二号 A(HL-2A)	65
1.3.2.3	中国环流器二号 M(HL-2M)	68
1.3.2.4	合肥超环(HT-7)	69
1.3.2.5	东方超环(EAST)	70

1.3.3 中国高校的聚变研究.....	72
1.3.3.1 中国科学技术大学	73
1.3.3.2 华中科技大学.....	73
1.3.3.3 其他相关高校.....	74
1.3.3.4 高校的聚变研究人才培养.....	74
1.3.4 中国聚变堆设计研究的现状.....	75
1.3.4.1 聚变商用堆 STR 概念设计研究	75
1.3.4.2 D^3He 聚变堆的可行性研究.....	75
1.3.4.3 聚变增殖堆设计研究.....	76
1.3.4.4 示范堆研究.....	76
1.3.5 中国聚变能研究开发专项.....	77
1.3.5.1 专项目标.....	77
1.3.5.2 专项主要任务.....	77
1.3.5.3 稳步推进双边核聚变合作.....	78
1.3.6 中国的惯性约束聚变(ICF)现状	78
1.3.6.1 “神光-I”	79
1.3.6.2 “神光-II”和“神光-II”升级	79
1.3.6.3 “神光-III”原型装置	80
参考文献	81
1.4 欧盟及主要成员国	82
1.4.1 欧盟核聚变研究发展回顾.....	83
1.4.2 欧盟核聚变研究发展.....	86
1.4.2.1 欧盟重视核聚变研究的战略地位.....	86
1.4.2.2 欧盟科学地制定核聚变研究的战略规划.....	87
1.4.2.3 欧盟加强核聚变研究经费的支持力度.....	91
1.4.3 欧盟核聚变研究成果.....	93
1.4.3.1 欧洲联合环(JET)的贡献和作用	93
1.4.3.2 欧洲原子能联营协会各研究机构的聚变研究.....	98
1.4.3.3 欧盟主要成员国的核聚变研究概述	102
1.4.3.4 欧盟惯性约束核聚变的发展	112
1.4.4 下一代聚变堆(DEMO)研究	114
1.4.4.1 欧盟致力于聚变堆的基础研究	114
1.4.4.2 欧盟 DEMO 堆的研究重点	117
1.4.5 欧盟工业界参与核聚变研究的活动	120
1.4.6 核聚变研究人才的培养和公众宣传	121
1.4.7 结束语	123
参考文献	124
1.5 日本	125
1.5.1 日本聚变研究背景	125

1.5.2	日本聚变研究体制	127
1.5.3	日本聚变研究经费	128
1.5.4	日本聚变研究计划	129
1.5.4.1	第一阶段(1965—1974 年)计划	129
1.5.4.2	第二阶段(1975—1991 年)计划	130
1.5.4.3	第三阶段(1992—2030 年)计划	134
1.5.5	日本主要研究装置及其成果	142
1.5.5.1	JT-60	142
1.5.5.2	LHD	149
1.5.6	BA 计划及其进展	154
1.5.6.1	JT-60SA	156
1.5.6.2	IFMIF 的工艺设计和验证	159
1.5.6.3	工艺设计和验证的主要课题	161
1.5.7	日本激光核聚变研究	161
1.5.8	日本核聚变人才培养	163
1.5.8.1	人才培养的思路	163
1.5.8.2	人才培养必要的实施策略	164
1.5.9	日本产业界在聚变研究中的作用	165
1.5.9.1	企业对 JT-60 及 JT-60U 的贡献	166
1.5.9.2	企业对 LHD 的贡献	167
1.5.9.3	企业对 ITER-EDA 的贡献	168
1.5.9.4	日本主要参与核聚变研制和建设的企业	168
1.5.10	核聚变研究中间技术的应用	170
1.5.11	日本下一步聚变堆开发计划	171
1.5.11.1	ITER 研究开发	172
1.5.11.2	高 β 稳态运行方法的原理验证	172
1.5.11.3	原型堆材料、堆工艺技术开发	173
1.5.11.4	托卡马克理论、模拟研究	174
1.5.11.5	原型堆的概念设计	174
1.5.11.6	非托卡马克途径的重点计划	174
	参考文献	175
1.6	韩国	175
1.6.1	韩国的聚变研究背景及基本政策	175
1.6.2	韩国的聚变研究预算	178
1.6.3	KSTAR 项目	178
1.6.3.1	KSTAR 项目建设及目的	178
1.6.3.2	KSTAR 装置梗概	179
1.6.3.3	KSTAR 装置的研制成果及下一步计划	180
1.6.3.4	KSTAR 研制过程中开发的 10 大科技成果	183

