



2007-2008

# 核科学技术 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国核学会 编著

2007-2008



 中国科学技术出版社



2007-2008

TL  
ZHX  
2007-2008

# 核科学技术 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY

中国科学技术协会 主编

中国核学会 编著



中国科学技术出版社

· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

核科学技术学科发展报告:2007—2008/中国科学技术协会主编;  
中国核学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2008.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-4867-9

I. 核… II. ①中…②中… III. 核技术—技术发展—研究报告—  
中国—2007—2008 IV. TL-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 017811 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京中科印刷有限公司印刷

\*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:14 字数:333 千字

2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—3500 册 定价:37.00 元

ISBN 978-7-5046-4867-9/TL·2

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、  
脱页者,本社发行部负责调换)

2007—2008  
核科学技术学科发展报告  
REPORT ON ADVANCES IN NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY

首席科学家 王乃彦

课题负责人 熊朝智 姚瑞全

专家组成员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王传英 | 石永康 | 任永岗 | 刘振华 | 孙东辉 |
| 池雪丰 | 汤搏  | 张天爵 | 张禄庆 | 李子颖 |
| 李开文 | 肖雪夫 | 苏著亭 | 陈世齐 | 罗上庚 |
| 罗志福 | 郑华铃 | 柳卫平 | 赵凤民 | 唐洪庆 |
| 夏海鸿 | 徐铎  | 聂玉光 | 顾忠茂 | 常学奇 |
| 黄国俊 | 傅满昌 | 董玉杰 | 蒋云清 | 潘传红 |
| 信萍萍 | 张锐平 | 王勇  | 张海青 | 王文盛 |
| 陆燕  | 冯焘  | 张雪  | 吴洋  | 张国庆 |

编写组成员

学术秘书 张锐平

# 序

基于我国经济社会发展和国际竞争态势的客观要求,党中央、国务院做出增强自主创新能力、建设创新型国家的战略部署。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的科学基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面,是国家科技竞争力的标志。在科学技术繁荣、发展的过程中,传统的自然科学学科得以不断深入发展,新兴学科不断产生,学科间的相互渗透、相互融合的趋势不断增强;边缘学科、交叉学科纷纷涌现,新的分支学科不断衍生,科学与技术趋向综合化、整体化。及时总结、报告自然科学的学科最新研究进展,对广大科技工作者跟踪、了解、把握学科的发展动态,深入开展学科研究,推进学科交叉、融合与渗透,推动多学科协调发展,促进原始创新能力的提升,建设创新型国家具有非常重要的意义。为此,中国科协在连续4年编制《学科发展蓝皮书》基础上,自2006年开始启动学科发展研究及发布活动。

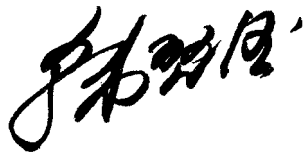
继2006年中国科协组织中国力学学会等30个全国学会开展30个相应一级学科发展研究,并编辑出版中国科协学科发展研究系列报告之后,2007年又组织了中国物理学会等22个全国学会,分别对物理学、天文学、海洋科学、生物学、管理科学与工程、水利、工程热物理、控制科学与工程、航天科学技术、核科学技术、石油与天然气工程、能源科学技术、安全科学与工程、园艺学、畜牧兽医科学、植物保护学、作物学、公共卫生与预防医学、城市科学、车辆工程等20个学科的发展状况进行了系统的研究,并编辑出版了学科发展研究系列报告(2007—2008)。在各分卷报告基础上,组织有关专家编撰了全面反映上述20个学科发展状况的综合报告——《学科发展报告综合卷(2007—2008)》。

中国科协是中国科学技术工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,开展学术交流,活跃学术思想,促进学科发展,推动自主创新是其肩负的重要任务之一。开展学科发展研究及学科发展报告发布活动,是

