



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

工程硕士教育 核能与核技术领域 发展报告

全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

工程硕士教育 核能与核技术领域 发展报告

全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容提要

本书是全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组受全国工程硕士专业学位教育指导委员会委托而编写的,着重反映了核能与核技术领域的最新学术成果、发展动态和发展态势,对提高核能与核技术领域工程硕士研究生的教学水平,帮助他们扩大视野,活跃思维,将起到积极作用。

本书集研究、资料和探索汇编于一体,共包括了10个专题。在逻辑上,全书共分为四大部分。第一部分,即第1章,属综合篇,概要描述了新中国成立以来核能与核技术的发展和研究趋势;第二部分包括了第2章、第3章和第9章,属核能篇,简洁描述了新中国建国初期二弹一艇工程基础上动力堆技术拓展至核电(能)的发展和研究态势,着重描述了第4代先进堆型——高温气冷堆的发展态势,以及未来能源——磁约束核聚变能的发展状态;第三部分包括第4章、第5章、第6章、第7章和第8章,属核技术的大科学工程篇,比较全面地描述了改革开放以来一批国家大科学工程的发展、研究状态与趋势;第四部分,即第10章,属民用核技术篇,综合描述了新中国建立以来小型民用核技术事业的发展状态。核能与核技术领域的发展态势,说明此领域不仅仅与基础科学研究发展息息相关,也与国民经济和民众生活紧密相关。因此,本书可誉为是在核能与核技术领域工程硕士教育快速发展背景下一本新的核能与核技术领域比较完整的发展状态与趋势的资料,具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工程硕士教育核能与核技术领域发展报告 / 全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组编著. —杭州:浙江大学出版社, 2011.8

ISBN 978-7-308-08959-3

I. ①工… II. ①全… III. ①核能—研究生—教材
②核技术—研究生—教材 IV. ①TL

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第157970号

工程硕士教育核能与核技术领域发展报告

全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组 编著

丛书策划 樊晓燕

责任编辑 樊晓燕

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 富阳市育才印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 22.50

字数 548千

版印次 2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

书号 ISBN 978-7-308-08959-3

定价 58.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

编 委 会

- 顾问** 顾秉林(中国科学院院士,全国工程硕士专业学位教育指导委员会主任委员)
谢和平(中国工程院院士,全国工程硕士专业学位教育指导委员会副主任委员)
- 主任** 陈子辰(教授,全国工程硕士专业学位教育指导委员会副主任委员)
- 副主任** 印 杰(教授,全国工程硕士专业学位教育指导委员会委员)
史铁林(教授,课程建设研究小组成员、华中科技大学机械学院)
- 成 员** (以姓氏笔画为序)
李建东(课程建设研究小组成员,西安电子科技大学研究生院)
沈 岩(课程建设研究小组成员,清华大学研究生院)
杜振民(课程建设研究小组成员,北京科技大学材料学院)
巫世晶(课程建设研究小组成员,武汉大学研究生院)
严晓浪(课程建设研究小组成员,浙江大学信息科学与工程学院)
章丽萍(课程建设研究小组成员,浙江大学研究生院)
廖文武(课程建设研究小组成员,复旦大学研究生院)

《工程硕士教育核能与核技术领域发展报告》

主要编著者名单

(以姓氏笔画为序)

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 马大国(中国原子能科学研究院) | 李 富(清华大学) |
| 万元熙(中国科学院等离子物理研究所) | 刘祖平(中国科学技术大学) |
| 王相纂(中国科学技术大学) | 秦 庆(中国科学院高能物理研究所) |
| 王秋平(中国科学技术大学) | 夏佳文(中国科学院近代物理研究所) |
| 邓建军(中国工程物理研究院) | 唐靖宇(中国科学院高能物理研究所) |
| 李为民(中国科学技术大学) | 裴元吉(中国科学技术大学) |

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

总 序

2010 年国家颁布的《国家中长期教育改革和发展规划纲要》强调高等教育的核心任务是提高教育质量,并且提出要大力发展专业学位研究生教育。全国工程硕士专业学位教育指导委员会(以下简称教指委)高度重视、不断推进工程硕士专业学位研究生教育的质量建设。教指委课程建设研究组在加强公共课程、领域核心课程建设的同时,于 2010 年启动编写工程硕士教育“工程领域发展报告”(以下简称“工程领域发展报告”)系列丛书的工作,旨在帮助广大工程硕士研究生(或高级工程技术人员)拓展知识、扩大视野、活跃思维和提升集成创新能力,进一步完善培养应用型、复合型和创新型的高层次工程技术人才的教学体系,更好地满足国家产业创新发展、企业提升核心竞争力的需求。

一、编印工程领域发展报告系列丛书的背景情况

工程硕士是与工程领域任职资格相联系的专业性学位,与工学硕士学位处于同一层次,但类型不同,各有侧重。长期以来,各培养单位已比较重视工学硕士研究生学术前沿课程的建设。但是,在工程硕士研究生的培养中,工程技术最新发展方面的课程、讲座、教材却比较薄弱。尽快提高工程硕士研究生工程技术前沿方面的教学质量,已成为各培养单位十分迫切的需求。

