

核能技术方向研究及发展路线图

杜祥琬¹, 叶奇蓁², 徐铍³, 万元熙⁴, 彭先觉¹, 苏罡², 杨勇³, 高翔⁴, 师学明¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;
3. 中国原子能科学研究院, 北京 102134; 4. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 笔者按照核能技术成熟度将课题分解为热堆、快堆和四代堆、受控核聚变科学技术三个专题, 采取专题调研、交叉讨论、系统综合的方法开展研究。分析了核能技术发展的现状、我国核能的安全性、核能技术的发展方向, 并给出了核能技术发展路线图。建议以第三代自主压水堆为依托, 安全、高效、规模化发展核能; 加快第四代核能系统研发, 解决核燃料增殖与高水平放射性核素嬗变; 积极发展模块化小堆, 开拓核能应用范围; 努力探索聚变能源。预期到 2030 年核电运行 1.5×10^8 kW, 在建 5×10^7 kW; 到 2050 年快堆和压水堆匹配发展。我国核能发展存在前端和后端能力不足、核心技术研发力量分散、竞争大于合作的局面, 建议整合国内资源, 组建核能国家实验室, 集中力量推进我国核能产业健康、快速发展。

关键词: 核能; 热堆; 第四代核能系统; 受控核聚变; 发展路线图

中图分类号: TL99 **文献标识码:** A

Research on Technology Directions and Development Roadmap of Nuclear Energy

Du Xiangwan¹, Ye Qizhen², Xu Mi³, Wan Yuanxi⁴, Peng Xianjue¹, Su Gang², Yang Yong³,
Gao Xiang⁴, Shi Xueming¹

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102134, China; 4. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: According to the development level of nuclear energy technologies, this project is divided into three subjects, i.e., thermal neutron reactors, fast neutron reactors and generation IV reactors, and controlled nuclear fusion science and technology. Subject investigation, cross discussion and systematic integration methods are used in different stages of the research. This paper consists of the current status, safety, technological direction, and development roadmap of China's nuclear energy. It is suggested that China should take the following measures. First, China should promote its independent advanced pressurized water reactor to enlarge the nuclear energy scale in a safe and efficient way in the short run. Second, China should accelerate the research and development of generation IV nuclear energy systems to deal with the problems of nuclear fuel breeding and transmutation of transuranics and long life fission products, and develop small modular reactors actively to expand the application range of nuclear energy in the mid run. Third, China should keep exploring the fusion energy in the long run. It is expected that there will be 1.5×10^8 kW of nuclear reactors in operation

收稿日期: 2018-05-23; 修回日期: 2018-05-28

通讯作者: 师学明, 北京应用物理与计算数学研究所, 副研究员, 主要从事先进核能系统概念研究; E-mail: sxm_shi@qq.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

and another 5×10^7 kW in construction in 2030 and there will be a harmonious development of pressurized water reactors and fast neutron reactors in 2050. The development of China's nuclear energy is also facing some challenges, such as the insufficient capacity of the front part and post part of the nuclear industry chain, the divergence in research and development power of the core technology, and more competition than cooperation among state owned companies. It is hoped that the China should construct a State Nuclear Energy Lab through integration of existing resources so as to concentrate the strength to promote the development of nuclear energy industry in a healthy and rapid way.

Keywords: nuclear energy; thermal neutron reactor; generation IV nuclear system; controlled nuclear fusion; development roadmap

一、前言

核能是安全、清洁、低碳、高能量密度的战略能源。2011年发生的福岛核事故客观上延缓了各国对发展核能的预期,但这种影响在逐渐减弱。我国发展核能对于保障能源安全、实现绿色低碳发展具有重要作用;对于带动装备制造业走向高端、打造中国经济“升级版”意义重大。全球范围内的核电建设正迎来新的高潮,核电“走出去”已成为国家战略。本文总结了“核能技术方向研究及发展路线图”课题的主要内容,指出未来我国核能发展的重点科学技术方向和发展路径。