贯彻落实科教兴国战略和可持续发展战略,弘扬科学精神,繁荣学术思想,展示学科发展风貌,拓宽学术交流渠道,更好地履行中国科协职责的一项重要举措。这套由21卷、600多万字构成的系列学科发展报告(2007—2008),对本学科近两年来国内外科学前沿发展情况进行跟踪,回顾总结,并科学评价近年来学科的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等,体现学科发展研究的前沿性;报告根据本学科发展现状、动态、趋势以及国际比较和战略需求,展望本学科的发展前景,提出本学科发展的对策和建议,体现学科发展研究的前瞻性;报告由本学科领域首席科学家牵头、相关学术领域的专家学者参加研究,集中了本学科专家学者的智慧和学术上的真知灼见,突出学科发展研究的学术性。这是参与这些研究的全国学会和科学家、科技专家劳动智慧的结晶,也是他们学术风尚和科学责任的体现。

希望中国科协所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究和发布活动,持之以恒地出版学科发展报告,充分体现中国科协“三服务、一加强”的工作方针,不断提升中国科协和全国学会的学术建设能力,增强其在推动学科发展、促进自主创新中的作用。

中国科学技术协会主席

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to the President of the Chinese Association of Science and Technology.

2008年2月

# 前 言

2007年5月,中国核学会接受中国科学技术协会的委托,正式立项开展核科学技术学科发展的研究工作。为了更好地完成此项目,根据中国科学技术协会的要求,中国核学会聘请了以王乃彦院士为首席科学家,包括国内30多位长期从事核科学技术学科研究的专家、学者组成课题组。

核科学技术是一门自然科学与技术科学相交叉的综合学科。经过几十年的发展,目前已形成几十个分支学科。本报告选择发展较为成熟、与国民经济密切相关且反映国内外核科技水平的分支学科开展重点研究。核科学技术研究是核能事业生存与发展的先导和基础,更是核能利用、核燃料循环、核技术应用三大产业发展的技术支撑。目前,我国在核科学与技术研究领域已经形成了一套包含基础研究、应用研究和工程研究的完整体系。

本报告分综合报告和20个专题报告,其目的是展现国外核科学技术学科的发展现状、动态及趋势;回顾、总结和科学地评价我国核科学技术学科近年来的研究成果(包括新进展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等);在总结核科学技术各分支学科发展目标和前景的基础上,提出本学科发展的保障措施与对策建议。由于是首次撰写《2007—2008核科学技术学科发展报告》,在本报告中还对过去长期积累的丰硕成果做了简要回顾。

在研究和编撰本报告的过程中,许多专家、学者作出了宝贵的贡献,我们对此表示深深的谢意!同时,向担任本书综合卷审校工作的蒋云清先生表示衷心的感谢!

最后,还要感谢为本报告综合卷编写付出辛勤劳动的工作人员。他们是姚瑞全、信萍萍、张锐平、王勇、张海青、王文盛、陆燕、冯烨、张雪、吴洋、张国庆等同志。

鉴于开展此项研究工作涵盖的内容范围十分广泛,时间紧而任务重,本报告的编撰难免有不足之处,敬请学科与行业专家们批评指正。

中国核学会  
2008年1月

总 策 划    冯长根    沈爱民  
                  杨文志  
项目策划    刘兴平    黄    珏

策划编辑    许    英    郑洪炜  
责任编辑    郑洪炜    陈    君  
封面设计    赵    鑫  
责任校对    凌红霞  
责任印制    王    沛

# 目 录

|          |       |
|----------|-------|
| 序 .....  | 韩启德   |
| 前言 ..... | 中国核学会 |

## 综合报告

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 核科学技术学科发展现状与前景展望 .....   | (3)  |
| 一、引言 .....               | (3)  |
| 二、我国核科学技术学科发展的简要回顾 ..... | (4)  |
| 三、国际核科学技术发展的现状与趋势 .....  | (5)  |
| 四、近年来我国核科学技术学科的发展 .....  | (9)  |
| 五、我国核科学技术学科前景展望 .....    | (21) |
| 六、保障措施与建议 .....          | (24) |
| 七、结束语 .....              | (26) |
| 参考文献 .....               | (26) |