二、工程领域发展报告系列丛书的特点

工程领域发展报告主要针对本领域的发展现状和发展趋势,为工程硕士研究生前沿课程(或讲座形式)提供相关的最新动态,以利于工程硕士研究生了解领域的工程科技的发展现状和动态,以拓宽视野,为其扩展知识和能力提供帮助。

1. 共性原则

工程领域发展报告应是对本工程领域最新技术成果的描述,着重提炼出本领域具有共性的工程技术问题和工程应用进展。

2. 特色原则

工程领域发展报告应坚持工程特色,着重体现工程的综合性、应用性等特点。

3. “新、短、快”原则

工程领域发展报告着重反映本领域最新技术成果、发展动态和发展趋势,对工程硕士研究生教学应具有参考性,对工程硕士研究生学习应具有启发性。同时,工程领域发展报告篇幅不宜过长,编印应及时快速。

4. 可读性原则

工程领域发展报告将作为各培养单位、各工程领域的教学用书和阅读文献,并送全国工

程硕士专业学位教育指导委员会成员、中国工程院教育委员会成员、学术界、工业界、政府部门的有关专家学者、领导参阅。因此,该报告表述应准确、简练,并具有一定的可读性。

三、工程领域发展报告系列丛书的主要内容

工程领域发展报告,既是教学用书,又是课堂的延伸。其主要内容应体现我国科技和产业中长期发展规划,体现国家的重大需求,体现工程领域新进展和技术新进步。具体应集中体现在科学研究、技术开发与工程应用三个方面,特别应注重技术及技术向工程的转化上,以符合工程硕士研究生的培养需求。

科学研究应集中在领域相关的最新研究进展方面,特别是具有潜在工程价值的科研成果。

技术开发主要介绍中短期有望实现产业化的高科技技术。

工程应用主要包括国内外最新的工程技术成果,特别是同国家重大需求相关的重大工程技术成果,所涉及的领域应该有较宽的覆盖面。

由于工程领域发展报告覆盖的面比较宽,不可能将所有的技术领域都涉及。因此,每册工程领域发展报告一般选择一些重点领域若干方向进行撰写,由各工程领域教育协作组长负责组成编写组。编写组成员邀请本领域若干位具有较高水平的教授以及相关行业、企业的知名专家参加。

为了加强统筹规划和具体实施,认真做好“工程领域发展报告”的编写出版工作,教指委专门成立编写委员会。编委会主任由教指委副主任委员兼课程建设研究小组组长陈子辰教授担任,编委会委员由陈子辰(浙江大学)、印杰(教指委委员兼课程建设研究小组副组长、上海交通大学)、史铁林(课程建设研究小组副组长、华中科技大学)、沈岩(教指委秘书兼课程建设研究小组成员、清华大学研究生院)、章丽萍(课程建设研究小组成员、浙江大学研究生院)等组成。希望本书能够为我国从事工程硕士专业学位研究生教育教学工作的师生提供有益的参考,也为广大工业界、政府部门的有关专家学者、领导架设交流的桥梁。由于编辑出版“工程硕士教育工程领域发展报告”,在我国专业学位研究生教育中尚无先例,是一项探索性工作,难免存在不当和疏漏,敬请专家、同行和广大读者批评指正。

本系列丛书的出版,得到了浙江大学出版社的大力支持,在此表示衷心感谢!

全国工程硕士专业学位教育指导委员会
工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

编委会

2011年3月1日

前 言

自 1996 年我国推出工程硕士专业学位教育制度以来,专业学位的教育取得了很大成功,深受业界欢迎。工程硕士是与工程领域任职资格相联系的专业性学位,与工学硕士学位处于同一层次,但类型有别,各有侧重。长期以来,各培养单位比较偏重于工学硕士研究生学术前沿课程的建设。但是,工程硕士研究生的教育培养中,工程技术和管理等有关方面的最新发展课程、讲座和教材等却比较薄弱,尽快全面提高工程硕士研究生前沿方面的教学质量,已成为各培养单位十分迫切的需求。为此,全国工程硕士专业学位教育指导委员会委托各工程领域教育协作组编写各领域发展报告。

核能与核技术领域自 2000 年开始招收非脱产工程硕士研究生以来,经过数年发展逐渐形成规模,已招收 882 名非脱产工程硕士研究生和相当数量的脱产全日制工程硕士研究生。目前有 15 所培养单位拥有此领域工程硕士专业学位授予权,招生录取研究生的百分位高居各领域榜首。随着核电(能)与核技术领域的快速发展,领域内工程硕士教育将有新的局面。此《工程硕士教育核能与核技术领域发展报告》(以下简称《发展报告》),着重反映了我国核能与核技术领域的最新学术成果、发展动态和发展趋势,对提高核能与核技术领域工程硕士研究生的教学水平,帮助他们了解国情、扩大视野、活跃思维,将起到积极的推动作用。