二、核能技术的发展现状

(一) 压水堆是核电开发的首要选择

当前,全球现役核电机组共450台,总装机容量为394 GW,其中有294台是压水堆;在建机组为55台,其中45台是压水堆[1]。我国商用核电机组为38台,其中36台是压水堆;在建核电机组为19台,其中17台是压水堆。压水堆仍将在相当长时间内占据主导地位。

(二) 现役机组性能不断改善

1980—2016年,全球核电平均负荷因子从60%提高到了80.5%。约1/3机组的负荷因子超过90%,高龄机组的负荷因子几乎和新机组相当,并没有出现由于服役时间增加而性能显著下降的情况[2]。我国核电负荷因子从2014年的86.32%降低至2017年的81.14%[3],主要原因是辽宁和福建核电消纳能力不足。我国核电正面临着参与调峰的压力。

(三) 高龄机组延寿成为趋势

当前全球约有300台机组运行超过30年,其

中约100台超过40年[1]。从20世纪90年代开始,美国实施运行机组的延寿改造,经寿命评估、安全分析和系统技术改造后,设备性能提升成效显著,美国99台机组中有84台已经被授权许可延寿到60年[4]。

(四) 核电建设迎来热潮,第三代堆将成为主流技术

全球有15个国家共55台机组在建(其中包括白罗斯和阿拉伯联合酋长国两个无核电国家的2台机组)[1,5]。此外,有42个国家正在规划或者考虑建设核电(含26个无核电国家)[5]。国际原子能机构(IAEA)预测到2030年全球将新建核电101~206 GW,核电装机容量约为345~554 GW[6]。福岛事故后,国际社会对新建核电机组的安全性提出了更高的要求,第三代先进压水堆被寄予厚望。但2014年在建的18个第三代压水堆(8个AP1000,6个AES-2006,4个EPR)中,有16个存在不同程度的延期情况,首堆经济性有待提高[7]。我国自主开发的“华龙一号”国内外示范工程建设进展顺利。

(五) 小型模块化反应堆(SMR)研发掀起热潮

SMR具有固有安全性好,单堆投资少,用途灵活的特点。美国政府从20世纪90年代以来一直在资助开发SMR,希望用SMR来替代大量即将退役的小火电机组。全球范围内提出了约50种SMR设计方法和概念。正在建设示范工程的包括阿根廷的CAREM-25(一体化压水堆),中国的HTR-PM(高温气冷堆),俄罗斯的KLT40S(海上浮动堆)。近期可能会批准建设的包括美国的mPower、NuScale和韩国的SMART等小型模块化压水堆。中国提出了ACP100, CAP150, ACPR50S等小型压水堆概念,其中ACP100成为世界上首个通过IAEA安全审查的小堆[8]。

（六）乏燃料管理压力增大，核燃料循环后端需求日益迫切

截至2016年年底，全球储存乏燃料约 2.73×10^5 t且每年新增7000 t，乏燃料储存压力日益增加[9]；另一方面，高水平放射性废物地质处置工作进展缓慢，不少国家面临公众反对压力，只有芬兰、法国、瑞典已经宣布预计运行时间，实现技术可行、社会可接受的深地质处置库。我国部分核电厂乏燃料水池储存能力接近饱和，乏燃料运输和离堆储存能力也很有限；后处理和废物处置需求日益迫切。

（七）第四代先进核能系统初现端倪

美国于2000年发起“第四代核能系统国际论坛(GIF)”，希望能更好地解决核能发展中的可持续性(铀资源利用与废物管理)、安全与可靠性、经济性、防扩散与实体保护等问题。第四代核能系统最显著的特点是强调固有安全性，是解决核能可持续发展问题的关键环节。GIF提出六种堆型，包括钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆、超临界水堆、超高温气冷堆和熔盐堆。行波堆和加速器驱动的次临界系统(ADS)也可以满足第四代堆的要求。