## 专题报告

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 加速器驱动次临界系统(ADS)与核能可持续发展 ..... | (29)  |
| 压水型动力反应堆技术及发展趋势 .....         | (34)  |
| 乏燃料后处理技术 .....                | (43)  |
| 放射性废物处理与处置 .....              | (52)  |
| 辐射防护技术 .....                  | (61)  |
| 辐射物理与技术 .....                 | (72)  |
| 高温气冷堆发展研究 .....               | (79)  |
| 核安全 .....                     | (83)  |
| 中国放射性同位素技术与应用进展 .....         | (89)  |
| 辐射技术应用 .....                  | (98)  |
| 核聚变工程技术与等离子体物理学 .....         | (105) |
| 核设施退役 .....                   | (115) |
| 加速器学科进展研究 .....               | (124) |
| 空间核动力 .....                   | (137) |
| 快中子堆 .....                    | (148) |
| 燃料元件制造 .....                  | (160) |
| 研究试验堆 .....                   | (169) |

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 铀矿采冶学科发展研究 .....   | (174) |
| 铀矿地质学科发展研究 .....   | (180) |
| 铀同位素分离学科发展研究 ..... | (188) |

## ABSTRACTS IN ENGLISH

### Comprehensive Report

|                                                            |       |
|------------------------------------------------------------|-------|
| Report on Advances in Nuclear Science and Technology ..... | (199) |
|------------------------------------------------------------|-------|

### Reports on Special Topics

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| ADS .....                                         | (201) |
| Pressurized Water Power Reactor Technology .....  | (202) |
| Spent Fuel Reprocessing .....                     | (202) |
| Radioactive Waste Treatment and Disposal .....    | (202) |
| Technology of Radiation Protection .....          | (203) |
| Progress of Nuclear Physics .....                 | (203) |
| High Temperature Gas-cooled Reactor .....         | (204) |
| Nuclear Safety Technology .....                   | (204) |
| Technology and Application on Radioisotopes ..... | (205) |
| Nuclear Radiation Technology Application .....    | (206) |
| Fusion Technologies & Plasma Physics .....        | (206) |
| The Decommissioning of Nuclear Facilities .....   | (207) |
| Accelerator .....                                 | (208) |
| Space Nuclear Reactor .....                       | (208) |
| Fast Reactors .....                               | (209) |
| Fabrication of Fuel Elements .....                | (210) |
| Research and Test Reactor .....                   | (210) |
| Uranium Mining and Milling .....                  | (211) |
| Uranium Geology .....                             | (212) |
| Separation of Uranium Isotope .....               | (212) |

# 综合报告



# 核科学技术学科发展现状与前景展望

## 一、引言

人类到 20 世纪初才逐渐认识原子核,并在 20 世纪 40 年代人为地促使原子核内部结构发生变化,使其释放出蕴藏的巨大能量加以利用。原子核结构的揭示和核能的开发应用是人类征服自然过程中的重大突破,具有划时代的意义。这种崭新能源的出现,恰好发生在传统化石燃料资源日趋枯竭而且伴随其使用而带来的环境恶化问题难以解决的年代。尽管核能最初使用于制造毁灭性的核武器,然而它为全人类造福的积极作用仍是毋庸置疑又不可忽视的。

核科学技术是 20 世纪上半期兴起的一门新型科学技术,其形成和发展是人类对物质微观结构及其运动规律的认识和对核能发现、开发、利用的一个飞跃。它的分支学科包括核辐射物理与技术、裂变堆工程技术、粒子加速器、核聚变工程技术与等离子体物理学、核燃料与工艺技术、乏燃料后处理技术、核安全、辐射防护技术、放射性三废处理与处置技术、核设施退役、核技术应用等。