由于篇幅有限,我们首次编写涉及了能够公开发表的 10 个专题的工程发展报告:第 1 章,综述中国核技术工程前沿进展,由李为民研究员与王相綦研究员撰写;第 2 章,核裂变能工程发展报告,由马大园研究员撰写;第 3 章,磁约束聚变工程发展报告,由万元熙院士撰写;第 4 章,对撞机工程发展报告,由秦庆研究员撰写;第 5 章,同步辐射光源工程发展报告,由刘祖平研究员与王秋平研究员撰写;第 6 章,感应直线加速器工程发展报告,由邓建军研究员撰写;第 7 章,重离子加速器工程发展报告,由夏佳文研究员撰写;第 8 章,散裂中子源工程发展与高功率质子加速器进展报告,由唐靖宇研究员撰写;第 9 章,高温气冷堆工程进展报告,由李富研究员撰写;第 10 章,我国低能加速器工程应用发展报告,由裴元吉研究员撰写。国内核能与核技术工程领域的许多方向的发展,由于各种因素尚未包括在内。好在教指委课程建设组已经要求,三年后根据国内发展态势重新组织编写新的发展报告。因此,我们希望此发展报告能够起到抛砖引玉的作用。

《发展报告》是在全国工程硕士专业学位教育指导委员会的指导下,由全国核能与核技术领域工程硕士教育协作组牵头组织,浙江大学出版社出版的。具体由李为民负责统筹规划,由领域内 12 位学者负责主持,并由学者所在单位有关学者支持下完成的。在此,对所有支持者的知识贡献和辛勤劳动表示感谢!

由于人类安全和能源的需求,核能与核技术领域是近百年来一门蓬勃发展并仍在继续快速进步的学科,其理论、方法、体系和实践应用等也还在持续完善中,加之编印领域发展报告的首创性、参编专家工作范围的局限性、编写时间的紧迫性,虽然我们竭尽所能,但难免有不够成熟甚至错误之处,欢迎广大读者批评指正,提出宝贵建议。

目 录

第 1 章 中国核技术工程前沿进展——综述	1
1.1 新中国建立初期二弹一艇工程的发展	1
1.2 中国核电(能)工程的发展	4
1.3 改革开放促进了我国核能与核技术领域民用工程的发展	5
1.4 中国先进核反应堆工程的发展	7
1.5 中国磁约束聚变工程的发展	9
1.6 我国高能物理装置(工程)向国际领先水平发展	11
1.7 我国核物理装置(工程)及应用进入国际前列	14
1.8 我国同步辐射装置(工程)应用进入国际先进行列	15
1.9 我国核能与核技术领域工程发展与教育进入新时代	19
第 2 章 核裂变能工程的发展	20
2.1 核裂变和裂变能的应用	20
2.2 核燃料循环	23
2.3 我国核反应堆工程的发展	30
2.4 核电厂	39
第 3 章 中国磁约束聚变工程进展	46
3.1 核聚变和聚变能源	46
3.2 磁约束聚变实验装置托卡马克	52
3.3 中国磁约束聚变研究进展	58
3.4 国际热核聚变实验堆	73
3.5 总 结	77
第 4 章 北京正负电子对撞机工程进展	79
4.1 加速器及高能物理需求	79

4.2	北京正负电子对撞机的历史	89
4.3	北京正负电子对撞机	95
4.4	北京正负电子对撞机重大改造工程	105
4.5	结语	112
第5章	中国同步辐射光源工程进展	114
引	言	114
5.1	中国同步辐射光源工程概况	115
5.2	约10年来发展迅速的新技术	122
5.3	NSRL二期工程新技术	126
5.4	BEPC II工程新技术举例	130
5.5	SSRF工程新技术举例	135
5.6	光束线	141
5.7	光束线发展的四个阶段	144
5.8	NSRL光束线阶段	146
第6章	中国直线感应加速器工程进展	160
6.1	直线感应加速器工程概述	160
6.2	脉冲功率技术与系统工程设计	165
6.3	神龙一号直线感应电子加速器工程简介	181
6.4	中国电子感应加速器应用进展	188
第7章	中国重离子加速器工程发展及其应用	193
7.1	兰州重离子加速器的发展	193
7.2	CSR的主要系统及束流冷却	198
第8章	中国散裂中子源工程进展与高功率质子加速器发展态势	219
8.1	高功率质子加速器的国内外发展简介	219
8.2	高功率质子加速器的物理问题	223
8.3	高功率质子加速器的主要技术问题	235
8.4	中国散裂中子源工程	239
8.5	ADS及应用前景	252
第9章	中国高温气冷实验堆工程进展	260
9.1	高温气冷堆的特点	260

9.2	高温气冷堆的发展历史	264
9.3	典型的高温气冷堆	267
9.4	高温气冷堆的国际发展现状	287
9.5	高温气冷堆的应用领域	290
9.6	高温气冷在中国的发展	292
9.7	中国高温气冷堆核电站重大专项	299
9.8	结束语	303
第 10 章	中国低能加速器工程发展	307
10.1	引 言	307
10.2	低能加速器工程	315
10.3	低能加速器的应用	323