上述8种堆型处在不同的发展阶段，详见表1。其中钠冷快堆和高温气冷堆基础较好。超高温气冷堆和行波堆适宜采用一次通过，其他几种堆型都适宜采用闭式燃料循环。

三、我国核能的安全性

安全是核能发展的生命线。公众最关注的核能问题包括核电厂的安全和放射性废物管理。关于安全的评价取决于人们对风险和收益的综合比较。在

正常情况下，核能产业链工作人员所受归一化辐射职业照射剂量仅为煤电链的1/10，对公众产生的照射仅为煤电链的1/50。公众对核能安全的质疑主要是源于历史上发生的三里岛、切尔诺贝利、福岛三次严重核事故。

（一）在运核电机组的安全性有保障

我国目前在运的30余台核电机组均属第二代改进型，安全水平不低于国际上绝大多数运行机组，世界核电运营者协会(WANO)运行指标普遍处于国际中上水平，没有发生过一起国际2级及以上的核事故，放射性排出物剂量水平远低于国家标准。福岛核事故后，我国立即开展了核电厂安全大检查，切实吸取福岛核事故经验反馈。经过评估和整改，核电厂应对极端外部自然灾害与严重事故预防和缓解能力得到加强，我国核电安全性和监管水平不断提高。日本福岛处于欧亚板块与太平洋板块俯冲带上，历史上大地震频发；福岛核电站为早期设计的相对落后的沸水堆。我国专家所做的分析表明，无论从堆型、自然灾害发生条件和安全保障方面来看，类似福岛的事故序列在我国不可能发生。

（二）自主先进压水堆核电技术能够满足国际上最高核安全要求

按照我国《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标》的要求，“十三五”及以后新建核电机组力争实现从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性。我国自主开发的“华龙一号”和CAP1400先进压水堆，具有完善的严重事故预防和缓解措施，全面贯彻纵深防御原则，设置多道实体安全屏障，确保实现放射性物质包容。我

表1 第四代反应堆发展现状

堆型	主要优势	技术发展阶段
钠冷快堆	闭式燃料循环	俄罗斯 BN800 示范快堆建成；我国钠冷快堆示范工程开工
铅冷快堆	小型化多用途	关键工艺技术研究
气冷快堆	闭式燃料循环	出现关键技术难以克服的情况
超高温气冷堆	核能的高温利用	我国超高温气冷堆示范工程开工
超临界水堆	在现有压水堆的基础上提高经济性与安全性	关键技术和可行性研究
熔盐堆	钍资源利用	关键技术和可行性研究
ADS	嬗变	关键工艺技术研究
行波堆	提高铀的利用率	关键工艺技术研究

国目前开工建设的高温气冷堆示范工程和钠冷快堆示范工程，正在开发的模块化小型压水堆等，具备更高的固有安全特征。

（三）核电装备国产化能力不断提升

2006年以来，核电国产化战略不断深入推进，我国核电装备国产化能力得到很大提升。目前二代改进型核电设备国产化率达到85%，具备每年8~10台（套）的批量制造产能。通过先进压水堆重大专项的实施，主泵、关键阀门、数字化仪控系统等技术取得突破，奠定了国产化基础。三代核电“华龙一号”首堆建设国产化率将不低于85%，批量化建设后的设备国产化率将不低于95%。CAP1400首批机组设备国产化率也有望达到85%。

核电设备制造工艺尚需不断完善和固化。近十年来，核电装备得到了全面发展。但是，核电设备设计和生产环节衔接还不够紧密，很多加工制造工艺还需要不断完善和固化，以便进一步提高设备供应能力，降低成本。

研发力量分散。我国的三大核电集团都在研发新的控制系统、保护系统、堆芯测量系统和相关设备，各自攻关，竞争远大于合作，增加了科研开发成本，也不利于系统设备水平的提高。国家层面缺少统一的技术鉴定平台，尚需克服体制、机制障碍，做好客观、科学、深入的技术审查。