核科学技术在 20 世纪取得了辉煌的成就,而目前仍保持着旺盛的生命力。当前核科学技术发展的特点是:一方面探索物质深层次结构的努力在放射性核束物理、核天体物理、粒子物理等领域继续深入地发展,另一方面各种核技术,如加速器技术、核探测技术、核分析技术、核成像技术、核辐照技术、新型辐射光源技术、同位素技术、核能与核武器技术,均得到了迅速发展,并且在农业、人口与健康、能源、环境、信息、材料、国家安全等领域以及生命科学、地球科学、凝聚态物理、考古学等多种学科的基础研究中得到日益广泛的应用。正因为如此,目前世界各国已投入大量资金,用于新建一批规模空前的核科学与工程研究设施和大型实验装置,而基于核技术的产业,特别是核电核燃料产业射线诊疗、辐照和探伤产业,在各先进工业国家也已形成相当大的规模。

中国的核事业创建于 1955 年初,在全国各行各业的大力支持下,经过几代核科技人员的共同努力,中国的核事业已取得举世瞩目的辉煌成就,具体表现为:①成功地研制出原子弹、氢弹、核潜艇等尖端武器装备,极大地增强了我国的国防实力和综合国力;②核电建设取得初步成就,为国民经济的发展提供了重要的推动力量;③建成独立完整的核科技与工业体系,为我国核事业的发展奠定了坚实的基础;④核技术应用领域不断扩大,社会经济效益明显提高;⑤培养和造就了一支高素质的人才队伍,孕育了伟大的“两弹一艇”精神,为中国社会先进文化做出重要贡献。

核科学技术是战略性的高科技学科,加快发展我国的核科学技术,对于维护国家安全、提升我国的综合科研实力以及促进我国能源工业的发展具有极其重要的意义。

## 二、我国核科学技术学科发展的简要回顾

核科学技术是现代科学技术的重要组成部分。自 20 世纪中叶以来,核科学技术的迅速发展,对国际政治、军事、外交、经济、科技诸领域均产生了深刻的影响,它成为一个国家科技水平的集中体现,也是综合国力的重要标志。我国的核科学技术与我国的核工业同步成长和发展,伴随着人民共和国前进的步伐,走过了光辉灿烂的历程。

1964 年 10 月 16 日我国成功爆炸了第一颗原子弹;1967 年 6 月 17 日,又成功地进行首次氢弹空爆试验;1971 年 9 月第一艘核动力潜艇下水。在研制“两弹一艇”的过程中,我国就建立了包含铀矿地质勘探、铀矿开采冶炼、铀转化、铀浓缩、核燃料元件制造、核反应堆、乏燃料后处理、核废物处理处置等环节的完整核工业体系。

改革开放以后,国防科技工业面向国民经济的主战场。发展核电掀开了我国核工业发展的新篇章。经过近 30 年的努力,我国的核电建设已取得可喜的成就。自主设计建设的装机容量 30 万 kW 的第一座核电站——秦山核电站——于 1991 年首次并网发电,结束了中国大陆无核电的历史。中法合作建设的我国第一座百万千瓦级( $2 \times 98.4$  万 kW)核电站——大亚湾核电站,为我国高起点地建设和管理大型核电站提供了宝贵经验。通过“十五”建设,秦山二期核电站、秦山三期核电站、岭澳核电站、田湾核电站已陆续投入商业运行。到 2007 年底,我国(大陆)核电装机容量约 900 万 kW。在役核电站的运行技术取得了长足的进步,运行状态保持良好水平,机组平均负荷因子达到 80% 以上。而且,我国已初步形成自主开发大型先进压水堆核电站的基础和能力,建立了相对完整的核安全与环境保护、核应急以及核电站运行技术支持等保障体系。

我国自 20 世纪 50 年代开始建立综合性的核科研基地,随着核工业的发展,相应建立了各个专业科研机构。经过近 50 年的发展,现已形成了门类齐全、专业配套的核科学技术体系。在核科学技术的基础研究、先进核能技术开发、核燃料循环技术、核应用技术研究等方面,取得了丰硕的成果。