第1章 中国核技术工程前沿进展

——综 述

中国科学技术大学 国家同步辐射实验室
核科学技术学院
李为民^① 王相慕^②

1.1 新中国建立初期二弹一艇工程的发展

新中国核科学与技术是在一穷二白的基础上起步的。旧中国有两个核科研机构^[1]，一个是抗日战争结束后不久在南京中央物理研究所刚刚设立的原子核物理实验室。该机构只有吴有训、赵忠尧(在美国)、李寿枏等5名科技人员。另一个是在北平研究院镭学研究所基础上成立的原子学研究所，该机构只有钱三强、何泽慧和另一名科技人员。新中国的第一个核科学技术研究机构——中国科学院近代物理所^[1]，就是1950年5月19日由原北平所和原中央研究院物理所的一部分合并而成的(所址见图1.1)。该所由吴有训兼任所长、钱三强任副所长(@ www.ihep.cas.cngkjlsg/)。1953年10月6日，中国科学院决定将近代物理所改名为“中国科学院物理研究所”。



图1.1 中国科学院近代物理所原址(北京东皇城根甲42号)^[2]

核事业起步初期，科研人员只有10人左右。为加快发展我国的核科学与技术，在中央政府的支持下，一方面争取国内的科学家、教授和技术人员调入新所^[1]，如王淦昌、忻贤杰

① 李为民，研究员、博导，长期从事加速器物理与技术研究工作，现任全国核能与核技术工程领域教育协作组组长，中国科大国家同步辐射实验室副主任，中国科大核科学技术学院副院长。

② 王相慕，研究员、博导，长期从事加速器物理与技术研究工作，担任核能与核技术领域课程讲授。

(浙大)、彭桓武、金建中(清华)、黄祖洽、李德平、于敏等;另一方面争取海外的中国科学家^[1]归国工作。从1950年起前后六七年时间,先后有赵忠尧、郭挺章、邓稼先、金星南、杨承宗、杨澄中、肖健、戴传曾、李整武、张文裕、王承书、郑林生、朱洪元、胡宁、汪德昭、肖伦等学者归国加入新所。这些学者以及以后陆续归国的一批学者,奠定了新中国核能与核技术工程领域起步初期的高级人才团队,他们先后成为新中国核科学与技术的科研、教育与工程发展的组织者与领军人。

在第一个五年计划期间,国家确立了原子能应用(工程)为我国核科学技术最初发展方向^[1,2]。1955年1月15日毛泽东主席主持召开中共中央书记处扩大会议,讨论并决定建设原子能工业,毛泽东就此作了重要讲话^[2],李四光、刘杰、钱三强列席了会议。1955年7月4日中央批文指示^[2],凡有关原子能的事务由中央指定的三人小组(陈云、聂荣臻、薄一波)进行指导。1956年11月16日,第一届全国人大常委会第51次会议通过决定^[2],设立中华人民共和国第三机械工业部,主管核工业的建设和发展工作,宋任穷任部长。1958年2月11日,第一届全国人民代表大会第5次会议决定^[2],将第三机械工业部改名为第二机械工业部(后文简称二机部)。中国科学院近代物理所最初确立的研究方向^[1]是理论物理、原子核物理、宇宙线和放射化学,到中央决定发展原子能工业后则明确调整为:以原子核物理研究为中心,充分发展放射化学,为原子能应用(工程)准备条件。

1958年6月21日,毛泽东主席在中共中央军事委员会扩大会议上说^[2]：“搞一点原子弹、氢弹、洲际导弹，我看有十年工夫完全可能。”在此之前的1955年8月17日，中苏两国政府签订了关于苏联援助中国建设原子能工业的协定^[2]。1958年5月31日，中共中央总书记邓小平批准^[2]二机部上报的“五厂三矿”(衡阳铀水冶厂、包头核燃料元件厂、兰州铀浓缩厂、酒泉原子能联合企业、西北核武器研制基地，以及郴县铀矿、衡山大浦铀矿、上饶铀矿)选点方案。我国核工业布局起步。为了独立自主地发展原子能应用(工程)，1958年7月1日，成立原子能研究所^[3]，在坨里建立新的研究基地(二部)，中关村(物理研究所)为一部。由二机部、中国科学院双重领导，以二机部为主。此后，从事核科学与技术的研究机构与应用工程的单位日趋增加，其中直接从原中国科学院近代物理所(北京)或原子能研究所建制划出，或者调出科技人员援建新单位的，就有中国工程物理研究院、中科院近代物理研究所(兰州)、中科院高能物理研究所、中科院上海原子核研究所(现更名为上海应用物理研究所)、中国辐射防护研究院、核工业理化工程研究院、西南物理研究院、反应堆工程研究设计院、核工业北京冶金冶金研究院、202厂、856厂等。其中，早在1957年4月中国科学院物理研究所选派杨澄中等20名科技干部到兰州组建中国科学院兰州物理研究室；次年国家第二机械工业部抽调技术干部组建中国科学院613工程处，筹建1.5 m回旋加速器装置；1962年1月，兰州物理研究室与613工程处合并组建新的中国科学院近代物理研究所(兰州)，以第二机械工业部领导为主，1973年3月划归中国科学院领导。位于上海的中国科学院上海应用物理研究所，1958年开始筹建，1959年正式建所称为中国科学院上海理化研究所，首任所长为苏平；曾更名为中国科学院上海原子核研究所，2003年改用现名。