（四）核能安全研究是一个持续和渐进的过程

IAEA 福岛事故调查报告指出：需要采取系统性的核安全方案，考虑个人因素（含知识、思想、决定、行动），组织因素（含管理系统、组织结构、治理、资源）和技术因素（含技术、工具、装备）之间的动态相互作用。通过定期评估和严格监管，及时吸收国内外最新的研究成果和经验反馈，可以确保核电厂满足最新的安全标准。

从技术层面看，核电安全发展的目标是做到消除大规模放射性物质的释放，能够达到减缓甚至取消场外应急。为实现核安全技术目标，需要持续强化反应堆的安全研究。包括增强反应堆的固有安全性，通过先进核燃料技术和反应堆技术研究，创新应用，保证发生严重事故机率足够小；研究堆芯熔融机理，优化完善严重事故预防与缓解的工程技术措施和管理指南；实现保障安全壳完整性研究；关

注剩余风险保障措施，确保即使发生极端严重事故，放射性物质的释放对环境的影响也是可控的，保障环境安全；加强核应急研究和演练，不存侥幸心理。

（五）发展先进核能系统及配套后处理技术是解决乏燃料安全和提高铀资源利用率的关键

核能可持续发展面临铀资源利用率低和高水平放射性废物处置难题。如果采取一次通过，则铀资源的利用率只有约0.6%，一台1GW核电机组每年需地质处置的高水平放射性废物可达到2m³/t铀。通过第二代后处理技术提取（铀）钚进入压水堆复用，铀资源利用率可提高到接近1%，需地质处置的高水平放射性废物降低到约0.5m³/t铀。随着快堆技术的逐渐成熟，发展快堆或ADS系统，通过第三代后处理技术提取出铀和超铀进入快堆多次循环，铀资源利用率可达60%，并能有效嬗变超铀元素；需地质处置的高水平放射性废物量将小于0.05m³/t铀，且地质处置库放射性水平衰减到天然铀矿水平的时间将由一次通过的几十万年降低至千年以内。后处理产生的少量高水平放射性废物经玻璃固化和三重工程屏障处理以及深地层最终处置，可以确保极端情况下高水平放射性废物的放射性释放处于安全可控范围内，对生物圈的放射性剂量低于国际标准两到三个数量级。

四、核能技术的发展方向

（一）核能领域科技发展存在的重大技术问题

1. 热堆规模化发展需要解决的技术问题

铀矿勘查、采冶开发需要加强。根据我国新一轮铀矿资源潜力评价的结果，在不考虑引入MOX燃料元件、发展快堆技术的前提下，国内天然铀只能满足近1×10⁸kW压水堆核电站全寿命周期（60年）运行需求。我国铀资源勘查程度低，考虑到从地质勘查到获得天然铀，再通过铀的转化、铀同位素分离和制造出核燃料元件入堆，至少需要15年以上，必须从现在开始加强地质勘查和采冶开发，以保证我国核电的可持续发展。

核燃料组件制造产能不足。我国目前的燃料组件产能为1400tU/a。按照每个压水堆约需30tU估算，到2020年，总的燃料元件需求约1800tU/a，供需缺口达到400tU/a。

第三代先进压水堆的安全性和经济性需要优化平衡。目前国内外在建的三代压水堆如 AP1000、EPR 都有不同程度的延期,造成首堆经济性较差,从而引发公众质疑核电经济性逐步变差。这是关系第三代核电规模化推广的重大问题,亟待开展系统性的研究工作。

在核能规模化发展阶段,核设施运行与维修技术需要升级。当存在大量高龄机组时,必须全面升级运行维修技术,实现从“低端手工式”到“高端智能式”作业的转变;核电设备的可靠性、老化管理技术及应急响应技术都需要尽快完善和提高。

核电软件能力建设急需加强。近几年,我国核电软件自主化开发取得关键突破,结束了我国核电没有自主设计软件的历史。美国和欧盟正在开发“数值反应堆技术”,旨在以高性能计算技术为基础,利用多物理、多尺度耦合技术建立一个具有预测反应堆性能的虚拟仿真环境。国内应该联合优势力量,争取在新一轮的核能软件研发领域赶上欧美发达国家的步伐。

