



2014—2015

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
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

2014—2015

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

2014—2015 核科学技术学科发展报告 / 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, 2016.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-7083-0

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 核技术—学科发展—研究报告—中国—2014—2015 IV. ① TL-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025923 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	夏凤金
装帧设计	中文天地
责任校对	凌红霞
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	415千字
印 张	19
版 次	2016年4月第1版
印 次	2016年4月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7083-0 / TL · 5
定 价	76.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)



2014—2015 核科学技术学科发展报告

首席科学家 李冠兴

专家组成员 (按姓氏笔画排序)

王乃彦	叶国安	叶奇蓁	任永岗	刘承俊
刘森林	池雪丰	苏 罡	苏艳茹	肖泽军
何作祥	邱爱慈	张 闯	张东辉	张作义
张国光	张金带	陈 伟	范家霖	范霁红
欧阳晓平		罗上庚	罗志福	郝樊华
夏佳文	柴国早	徐 铎	徐洪杰	徐瑚珊
徐燕生	董家齐	蔚喜军	潘自强	潘启龙

统 稿 顾忠茂

项目负责人 申立新

学术秘书组

组 长 张宝珠

成 员 (按姓氏笔画排序)

王丽瑶	兰晓莉	权 英	向学琴	刘鑫扬
苏 萍	李 夏	李 楠	何 冀	沙智明
罗 楠	郑绪华	胡正国	徐若珊	高 媛
高 鑫	蔡翔舟	熊 茹	滕君锐	

党的十八届五中全会提出要发挥科技创新在全面创新中的引领作用，推动战略前沿领域创新突破，为经济社会发展提供持久动力。国家“十三五”规划也对科技创新进行了战略部署。

要在科技创新中赢得先机，明确科技发展的重点领域和方向，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口十分重要。从2006年开始，中国科协所属全国学会发挥自身优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才队伍，持续开展学科发展研究，通过对相关学科在发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作、人才队伍建设等方面的最新进展的梳理和分析以及与国外相关学科的比较，总结学科研究热点与重要进展，提出各学科领域的发展趋势和发展策略，引导学科结构优化调整，推动完善学科布局，促进学科交叉融合和均衡发展。至2013年，共有104个全国学会开展了186项学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告186卷，先后有1.8万名专家学者参与了学科发展研讨，有7000余位专家执笔撰写学科发展报告。学科发展研究逐步得到国内外科学界的广泛关注，得到国家有关决策部门的高度重视，为国家超前规划科技创新战略布局、抢占科技发展制高点提供了重要参考。

2014年，中国科协组织33个全国学会，分别就其相关学科或领域的发展状况进行系统研究，编写了33卷学科发展报告（2014—2015）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，近几年来，我国在基础研究、应用研究和交叉学科研究方面取得了突出性的科研成果，国家科研投入不断增加，科研队伍不断优化和成长，学科结构正在逐步改善，学科的国际合作与交流加强，科技实力和水平不断提升。同时本次学科发展报告也揭示出我国学科发展存在一些问题，包括基础研究薄弱，缺乏重大原创性科研成果；公众理解科学程度不够，给科学决策和学科建设带来负面影响；科研成果转化存在体制机制障碍，创新资源配置碎片化和效率不高；学科制度的设计不能很好地满足学科多样性发展的需求；等等。急切需要从人才、经费、制度、平台、机制等多方面采取措施加以改善，以推动学科建设和科学研究的持续发展。

中国科协所属全国学会是我国科技团体的中坚力量，学科类别齐全，学术资源丰富，汇聚了跨学科、跨行业、跨地域的高层次科技人才。近年来，中国科协通过组织全国学会

开展学科发展研究，逐步形成了相对稳定的研究、编撰和服务管理团队，具有开展学科发展研究的组织和人才优势。2014—2015 学科发展研究报告凝聚着 1200 多位专家学者的心血。在这里我衷心感谢各有关学会的大力支持，衷心感谢各学科专家的积极参与，衷心感谢付出辛勤劳动的全体人员！同时希望中国科协及其所属全国学会紧紧围绕科技创新要求和国家经济社会发展需要，坚持不懈地开展学科研究，继续提高学科发展报告的质量，建立起我国学科发展研究的支撑体系，出成果、出思想、出人才，为我国科技创新夯实基础。

A stylized, handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Ming, positioned above the date.