我国在核电技术的研究开发、工程设计、设备制造、工程建设、营运管理等方面,具备了相当的基础和实力,能自主设计建设 30 万 kW 和 60 万 kW 压水堆核电机组,也基本具备了设计、建设百万千瓦级压水堆核电机组的能力。

在核电发展的带动下,通过引进和自主开发,对核燃料循环工业体系进行了技术改造,在一些关键环节实现了工艺技术的更新换代。我国的天然铀采冶形成了以地浸、堆浸、原地爆破浸出为主的生产体系;浓缩铀生产实现了从扩散法向先进离心法的技术过渡;核电燃料元件制造实现了国产化,质量达到国际先进水平;一座多用途的乏燃料后处理中间试验工厂即将投入运行;供实验用的模拟混合氧化物(MOX)燃料芯块也已研制成功。

在发展核电的同时,中国积极开展其他形式核能利用的研究。核聚变方面,先后建成了中国环流器一号(HL-1)和二号 A 装置(HL-2A)、HT-7、EAST 等托卡马克试验装置,达到了国际同类装置的先进水平。我国已正式加入国际热核聚变实验堆(ITER)计划;成功地完成了低温核供热的工程试验研究;由国家“863 计划”支持的高温气冷堆于 2000 年

年底达到临界,2003年1月实现满功率运行,并网发电;中国实验快堆正在建造之中;中国先进研究堆等几个重大科学工程建设进展良好。我国还建立了与国际接轨的安全监督法规体系和组织管理体系。通过严格管理,我国核设施一直保持着良好的安全运行记录。

目前,核技术广泛应用于我国工业、农业、医疗卫生、环境保护、矿产勘探、公共安全、科研等诸多领域,放射性同位素产品制备和相应的核仪器设备等都取得了显著的社会和经济效益。国内现从事核技术应用开发和生产的企事业单位达到300多家,年总产值达到400亿元,并且长期保持在15%以上的增长速度。在工业领域,同位素仪表、辐射加工、同位素工业示踪、辐照消毒、核无损探测、工业CT、火灾报警器等得到广泛应用;在农业领域,诱变育种与作物改良、同位素示踪、辐射防治害虫、食品辐照保鲜等,发挥了重要作用;核医学已成为诊断及指导治疗心、脑、肿瘤三大疑难疾病的最佳手段之一,全国有800多家医院设有核医学科室;采用辐射技术处理城市和工业的废气、废水及固体废弃物等也取得了重要进展。在加速器、放射性同位素及制品和辐照装置等方面的科研开发取得重大突破。

我国核工业50多年的发展,造就了一大批高素质的人才。他们有的放弃国外优厚的生活,毅然归国,投身中国核事业;有的告别妻儿,奔赴戈壁深山,隐姓埋名几十年,默默奉献;有的以身许国,为中国核事业献出了宝贵的生命。在中国核事业的历史上,镌刻着钱三强、王淦昌、邓稼先、朱光亚、周光召、于敏等许多闪光的名字。在几十年艰苦创业过程中,孕育了“热爱祖国,无私奉献,自力更生,艰苦奋斗,大力协同,勇于登攀”的“两弹一星”精神,成为中华民族精神的重要组成部分。

我国核工业肩负着光荣的历史使命,核能是解决人类能源问题的最终选择。发展核电已成为解决我国能源问题的重要战略手段。根据我国的能源发展规划,预计到2020年,核电装机容量将建成运行4000万kW、在建1800万kW,核电将为改善我国能源结构、减少环境污染发挥积极作用。快中子堆、低温核供热、海水淡化、高温气冷堆、核反应堆制氢、ADS等核能应用的范围将不断扩展。从长远看,突破受控核聚变技术,充分利用海水中的氘,将为人类提供取之不尽、用之不竭的能源,为人类社会可持续发展提供长期保障。核技术应用将有更为广阔的前景。