急需开展后处理能力建设,并配套发展离堆储存技术,解决目前的核电乏燃料后处理和堆内储存矛盾。高水平放射性废物处置工作需要尽快展开。

2. 快堆和第四代堆发展需要解决的技术问题

裂变燃料的增殖。虽然短期内不存在铀资源制约问题,但我国核电长期规模化发展仍面临燃料供应不足的风险。快堆理论上可以将铀资源利用率提高到 60% 以上,有望成为一种千年能源。钠冷金属燃料快堆增殖比高,配合先进干法后处理和元件快速制造技术可以实现较短的燃料倍增时间,有利于核能快速扩大规模,应该及早开展相关的基础研究。

超铀元素分离与嬗变。超铀元素含有宝贵的核燃料,也是乏燃料长期放射性的主要来源,它的处理是影响公众核电接受度的重要问题。分离和嬗变是处理超铀元素的有效途径,需要发展先进的分离技术、废物整备技术、含 MA 元件/靶件制备技术,加快研发关键设备与材料。超铀元素的嬗变需要开发专用嬗变快堆或者 ADS 系统。

先进核能的多用途利用。除了发电,核能在供热(城市区域供热、工业工艺供热、海水淡化)和核动力领域都很有发展潜力。开发模块化压水堆、超高温气冷堆、铅冷快堆等小型化多用途堆型,可

以作为核能发展的重要补充。

第四代堆堆型的定位和取舍。第四代堆堆型众多,且处于不同的发展阶段,一个国家没有必要、也没有能力全面发展。因此,应该加强核能战略研究,明确各种堆型的独特优势、技术成熟度和发展的空间。

3. 聚变科学需要解决的技术问题

实现受控聚变主要有磁约束和惯性约束两种途径,二者均处于不同探索阶段,距离聚变能源的要求还比较远。磁约束聚变界正在联合建造国际热核聚变实验堆(ITER),将在 ITER 上研究稳态燃烧等离子体各类物理与技术问题,验证开发利用聚变能源的科学可行性和工程可行性。Z 箍缩惯性约束聚变首先需要解决点火问题。

实现大量聚变反应所需的关键技术,对磁约束聚变而言是加热、约束(实现聚变)和维持(长时间或平均长时间的聚变反应);对惯性约束而言则是压缩、点火和高重复频率点火。未来的磁约束聚变装置必须以长脉冲或者连续方式运行,以便获得可实用的聚变能量并稳定输出;惯性约束聚变要能获得大量聚变能量必须实现以高重复频率点火方式运行,具有相当大的挑战。

聚变能源在商业应用前还需研制能耐高能中子辐照的材料,建立能够实现氦自持的燃料循环等诸多工程技术挑战。发展聚变裂变混合堆有可能促进聚变能提前应用,其在未来能源中的竞争力应该和第四代堆及纯聚变堆比较。

(二) 核能领域科技发展态势

压水堆是 2030 年前我国核电发展的主力。总体发展方向是围绕核能利用的长期安全稳定及效能最大化。安全性仍然是核电发展的前提,实现安全性与经济性的优化平衡是第三代核电发展面临的现实挑战。压水堆乏燃料的干式储存、运输、后处理、高水平放射性废物处置需要统筹考虑和合理布局。

快堆及第四代堆是核能下一步的发展方向。预计 2030 年前后将有部分成熟第四代堆推向市场,之后逐渐扩大规模。钠冷快堆是目前第四代堆中技术成熟度最高、最接近商用的堆型,也是世界主要核大国继压水堆之后的重点发展方向。钠冷快堆首先需要通过示范堆证明其安全性和经济性。快堆配套的燃料循环是关系快堆规模化发展的关键,涉及