2016 年 3 月

前言

2014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2014—2015年核科学技术学科发展的研究工作。为了更好地完成此项目，中国核学会成立了以理事长李冠兴院士为首席科学家，近40位长期从事核科学技术学科研究的专家、学者组成的课题组。

核科学技术始于20世纪前半叶，是一门自然科学与技术科学相交叉的综合学科，它包括了二十几个分支学科。进入21世纪以来，核科学技术始终保持旺盛的生命力，深受国际广泛重视和关注，特别是最近几年，各领域得以持续发展，获得了大量成果。当前我国已经跻身世界核电发展的第一方阵，建成了较完整的核燃料循环体系，核技术应用产业迅猛发展。

《2014—2015核科学技术学科发展报告》是继《2007—2008核科学技术学科发展报告》之后，中国核学会撰写的第二份学科发展报告，时间跨度大，内容丰富。本学科发展报告由综合报告和21个专题报告组成，涉及25个分支学科，展现了2009年至2015年，国外核科学技术学科的发展现状、动态和趋势；回顾、总结和科学地评述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。

《2014—2015核科学技术学科发展报告》的撰写者都是相关领域的专家，也都是这一历史时期的见证人。编者力图充分反映当前这一历史时期核科学技术的发展特征，为各位领导、同仁和读者提供一份可读性强、具有真知灼见的学科发展报告。

在本报告的研究和编撰过程中，受到了许多专家、学者的关心，收到了诸多中肯和有益的意见或建议，谨向他们表示谢意。

由于编者水平有限，且本报告涉及内容颇多，挂一漏万等不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

中国核学会

2016年3月

序 / 韩启德

前言 / 中国核学会

综合报告

核科学技术学科发展综合报告 / 3

一、引言 / 3

二、国际核科学技术发展的现状与趋势 / 4

三、我国核科学技术学科的发展 / 18

四、我国核科学技术学科的发展趋势 / 32

五、建议 / 40

参考文献 / 42

专题报告

辐射防护技术 / 45

辐射物理与技术 / 54

核安全 (含核应急) / 66

粒子加速器 / 83

脉冲功率技术 / 98

压水反应堆技术 / 108

大型先进压水堆核电站重大专项 / 126

高温气冷堆 / 133

快中子堆 / 142

加速器驱动次临界系统 / 155

钍基熔盐堆核能系统 / 165

核聚变科学和工程技术 / 173

铀矿地质 / 184

铀矿采冶 / 193

核燃料元件制造 / 202
核燃料后处理技术 / 213
放射性废物处理与处置 / 223
放射性同位素技术 / 231
辐射技术应用 / 241
核农学 / 252
核医学 / 261

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report / 271
 Advances in Nuclear Science and Technology / 271
Reports on Special Topics / 274
 Ionizing Radiation Protection / 274
 Radiation Physics / 275
 Nuclear Safety / 276
 Particle Accelerators / 277
 Pulsed Power Technology / 278
 Pressurized Water Reactor / 279
 Large Advanced Pressurized Water Reactor / 279
 High Temperature Gas-Cooled Reactor / 280
 Fast Reactor / 281
 Accelerator Driven Sub-Critical System / 281
 Thorium Molten Salt Reactor / 282
 Nuclear Fusion / 283
 Uranium Geology / 283
 Uranium Mining and Metallurgy / 284
 Nuclear Fuel Element / 285
 Reprocessing Technology of Spent Nuclear Fuel / 286
 Radioactive Waste Treatment / 286
 Radioisotope / 287
 Radiation Technology / 288
 Nuclear Agronomy / 288
 Nuclear Medicine / 289

索引 / 290

综合报告



核科学技术学科发展综合报告

一、引言

核科学技术始于 20 世纪前半叶，20 世纪 30 年代发现了中子和核裂变，推动了核武器的发展和核能发电的广泛应用，并产生了原子核科学技术，它包括核物理、核化学与放射化学、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、核燃料循环技术、辐射物理与技术、核安全、辐射防护技术、放射性废物处理与处置技术、核设施退役、核技术应用等。核科学技术从诞生之日起就与人类社会的生存和发展密切相关，它不仅属于战略高科技领域，也是国家核心利益和实力的具体标志之一，而且在国民经济中起到了独特的作用，具有重要地位。

我国已把核安全上升为国家安全战略，事关公众健康、经济发展、社会进步、政治稳定，甚至还事关国家的命运、前途和未来；倡导“理性、协调、并进”的中国核安全观，在实践中做到“发展和安全并重、自主和协作并重、治标和治本并重”，遵从规律、系统考虑、共同发展，是我国对核安全概念的理解和总结，也是对国际社会的价值倡导，更是对国际社会的庄严承诺。