新中国的最初10年中，为了加快原子能应用人才需求，在清华大学、西安交通大学、哈尔滨军事工程学院、哈尔滨工业大学等大学组建了与核科学与技术教育相关的系与专业。这些大学新设置的与原子能应用工程有关的专业，开始新中国自己培养原子能科学技术生力军的历史。1958年，在钱学森与郭永怀等科学家提议下，经邓小平总书记签字批准，中国

科学院在北京玉泉路组建了中国科学技术大学,建立了与原子能应用(工程)有关的三个系与六个专业:原子核物理与原子核工程系(赵忠尧任系主任),物理热工系(吴仲华任系主任)和放射化学与辐射化学系(杨承宗任系主任)。在此时期,在一大批大学中建立了与核事业发展相关的专业。

新中国的核科学与技术发展,是自力更生,自己动手,一切从零开始。早期研究人员^[1],有的在北京天桥、上海外滩等市场或旧货摊上寻找和购买旧的电子元件器材,改装成科研设备;赵忠尧用自己的积蓄在美国购买了30余箱加速器部件和科研器材,建成了我国第一台静电加速器(编者注:赵忠尧先生从美国带回的小型加速器现在是中国科学技术大学赵忠尧纪念馆的展品);杨承宗、杨澄中分别从法国、英国用国家批的外汇购买了一部分器材,杨承宗还带回了居里夫人作为对中国人民发展核科技事业的一点心意而赠送给他的含微量镭的标准源;肖健用黄蜡提炼真空封蜡;金建中研制成功各种抽速的金属油扩散泵,成为我国金属油扩散系的最初起源。

在新中国成立初期的头10年内,就取得了一批有意义的基础性的研究成果^[1],为我国的核科学与技术发展创造了许多“第一”。在原子核物理和宇宙线方面,建成了大气型质子静电加速器(赵忠尧、杨澄中)、高压型质子静电加速器(赵忠尧、李整武)、质子灵敏乳胶和电子灵敏乳胶(何泽慧)、卤素计数管、盖革计数管等(戴传曾、李德平)、高山宇宙线实验室(王淦昌、肖健);在谱仪和核电子学方面,建造了单透镜 β 谱仪、 α 谱仪(梅镇岳、郑林生),研制成一批真空管型核电子学型仪器(杨澄中、忻贤杰);在放射化学方面,完成了铀等天然放射性元素的提取、纯化、分析和测定(杨承宗),完成了重水和高纯石墨的研制(郭挺章),制备出成克级较高纯度的氧化铀、公斤级操作水平的脉冲萃取柱(杨承宗);在理论核物理方面,在开展原子核物理及基本粒子研究的同时,注意到反应堆、同位素分离、受控热核反应等应用性理论研究工作(王淦昌、朱洪元)。

核科学与技术发展的早期,国内已经能够设计制造不同类别高压型加速器装置。1958年7月1日我国研究性重水反应堆和回旋加速器建成,为此《人民日报》发表消息和社论。同年1.5 m经典回旋加速器工程^[4]开始筹建。1.5 m经典回旋加速器工程改建后,能够进行轻核反应实验研究,为我国氢弹的研制做出了贡献。

新中国建立初期原子能应用(工程)发展的动力来源于国家安全的需求。1959年6月后不久,周恩来向宋任穷传达中央决定^[2]:“自己动手,从头摸起,准备用八年时间搞出原子弹。”我国在极其困难的条件下,领域内的科技人员和广大工人干部,刻苦攻关,为我国“两弹一艇”研制做出了重大贡献^[1]。工程科技人员结合原子弹的设计研制开展技术攻关,测量裂变反应数据,测量部件加工过程物理参数,建立放射性测量方法和标准,建立核燃料分析方法和系统,确立铀矿成因机理与开采方法,确立铀矿选冶机理与方法等,在六氟化铀制备、铀提纯工艺过程分析、分离膜技术攻关、点火中子源部件研制、燃耗测定技术等工程课题做出系列成果。1960年11月18日,国内铀纯化厂生产出第一批符合纯度要求的二氧化铀产品^[2];1963年11月20日,西北核武器研制基地成功地进行了整体聚合爆轰出中子试验^[2]。1963年11月29日,国内六氟化铀工厂生产出第一批合格产品^[2]。1964年1月14日,国内铀浓缩厂取得了高浓铀合格产品^[2]。1964年10月16日,中国第一颗原子弹在中国西部爆炸成功^[2]。这次核试验是当天15时(北京时间)在中国西部地区进行的。同日,中共中央和国务院联名致电参与首次核试验的全体人员和一切从事国防建设的同志们,热烈祝贺第一