压水堆乏燃料后处理、快堆燃料元件生产、快堆乏燃料后处理等环节。如果非常规铀开发取得突破，如海水提铀技术，那么快堆能源供应的需求会弱化，嬗变超铀元素和长寿命裂变产物的需求会强化。即使快堆的定位从增殖转向嬗变，发展规模相应减少，但快堆及其燃料循环发展还是必需的。考虑到快堆燃料循环的建立需要数十年的时间，应该及早开展相关研究工作，加强技术储备。我国的高温气冷堆技术世界领先，在此基础上发展超高温气冷堆，将是核能多用途利用的重要方式之一。其他第四代堆技术尚处于研发阶段，在某些技术上具有一定的优势，但也存在着需要克服的工程难题，应该首先加强共性基础问题研究。

聚变能是未来理想的战略能源之一。在磁约束聚变领域，托卡马克的研究目前处于领先地位。我国正式参加了 ITER 项目的建设和研究；同时正在自主设计、研发中国聚变工程试验堆（CFETR）。在惯性约束领域，Z 箍缩作为能源更具有潜力，我国提出的 Z 箍缩驱动的聚变-裂变混合堆更有可能发展成具有竞争力的未来能源。实现聚变能的应用尚未发现任何捷径，但需要继续关注国际聚变能研究的新思想、新技术和新途径。

五、核能技术发展路线图

我国核能发展近中期目标是优化自主第三代核电技术；中长期目标是开发以钠冷快堆为主的第四代核能系统，积极开发模块化小堆、开拓核能供热和核动力等利用领域；长远目标则是发展核聚变技术。

根据课题研究成果，凝练出如下时间节点预期实现的关键技术：

创新性技术（到 2020 年）：自主第三代核电形成型谱化产品，带动核电产业链发展；模块化小型压水堆示范工程开工。

前瞻性技术（到 2030 年）：以耐事故燃料为代表的核安全技术研究取得突破、全面实现消除大规模放射性释放，提升核电竞争力；实现压水堆闭式燃料循环，核电产业链协调发展；钠冷快堆等部分第四代反应堆成熟，突破核燃料增殖与高水平放射性废物嬗变关键技术；积极探索模块化小堆（含小型压水堆、高温气冷堆、铅冷快堆）多用途利用。

颠覆性技术（到 2050 年）：实现快堆闭式燃料循环，压水堆与快堆匹配发展，力争建成核聚变示范工程。

图 1 按照压水堆、第四代堆、聚变技术三个领域的技术成熟度给出了核能技术发展路线图。

六、结论和建议

（一）主要结论

福岛核事故后，美国、欧盟等对境内的核电厂开展了压力测试，我国也开展了核电厂安全大检查，切实吸取事故经验反馈。世界核电增长的总趋势没有改变，核电仍然是理性、现实的选择。我国专家所做的分析表明，无论从堆型、自然灾害发生条件和安全保障方面来看，类似福岛的事故序列在我国不可能发生，我国核电的安全性是有保障的。

核能是安全、清洁、低碳、高能量密度的战略能源。发展核能对于我国突破资源环境的瓶颈制约，保障能源安全，实现绿色低碳发展具有不可替代的作用。我国核电发电量占比只有 3.94%，远低于 10.7% 的国际平均水平。核电必须安全、高效、规模化发展，才能成为解决我国能源问题的重要支柱之一。

按照《核电中长期发展规划（2011—2020 年）》，2020 年我国核电运行装机容量将达到 5.8×10^7 kW，在建为 3×10^7 kW。根据我国政府宣布的到 2030 年我国非化石能源将占一次能源消耗 20% 左右的承诺，结合国内核电设计、建造、装备供应能力，预计届时核电运行将达到 1.5×10^8 kW，在建为 5×10^7 kW，发电量约占 10%~14%。2030—2050 年，预期将实现快堆和压水堆匹配发展。

我国核电发展具有后发优势，在运机组安全水平和运行业绩均居国际前列。以“华龙一号”和 CAP1400 为代表的自主先进第三代压水堆系列机型，可实现从设计上实际消除大规模放射性物质释放，是未来核电规模化发展的主力机型。铀资源供应不会对我国核电发展形成根本制约。