进入 21 世纪以来，核科学技术作为一门前沿学科，始终保持旺盛的生命力，深受国际广泛的重视和关注，世界各国对其投入的研究经费更是有增无减。核能作为一种清洁高效能源，长期在世界能源结构中发挥重要作用。伴随着我国国民经济的不断发展壮大，核科学技术在我国能源、科技、医疗以及工农业等各个领域正发挥着越来越重要的作用。

当前核科学技术发展的特点是：吸取日本福岛核电站事故的经验教训，核电先进国家围绕核电安全性、经济性、可持续性，开展了大量的核技术研发活动，各国继续加强先进裂变反应堆如水冷堆、快堆和气冷堆研究，研发中小型反应堆和利用核电厂开展非电力应用受到关注，随着国际热核实验堆建造工作的进行，许多国家发起新的研发活动，为聚

变能商业化计划做准备；在核燃料循环技术领域，离心浓缩铀取得新进展，激光浓缩铀朝着商业化的目标迈进，全碳纤维转子超临界离心机、耐事故燃料元件、金属燃料、干法后处理和高放废物地质处置等技术研发活动十分活跃；在核技术应用领域，同位素生产和应用、核医学、加速器、核探测、辐射加工、核安保、核环保等产业规模不断扩大，美国核技术应用产值已超过核电；核科技大国高度重视核基础领域的发展，依托国家级的综合研究机构，在核物理、核化学与放射化学、加速器技术等理论和实验研究方面取得新的突破，核安全与核应急、辐射防护与环境保护技术不断完善和提高。^[1]

近年来，我国核科学技术研究取得了丰硕成果，核科技创新体系不断完善，核燃料循环产业体系不断转型升级。在压水堆方面，通过实施国家重大科技专项，引进消化吸收 AP1000 核电站技术，形成自主的第三代核电品牌 CAP1400；按照最先进的标准要求自主设计的三代核电技术“华龙一号”获得国务院核准开工，拥有自主知识产权，实现了核电带动装备产业走出去；我国自主开发多用途模块化小型堆 ACP100 开始初步设计，为开拓国际市场打下坚实基础。在快堆方面，2011 年 7 月 21 日，中国实验快堆成功实现并网发电；目前自主示范快堆核电站工程前期工作已经启动。在高温气冷堆方面，国家科技重大专项——山东石岛湾 20 万千瓦高温气冷堆核电站示范工程在 2012 年 12 月正式开工建设，2015 年 6 月反应堆厂房实现封顶，2016 年 3 月反应堆压力容器运抵现场，开始核岛主设备的安装工作。在核燃料循环技术领域，铀矿勘查技术大幅提升，又探明了一处超大型铀矿床；研发了先进的铀浓缩技术并成功实现工业化，实现了铀浓缩技术的重大跨越；自主研制的 CF3 核燃料元件完成主要研制工作，进入随堆运行考验阶段，这将为我国自主三代核电建设及“走出去”提供更加有力的保障；自主设计的动力堆乏燃料后处理中试厂热试成功，并正在设计我国首个乏燃料后处理工程，为实现我国核燃料闭式循环迈出了具有重大意义的一步。在核基础研究领域，我国自主研发的世界先进质子回旋加速器首次调试出束，标志着国家重点科技工程——HI-13 串列加速器升级工程的关键实验设施正式建成。此次建成的百兆电子伏质子回旋加速器，是国际上最大的紧凑型强流质子回旋加速器，HI-13 串列加速器升级工程建成后，将广泛用于核科学技术、核物理、材料科学、生命科学等基础研究和能源、医疗健康等核技术应用研究。^[2]

二、国际核科学技术发展的现状与趋势

（一）核能技术

核能是一种成熟的低碳技术，它今后的发展趋势是提高安全水平和功率，以利于规模经济开发。日益增长的全球能源需求、气候变化问题、日益枯竭的石油、天然气储备以及化石燃料供应的不确定性，促使核能应用不断扩大。截至 2015 年 10 月，全球共有 441 台在运核电机组，总净装机容量约为 381.6GWe；65 台在建机组，总装机容量约为 62.4GWe。虽然 2011 年福岛核事故对全球核能发展产生了一定的影响，但世界核电事业在注重安全