次核试验成功的巨大胜利^[2]。贺电指出,首次核试验的成功,标志着中国国防现代化进入了一个新阶段。这对美帝国主义核垄断、核讹诈的政策是一个有力的打击,对全世界一切爱好和平的人民是一个极大的鼓舞。当年 10 月 22 日,《人民日报》就中国第一颗原子弹爆炸成功发表题为《打破核垄断,消灭核武器》的社论。

值得一书的另一个重大贡献,是科技人员和广大工人干部为首枚氢弹研制做的工作。第一枚原子弹爆炸不久,何泽慧挂帅小组^[1]经过四个半月苦战完成反应截面数据的系统测量,杨楨小组^[1]完成氘截面测量,赵忠尧^[1]等人完成锂反应截面测量和中子在²³⁸U 上次级中子数测量,黄祖洽、于敏小组^[1]完成了氢弹各种物理过程、作用原理和可能结构的研究,丁大钊小组^[1]完成了轻核反应截面数据调研及测量方法技术准备。1966 年 5 月 9 日,我国进行了一次含有热核材料的核试验。1967 年 6 月 17 日 8:20,我国西部地区新疆罗布泊上空空投的首枚威力达 330 万吨梯恩梯当量的氢弹试验获得完全的成功。另外值得一提的是,为氢弹结构设计做出重要贡献的郭永怀同志,在氢弹爆炸后第二年因公牺牲,国家民政部授予他烈士称号。

第三个值得一提的重大贡献是科技人员和广大工人干部为中国国防战略性装备核潜艇研制做的工作。1960 年以后彭士禄团队完成了首个船用动力堆初步设计^[1],启动了堆芯系统主要部件设计,进行并完成了为核潜艇研制所配套的反应堆、热工水力学、结构材料及其他相关的各项研究任务。1971 年 9 月我国第一艘核潜艇成功下水。目前,核潜艇已经成为我国国家安全、和谐发展、和平崛起的重要保障。

1.2 中国核电(能)工程的发展

两弹一艇工程的进步推动了民用核电(能)工程的发展。动力堆技术发展的另一处重要贡献是拓展动力堆技术^[2]。领域内科技人员和广大工人干部团结协作,自行设计、自己建造、自主运行管理的首座 30 万 kW 压水堆核电站——秦山核电厂,1985 年 3 月浇灌第一灌混凝土,1991 年 12 月首次并网发电,结束了中国大陆无核电的历史,实现了中国大陆核电的零突破,是中国和平利用核能的典范,我国是世界上第七个能够自行设计、自行建造核电站的国家。秦山核电厂电功率 310 MW 的核电机组长期安全运行,已经产生了良好的经济效益和社会效益,目前秦山核电基地已经拥有三个核电企业公司:秦山核电厂,秦山第二核电厂(4 台电功率 650 MW 压水堆机组分别于 2002 年 2 月 6 日至 3 月 11 日并网发电,以及于 2006 年 4 月 28 日和 2007 年 1 月 28 日开工),秦山第三核电厂(2 台电功率 700 MW 重水堆机,分别于 2002 年 11 月 19 日和 2003 年 12 月 16 日并网发电),方家山核电工程(秦山核电厂扩建项目,1086 MW 压水堆机组,2008 年 12 月 26 日开工)。秦山核电基地隶属于中国核工业集团公司(简称中核集团)。中核集团是经国务院批准组建、中央直接管理的国有核工业骨干企业。中核集团公司拥有完整的核科技工业体系,由所属的 100 多家工业企业和事业单位与科研院所组成,现有员工约 10 万人,其中专业技术人才达 3.6 万人,中国科学院、工程院院士 17 人;主要承担核动力、核材料、核电、核燃料、乏燃料和放射性废物的处理与处置、铀矿勘查采冶、核仪器设备、同位素、核技术应用等核能及相关领域的科研开发、建设与生产经营,对外经济合作和进出口业务;与世界 40 多个国家和地区有科技经济往来。目前的中核集团,核电运行机组达到 13 台,装机容量超过 1000 万千瓦,在建与经国家

批准正式开展前期工作的有7个核电新项目与20台机组。2000年6月,出口巴基斯坦的恰希玛300 MW核电机组并网发电,使我国成为世界第7个具备成套出口核电机组能力的国家。2005年出口巴基斯坦的恰希玛二期核电项目成功启动,目前工程建设进展顺利,并与巴基斯坦签署了新的核电建设协议。(@www.cnncc.com.cn/publish/portal0/tab432/)