核科学技术是核事业发展的先导和基础。回顾核科学技术发展的历程,铭记先辈的业绩,在新的历史时期核科学技术将为国防建设和国民经济建设作出更大的贡献。

### 三、国际核科学技术发展的现状与趋势

能源短缺和环境污染是影响当今世界社会进步与经济两大难题。面对这两个日益严重的问题,核科学技术的发展进入了一个新的历史时期。近年来,国际核科学技术在各个研究领域都取得了显著的成果,其发展呈现出欣欣向荣的景象。

#### (一)核基础研究领域

核物理学作为研究有限多体量子复杂体系的学科,在放射性核束物理、中高能核物理、相对论重离子碰撞等若干前沿领域有望取得重大进展,同时也必将导致许多新的应

用。在理论研究方面,科学家们试图把自然界存在的四种基本作用力统一起来,建立超弦理论;原子核物理学和粒子物理学在分流 40~50 年后,又将在更深的层次上重新结合,形成高能核物理学。核物理学研究继续向高激发能、高原子序数、高自旋和高同位旋的方向发展,对极端条件和趋近极端条件下的原子核进行研究。

在加速器方面,国际上高能加速器继续在高能量前沿、高亮度前沿和新技术、新原理三个方面发展。国际直线对撞机(ILC)第一阶段设计能量为  $2 \times 250 \text{ GeV}$ 。日本 KEK-B 的亮度计划提高到  $1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。在新技术方面,超导磁铁和超导高频腔技术在加速器中广泛应用,并在批量制造与运行中证明了其性能。激光加速、等离子体尾场加速和双束加速器等高电场梯度的新加速原理研究已取得突破性进展。国际上高能、中低能重离子加速器、强流重离子或质子加速器装置的主要代表为美国、德国、日本、法国与俄罗斯的研究机构。瑞士 PSI 的 590 MeV 质子回旋加速器长期在 1.2 MW 平均束流功率上运行,并计划提升到 1.8 MW。日本和德国分别在建耗资 10 亿美元量级的大型综合性加速器,以期开展核物质、放射性核束物理、核天体物理和超重元素合成方面的研究。世界上新建或改造升级的回旋加速器,在技术的先进性和性能的优越性上也达到了新的高度,应用领域得到不断扩展。同步辐射加速器领域也在降低束流发射度、新型插入元件、从超导弯转磁铁引出光束线等方面取得了长足的进展。随着 X 光照相对分辨率的要求不断提高,为获得更小的焦斑,对电子束的品质要求越来越高,促进了直线感应加速器技术的快速发展。医用加速器方面也不断涌现新技术,基于图像引导的放疗系统已经逐渐成为主流,质子放疗在日本、美国等国已经作为常规治疗,重粒子放疗在日本已经用于临床。

核临界安全贯穿于核工业活动的整个体系中。各核大国建造了先进的核临界安全研究设施和实验平台,开展了大量的理论和实验研究,并形成完整配套的核临界安全研究体系。通过国际上广泛的合作,已形成并公布了乏燃料同位素组成数据库和临界安全基准实验评估国际手册等基准数据。

在核安全研究方面,国际上将重点放在使用确定论和概率论相结合的方法加强对核电站严重事故的分析;防止和缓解严重事故后果的技术开发;提高未能紧急停堆的预期瞬态(ATWS)等事故工况下的安全裕量的方法研究;核电站数字化仪控系统的验证和确认(V&V)研究;核电站老化与延寿管理等。

在非人类物种的辐射防护方面,国际社会已经对环境保护提出了要求。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)发表了《辐射对环境的影响》报告,系统评估了电离辐射对非人类物种的影响。国际辐射防护委员会(ICRP)已于 2000 年专门成立研究环境保护问题的工作组。在对大量的核环境观察分析后,提出了非人类物种电离辐射影响评价框架。目前现有的技术体系框架主要有两个:一个是欧共体的“评价电离辐射对欧洲生态系统环境影响的框架(FASSET)”;另一个是美国的“评价水生和陆生生物辐射剂量的分级筛选方法(GRADED)”。