的基础上依然稳步发展，并将在相当长时间内继续保持增长态势。

近年来，国际上主要开展了第三代及第四代核电技术研究。第三代核电技术日趋成熟，在经济性与安全性方面有很大改进，并逐渐成为世界新建核电机组的主流。同时，为了更彻底地解决经济性、安全性、废物处理、防止核扩散以及提高燃料循环利用率等问题，世界范围内正更加深入开展第四代核电技术研究。“国际核聚变实验反应堆（ITER）计划”着眼于永久解决人类未来能源问题，正在向前推进，取得了一些突破性成就。

1. 先进压水堆进入工程建设阶段

压水堆是目前最成熟的一种核电技术。近年来，各国依据《先进轻水堆用户要求文件》（URD）和《欧洲用户要求文件》（EUR）积极开展第三代先进压水堆研发工作。目前国外具有代表性的有：美国的 AP1000 技术，法国的 EPR 技术，韩国的 APR1400，俄罗斯的 VVER-1000 和 VVER-120，法国与日本合作的 Atmea-1 技术。目前应用这些技术的工程项目部分已开工建设。2012 年 2 月，美国核管会（NRC）委员会批准了 2 台 AP1000 核电机组，这是美国近 30 多年来首次批准新建核电机组。

第三代先进压水堆技术采用非能动系统设计，增加安全系列，采取完善的严重事故预防和缓解措施、增强对外部事件的防御能力，提高了安全性，也通过增大容量、简化设计、延长设计寿期和换料周期等手段提高了经济性。日本福岛核电站事故的发生反映了核电厂的某些安全薄弱环节，事故过后国际上普遍对现有核电厂开展安全审查，并进行安全改造，提高了反应堆的安全性；“实际消除大规模放射性释放”被再次提出并受到重视，成为未来核安全发展的重要趋势。开展燃料和堆芯安全领域的前瞻性和基础性研究，重点开展严重事故机理研究、耐事故燃料元件研制，提高反应堆固有安全性，是未来压水堆发展的重要方向。

自 2004 年 6 月国际原子能机构（IAEA）宣布启动以一体化技术、模块化技术为主要特征的革新型模块式小型堆（SMR）开发计划以来，参与的成员国总数已达到 30 个，涌现了 45 种以上的革新型中小型反应堆概念。这些革新型堆型大多数允许或明确促进非电力应用，如核能淡化海水或核能热电冷联产。

2. 快堆研究在技术和工程方面取得新进展

钠冷快堆在燃料制造工艺和远程操作的热室元件制造技术方面成果显著，并开发了先进在役检查仪表系统、能量转换系统和新型蒸汽发生器，未来将在非能动安全性、高能耗燃料以及抗辐照材料等方面开展进一步研究。铅冷快堆在系统与设备设计、燃料研发以及铅工艺与材料方面取得了一定成果，未来将主要在材料、铅腐蚀、革新型燃料、先进热传输系统和设备方面深入研究。气冷快堆在概念设计和安全研究上取得较大进展，将进一步开展国际合作，研究包壳材料、特殊风机、阀门和仪表系统等关键技术。

工程建设方面，俄罗斯完成了商用示范堆 BN-800 建设，计划开展 BN-1200 建设；法国正在进行 ASTRID 概念设计；日本发展了 FaCT 项目，进行商用快堆概念设计，计划建设示范快堆循环工厂；印度发展了钍铀循环快堆，PFBR 反应堆建造基本完成；欧洲原子能联营正在建造气冷快堆 ALLEGRO（实验堆），建成之后将有效推动燃料研发等工作。

3. 各国积极开展高温气冷堆各项关键技术和设计集成研究

近年来,各国在第四代核能系统国际论坛(GIF)框架下开展高温气冷堆燃料与燃料循环、材料、设备、设计集成等技术研究。美国主要依托“下一代核电厂”(NGNP)项目进行相关研究,目标是建成高温气冷堆电/热(或氢)联产厂,用于工业供热和发电,已在燃料元件开发与考验、高温材料开发、制氢技术、反应堆安全技术等方面有长足进展。日本在氦气透平技术、碘-硫热化学水解工艺制氢方面具有优势,计划2020年左右建成原型制氢厂,2030年左右实现商业化。韩国2008年批准了“核能制氢研发演示项目(NHDD)”长期计划,预计2022年建造一套核能制氢系统,2026年完成原型演示。欧盟在HTR-TN计划下,在设计方法和工具、燃料、材料、氦系统技术、耦合技术等方面合作开展高温气冷堆的研发。