大亚湾核电厂位居中国南海之滨、我国首个开放特区广东省深圳特区的大亚湾,是利用法国技术建设发展的。大亚湾核电厂2台压水堆机组并网发电后,我国另一个核电集团中国广东核电集团有限公司(简称中广核集团公司,或中广核集团)1994年9月注册成立,初期注册资本102亿元人民币。中广核集团现拥有大亚湾核电厂2台机组、岭澳核电厂3台压水堆机组,共5033.6 MW运行功率(大亚湾 2×983.8 MW,1994年2月1日至5月6日投产;岭澳 2×990 MW,2002年5月28日与2003年1月8日投产;岭澳2期1086 MW CPR1000,2010年9月15日投产),国家批准的19台核电机组中有16台已经开工建设,尚有6台核电机组正在开展前期工作。除了台山核电厂采用1750 MW EPR三代压水堆核电机组以外,多数采用类似岭澳2期已经投产的国产化的CPR1000核电机组。截至2011年1月底,中广核集团拥有总资产约2025亿元人民币,净资产约627亿元人民币,净资产是集团成立初期32.4亿元的19倍,有效实现了国有资产的保值增值。(@www.cgnpc.com.cn/n2881959/n3065905/n3067683/index.html)

正在浙江三门核电厂建设的2台核电机组,是三代核电机组AP1000的招标自主化依托项目之一,2009年4月19日开工,是中国核工业集团公司控股的核电厂。三门核电对于国家引进三代核电技术战略的成功至关重要。当前,三门核电正在全力推进各项工作,确保核电三代示范工程良好发展,为后续工程的顺利实施奠定基础。位于山东海阳核电厂的2台核电机组,也是三代核电机组AP1000的招标自主化依托项目之一。2007年12月26日海阳核电1期工程被批准开工,同月31日正式启动。2009年12月28日海阳核电1期工程正式开工。海阳核电厂规划建设6台百万千瓦级压水堆机组,留有2台扩建余地,总装机容量8700 MW。三门核电厂与海阳核电厂三代核电机组AP1000的核电技术引进、工程建设和自主化发展,是由2007年5月22日组建的国家核电技术公司负责的。国家核电技术公司主要从事第三代核电AP1000技术的引进、消化、吸收、研发、转让、应用和推广,通过自主创新,形成自主品牌核电技术;组织国内企业实现技术的公平、有偿共享;承担第三代核电工程建设、技术支持和咨询服务以及国家批准或授权的其他方面的业务。

在动力堆发展早期,铀-235生产线的系列相关技术攻关,如生产堆元件材料及部件的堆辐照考验、次临界考验、水腐蚀试验、传热及水力阻力试验、回路设计及堆内试验、元件检验及性能评价、氟靶元件设计和材料试验等,如后处理厂萃取法工艺流程,如临界安全研究(彭桓武、阮可强)等均取得重要成果,在工程中得以应用。

1.3 中国核能与核技术领域民用工程的发展

两弹一艇工程的进步,也促进了我国核能与核技术领域民用工程的发展。除了动力堆技术拓展至核电(能)工程以外,核技术工程的其他领域,如电磁分离器的研制与第一批稳定同位素的生产、电子直线加速器的研制、宇宙线高山实验室的建立、研究强子结构的“层子模型”的发现、中子散射能谱测量等均取得重要进展^[3]。上世纪60年代,国产首台30 MeV电

子直线加速器工程在谢家麟的主持下完成^[3]。1956年到1965年期间,我国派出六七十名科学家前往设在苏联杜布纳的联合核子研究所,与前社会主义阵营国家的物理学家合作开展高能物理研究,先后由王淦昌、张文裕带队^[3]。1964年,王淦昌小组发现反西格马负超子的工作是这一时期取得的最突出的研究成果^[2,3]。图1.2所示照片为在杜布纳的部分中国学者合影。



图1.2 在杜布纳工作的部分中国学者合影

“文革”期间,科技人员身处逆境,忍辱负重,继续开展了直接与国防和核工业有关的重点科研工程,如氢弹和核潜艇研制的核数据测量及核数据编评、氢弹燃耗测定,核武器研制所需要的电子仪器和各种探测器的生产,核潜艇动力堆的堆物理、热工水力、堆安全、屏蔽计算与实验、元件堆内考验及辐照后检验,人造卫星所需要的晶体探测器、高纯氦-3的研制及元件、部件辐照考验、同位素热源(核电池)的生产,洲际导弹再入时等离子鞘的研究,生产堆后处理三循环改二循环热试验及分析测量方法研究,等等,为我国核科学与技术持续发展做出重要贡献^[1]。

在艰难发展原子能应用(工程)的“文革”后期,国家决定启动与高能物理研究有关的高能加速器工程建设^[3]。1972年8月张文裕等18位科技工作者给周恩来总理写信反映了发展高能物理研究的意见和希望。周恩来总理复张文裕、朱光亚信,指示:“这件事不能再延迟了。科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时又要将理论与科学实验结合起来。高能物理研究和高能加速器的预制研究,应该成为科学院要抓的主要项目之一。”1973年2月1日原二机部和中国科学院在《关于高能物理研究和高能加速器预制研究的报告》中提出,在原子能研究所一部的基础上成立中国科学院高能物理研究所,领导体制由二机部移交中国科学院,首任所长张文裕。我国高能物理研究走向世界的新历程开始启动。