## (二)核能技术领域

目前,世界核电发展正处于新的复苏时期。一方面,在保证投运核电站安全可靠运行的前提下,积极采取措施充分挖潜实现延寿运行。另一方面,瞄准未来的核电市场,大力

进行新堆型的研发。

在先进压水堆技术方面已形成采用多种防范和缓解严重事故后果、先进反应堆芯、模块化设计、数字化仪表与控制系统等为代表的核电技术潮流。20世纪90年代,美国和西方核电先进国家的核电工业界相继研发第三代压水堆。对此目前已形成两种设计方向:一种是法、德合作开发的EPR堆,世称改良型设计;另一种是美国西屋公司研发的革新型设计AP1000。自2000年起,为迎接21世纪核能发展的新高潮,由美国首先提出、主要核能国家均表示支持,开展第四代先进核能系统的研发。其目的:一是为使乏燃料中的高放废物最小化;二是为世界核能可持续发展;三是促进核不扩散。建议的6种第四代先进核能系统中,有3种是快堆,即钠冷快堆(SFR)、铅冷快堆(LFR)和气冷快堆(GFR)。另外3种分别是超临界水堆(SCWR)、超高温气冷堆(VHTR)和熔盐堆。

快堆技术的发展已逾30年,现在国际上主要的核电发达国家都已掌握了快堆技术。全世界已先后建成20座快堆,其中有5座25万~35万kW的原型快堆和2座商用规模快堆。

世界上高温气冷堆技术的最新进展概括起来主要是2座实验堆和3座商业示范电站设计。前者分别是30MWt的日本HTTR堆和中国的10MWt HTR-10堆,都在试验运行中。后3座商业示范电站设计分别是南非的球床模块式高温气冷堆电站PBMR、中国的球床模块式高温气冷堆HTR-PM和美国的模块式高温气冷堆电厂GT-MHR。

在军用核动力方面,安全性好、自然循环能力强、系统简化、体积小、重量轻的一体化布置技术成为有关国家的研发重点。目前世界上能够设计、建造和运行核潜艇的国家还仅限于5个联合国常任理事国。在空间堆方面,美国和俄罗斯等空间大国,一直注重空间核反应堆电源的研究。

磁约束核聚变工程技术和等离子体物理学已取得重大进展,以国际热核试验堆(ITER)计划的启动为标志,磁约束核聚变研究已经完成科学(等离子体物理学)可行性验证,从而进入能源开发的工程实施阶段。ITER计划将集成验证“先进托卡马克运行模式”和稳态燃烧等离子体的科学规律,同时还将部分验证示范堆(DEMO)工程技术问题,预计在2050年前后可实现核聚变能源商用化。大功率激光器技术是惯性约束核聚变研究的核心技术。美、法等国正在建造兆焦耳级的大型激光装置,进行热斑点火实验。

### (三)核燃料循环技术领域

在铀矿勘查方面,全球实际探明的铀资源量能够满足今后一段时期核工业发展的需要,综合预测评价和“攻深找盲”技术是今后一段时期铀矿勘查技术的一个发展方向。在铀矿采冶方面,数字化铀矿山与循环经济是国际铀矿开采的总体发展趋势;地浸采铀技术的发展和运用已引起世界铀业界的极大关注。

在铀浓缩方面,曾研发过电磁法、气体扩散法、气体离心法、喷嘴法、等离子体法、激光分离法、化学交换法等,而获工业应用的主要是气体扩散法和气体离心法。20世纪中后期国际铀浓缩能力大部分依赖于气体扩散法,但该方法现正逐步被淘汰。目前,最有效、经济与可靠的气体离心法已获广泛应用,成为发展的主要方向。

在燃料制造方面,研究试验堆的燃料元件向低浓化转变;压水堆燃料组件的发展主要