4. 熔盐堆研究呈上升趋势

近年来关于熔盐堆的研究日渐上升,各国积极开展熔盐堆概念设计。法国设计了MSFR,俄罗斯设计了MOSART,日本设计了Fuji-MSR。2009年美国提出900MW球床氟盐冷却高温反应堆,2011年美国能源部启动固态燃料熔盐堆前期研究计划,以900MW球床堆为基准,制定了氟盐冷却高温反应堆的发展战略,开展不同功率反应堆概念设计。2009年欧盟启动SUMO项目,对MSFR进行可行性评估,基于反应堆堆芯、后处理设施和废物处置设施的研究提出最佳熔盐快堆系统设计。2011年欧盟又启动EVOL计划,对MSFR初始设计及安全方案进行优化。

5. ADS系统研究日趋活跃

因加速器驱动次临界系统(ADS)在嬗变放射性核废料、有效利用核能资源方面具有的潜在优势,近年来国际上对ADS的研究给予了广泛的关注与支持,并从战略高度予以部署和实施。作为新一代核能开发与核废料安全处置的技术路线,ADS研究相关的学术交流和科技合作也越来越活跃。

目前,国际上加速器驱动次临界系统的研发正在从关键技术攻关逐步转入建设系统集成研究装置阶段。欧盟C.Rubbia领导的顾问组制定和提出了EUROTRANS计划,形成XT-ADS原理示范装置的先进设计和EFIT工业级嬗变装置的概念设计。同时,充分利用现有核设施并在欧盟F6、F7框架下开展了MUSE、MEGAPIE等多项实验研究。比利时核能研究中心实施的MYRRHA研究项目计划于2023年左右建成85MW_t的铅铋冷却ADS系统。美国制定和实施了研究核废料嬗变方案的SMART等计划,费米国家实验室正在计划建设中的Project-X也将开展ADS相关研究。日本JAEA和KEK研究机构在其J-PARC强流质子加速器上设有专门用于ADS研究的TEF实验装置,质子束流能量将达到600MeV。此外,俄罗斯、韩国和印度等国家也都开展了一系列的ADS研究工作。

6. 多国开展超临界水冷堆概念设计

超临界水冷堆(SCWR)是在高于水的临界点(374℃,22.1MPa)的温度和压力下运

行的反应堆，是在现有水冷反应堆技术和超临界火电技术基础上发展起来的革新设计，拥有很好的技术基础。与目前运行的水冷堆相比，超临界水冷堆系统简单、装置尺寸小、热效率高，具有更高的经济性和安全性。

美国、中国、加拿大、日本、欧盟、韩国和俄罗斯等 10 个国家和地区在国际合作框架内共同开展超临界水冷堆研究工作，目前提出了超临界压力水冷热中子堆、超临界压力水冷快中子堆、超临界压力水冷混合中子谱堆、超临界压力水冷球床堆和超临界压力重水堆等设计概念。在安全性、稳定性方面，各国开展了对非能动安全系统、燃料元件和堆芯部件、高温材料、超临界压力水化学、超临界压力条件下堆芯热工水力和反应堆物理特性的分析研究。根据第四代核能系统国际论坛提出的路线图，预期 SCWR 将在 2020 年前后完成性能研究和示范堆建设，2025 年完成试验验证，2030 年前后实现商业应用。

7. 核聚变研究取得了重要物理成果

核聚变因资源丰富和无污染，是人类社会未来的理想能源。由于技术难度大，经费投入大，国际上通过合作和技术共享，共同进行核聚变研究。

受控核聚变包括磁约束聚变和惯性约束聚变。在磁约束核聚变方面，经过多年的探索，托卡马克成为主要途径，相继建成并成功运行大型托卡马克装置，包括欧共体的 JET、美国的 TFTR、日本的 JT-60U 等。磁约束受控核聚变的科学可行性已得到证明。由中、美、欧共体、俄、日、韩共建的国际热核实验堆（ITER），已完成概念和工程设计，正在建设中。同时，为提高聚变的经济性和实用性，各国也正在进行深入的聚变科学和技术研究，加强对堆芯等离子体品质、加热系统、装置结构材料、控制技术等的深入研究。惯性约束聚变在理论、实验、诊断、制靶和驱动器方面取得了长足进展。2009 年美国建成国家点火装置（NIF），利用 NIF 装置开展了一系列靶物理实验和点火物理实验，取得重要的物理成果。实现实验室热核聚变点火，开展高温、高密度极端物理等基础前沿科学问题研究，将是未来惯性约束聚变研究的主要方向。