1.6.4	实验包层计划	184
1.6.5	2012—2016 年核聚变计划	184
1.6.6	核聚变研究给韩国企业带来的机遇	185
1.6.7	结束语	186
参考文献		186
1.7	印度	187
1.7.1	印度能源概况	187
1.7.2	印度聚变能源政策	188
1.7.3	印度核聚变研究机构	189
1.7.4	印度聚变研究经费	191
1.7.5	印度聚变研究历程	191
1.7.6	印度主要聚变研究装置及研究成果	193
1.7.6.1	ADITYA	193
1.7.6.2	SST-1 装置	197
1.7.6.3	SINP 托卡马克装置	203
1.7.7	印度聚变堆设计研究	204
1.7.8	印度相关应用技术发展	208
1.7.9	印度惯性约束聚变研究	208
参考文献		209
第 2 章 国际热核聚变实验堆(ITER)计划		211
2.1	ITER 计划的背景和意义	211
2.2	ITER 计划的科学目标	213
2.3	ITER 的工程技术基础及目标	216
2.4	ITER 计划的经费和各参与方的支持力度	218
2.5	各国参与 ITER 计划情况	221
2.5.1	美国	221
2.5.1.1	美国加入 ITER 计划的过程	221
2.5.1.2	美国 ITER 项目办公室(US-DA)简介	223
2.5.1.3	美国承担的 ITER 任务	223
2.5.2	俄罗斯	225
2.5.2.1	俄罗斯参与 ITER 计划过程	225
2.5.2.2	俄罗斯 2002—2005 “国际热核聚变实验堆(ITER)”专项计划	226
2.5.2.3	俄罗斯 ITER 国内机构简介	227
2.5.2.4	俄罗斯承担的 ITER 采购包任务	227
2.5.2.5	俄罗斯签署的采购包协议	231
2.5.2.6	俄罗斯 ITER 项目研究最新成果	232
2.5.3	中国	232

2.5.3.1	中国参与 ITER 计划的意义	232
2.5.3.2	中国承担的 ITER 采购包	233
2.5.3.3	中国采购包进展	237
2.5.3.4	中国 ITER 实验包层模块的研究开发	243
2.5.4	欧盟	244
2.5.4.1	欧盟对 ITER 计划的技术支持	244
2.5.4.2	欧盟在 ITER 计划中所承担的任务	246
2.5.4.3	欧盟采购包进展	249
2.5.5	日本	251
2.5.5.1	日本承担的采购包及其进展	252
2.5.5.2	日本 ITER 实验包层模块的研究开发	254
2.5.6	韩国	255
2.5.6.1	韩国加入 ITER 计划的进程	255
2.5.6.2	韩国 ITER 国内机构(KO-DA)	255
2.5.6.3	韩国承担的 ITER 采购包任务及执行情况	256
2.5.7	印度	258
2.5.7.1	印度参与 ITER 计划过程与现状	258
2.5.7.2	印度承担的 ITER 采购包任务及执行情况	259
2.6	ITER 计划实施阶段总体进展	263
2.7	ITER 后的目标	273
	参考文献	273

第 3 章	国际核聚变能源发展趋势和前景	276
3.1	美国	277
3.1.1	美国核聚变发展路线图	277
3.1.2	聚变核科学研究设施(FNSF)	278
3.1.3	通往 DEMO 的道路上存在的问题和解决方案	280
3.2	俄罗斯	283
3.2.1	俄罗斯聚变发展路线图	283
3.2.2	T-15MD 托卡马克计划	285
3.2.3	IGNITOR 计划	286
3.2.4	哈萨克斯坦材料测试托卡马克(KTM)	288
3.2.5	月球开采燃料计划	289
3.3	中国	289
3.3.1	中国的聚变发展战略	289
3.3.1.1	近期目标	289
3.3.1.2	中期目标	290
3.3.1.3	远期目标	291