1977年全国科学大会的召开,开启了核科学与技术发展的新时代,核技术工程以新的面貌在我国东西南北继续发展。在继续开展国防科研、核基础科研与核能技术研究的同时,大力开展核应用技术与工程建设,取得了一批重要的研究成果,建立一批新的核技术工程装置,形成了以同位素技术应用、辐照技术应用、裂变反应堆技术应用、加速器技术应用、核探测技术应用、聚变反应堆技术应用为主的工程装置为基地的技术应用,产生了良好的经济效益和社会效益,为核技术工程继续创业做出了新的贡献。其中在1986年5月,我国第一个大型串行式静电加速器核物理实验室^[2],在中国原子能科学研究院建成。

改革开放以来,我国进入了国家大科学与工程发展的新时代。

1.4 中国先进核反应堆工程的发展

上世纪60年代中期中国原子能研究所就启动了快堆研究课题。“863”计划将快堆项目列入能源反应堆主题项目后,中国原子能科学研究院推进快堆的前期技术研究^{[5]①}。1995年12月国家批准快堆工程立项^[5],1997年8月快堆研究又被批准为“863”计划重大项目,2006年快堆作为前沿技术列入国家中长期科技发展规划^[5]。2007年12月国家确定了中国实验快堆工程“十一五”的建设目标及项目经费和工程投资。中国实验快堆工程(见图1.3),1998年10月开始主厂房负挖^[5],2000年5月国家核安全局颁发建造许可证后开工^[5],2002年8月实现了反应堆主厂房封顶^[5],2005年8月开始堆本体安装^[5],2008年12月完成全部安装并开始调试^[5],2009年8月完成了装料前的全部准备工作并于9月获得国家核安全局颁发的装料许可证^[5],2010年6月5日开始装料^[5],2010年7月21日首次临界^[5]。预计2011年6月并网发电试验。中国实验快堆^[5],热功率65 MW,电功率20 MW,池式结构,首炉使用 UO_2 燃料并最终过渡到MOX燃料,液态金属钠冷却剂,采用三回路热传输结构,完全依靠设置在一回路的非能动事故余热排出系统排出事故工况下的余热属于世界上首次,符合世界快堆发展趋势,主要参数和系统设置接近商用快堆,具备了大部分原型快堆的一些结构特点,适于向商用快堆电站跨越,其安全特性指标已达到第四代先进核能系统的要求。中国实验快堆由13大类200多个子系统组成。工程建筑面积4.7万平方米,建筑子项16个。通过中国实验快堆工程的自主设计和建造,我国已形成实验快堆规模的快堆设计、建造、调试和运行能力,为下一步商用快堆电站的开发奠定了基础。按照国家要求,在“十一五”末建成我国第一座快堆,取得快堆技术上的突破,实现“建立装置,掌握技术,培养人才,开展实验”的建堆目标。通过项目实施,我国目前已经掌握快堆大部分核心技术^[5],

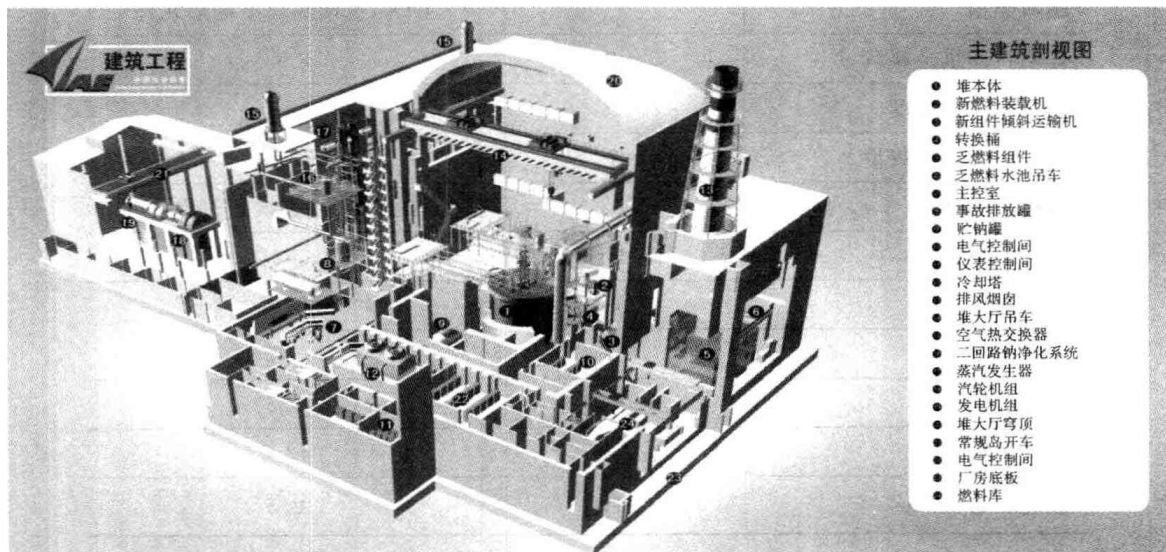


图 1.3 中国实验快堆主建筑剖视图^[5]

① 周培德研究员(中国实验快堆副总工程师)提供。