8. 各国纷纷提出聚变－裂变混合堆方案

聚变－裂变混合堆（简称混合堆）是 20 世纪 50 年代提出的一种反应堆类型，是次临界核反应堆，由一个聚变堆芯、环绕该堆芯的裂变包层和产氚包层组成，聚变堆芯是一个独立的外部高能中子源，可以使裂变包层以次临界态运行，剩余中子可用来产氚，实现氚自持循环。利用聚变中子的裂变包层主要有以下应用：①核废料管理；②能源生产；③为轻水反应堆生产裂变燃料。在核废料管理以及裂变燃料生产过程中，产生的大量核能对提高整个系统的经济性至关重要。

长期以来，聚变技术是制约聚变－裂变混合堆研究进程的核心因素。20 世纪末，Z 箍缩技术取得了里程碑式进展，吸引了国际聚变界的高度关注；2010 年，美国提出 Z 箍缩聚变物理设计（MagLIF），预期可在 30MA 电流条件下实现聚变点火；2012 年，俄罗斯启动 50MA 的贝加尔（Baikal）装置的建设，计划于 2018 年建成，将有望实现 Z 箍缩惯性约束聚变点火的历史性突破。以 In-Zinerator 方案为典型代表，美、俄、欧等国家和组织纷

纷提出了各自的聚变-裂变混合堆方案、研究计划和发展路线图,计划在2035年前后建成示范堆。

(二) 核燃料循环

核燃料循环(nuclear fuel cycle)是指核燃料进入核反应堆前的制备和在反应堆使用后所有涉及核燃料处理、处置过程的各个阶段。它包括铀资源勘查,铀矿开采,铀的提取和精制,铀的化学转化,铀同位素的富集,核燃料组件制造,核燃料组件在反应堆内使用,乏燃料贮存,乏燃料运输,乏燃料后处理,放射性废物处理、处置等。

1. 世界范围内发现了更多的铀矿资源

国外部分铀矿床规模大、品位高,地质预测研究水平先进。铀矿勘探最深已超过2000m,大型金属矿山开采深度超过1500m的约有115座。南非的金矿最深已开采到4800m,勘探最深达到5424m;美国金矿勘探最深达到5071m。

随着航空物探技术的迅速发展,高精度数据采集系统和数据处理软件亦获得了巨大的进步,金属矿产的勘探中物化探仪器制造和深部探测技术更是在高精度、大深度方向取得了较为成功的发展,现代遥感技术已经进入一个能动态、快速、多平台、多时相、高分辨率地提供对地观测数据处理的新阶段。随着信息化程度的提高,地质勘探开始向立体找矿、智能找矿的方向发展。

2013年,包括澳大利亚、博茨瓦纳、加拿大、中非、中国、捷克、丹麦(格陵兰)、印度、约旦、蒙古、纳米比亚、俄罗斯、斯洛伐克和南非在内的许多国家均报告发现了更多的资源。

2. 加强研究与开发安全环保的铀矿采冶技术

铀矿采冶是核燃料循环中的一个重要组成部分,其包括了采矿、选矿、提取与精制等工艺环节。世界铀矿资源的开发利用已有200多年的历史。到2012年,世界上仍有21个国家50多座铀矿山在生产运行,铀总产量为58816吨,其中露天开采占19.9%,地下开采占26.2%,地浸占44.9%,副产品占6.6%,堆浸占1.7%,其他占0.7%。由此可见,世界铀矿采冶技术以常规采冶工艺和地浸采铀工艺为主,堆浸和原地破碎浸出工艺主要用于处理低品位铀矿石。

为减少铀资源开发对环境的影响,世界主要铀资源开采国均加强了铀矿采冶安全环保技术的研究与开发。澳大利亚、加拿大、美国均取得了不小的进展,相关技术也得到了广泛的应用。

3. 气体离心法是当前先进的工业规模浓缩铀生产方法

气体离心法是当前世界上工业规模生产浓缩铀的唯一先进方法,2013年6月,其他铀同位素分离方法已被气体离心法全部取代。激光同位素分离技术被认为是继气体扩散法和气体离心法之后最有希望成为工业化的浓缩铀生产新方法,但目前仍存在很多技术难题,需要继续投入大量的研发工作。激光同位素分离技术中最具潜力和应用前景的是原子