核能发展仍面临可持续性（提高铀资源利用率，实现放射性废物最小化）、安全与可靠性、经济性、防扩散与实体保护等方面的挑战。国际上正在开发以快堆为代表的第四代核能系统，期待能更好地解决这些问题。快堆发展方向主要取决于对燃料增殖

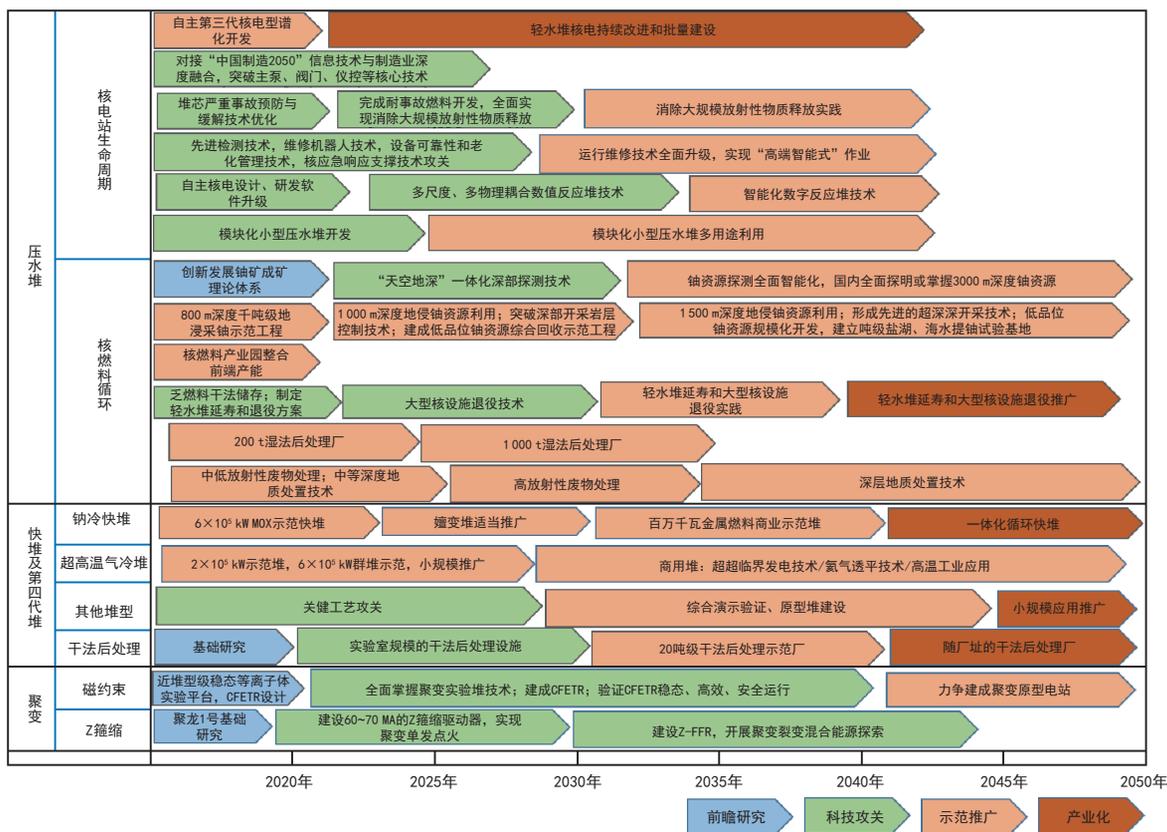


图 1 核能技术发展路线图

或者超铀元素嬗变紧迫性的认识，目前预测发展规模有较大的不确定性。

聚变能源开发难度非常大，需要长期持续攻关，乐观预计在 2050 年前后可以建成示范堆，之后再发展商用堆。

(二) 重点技术发展建议

1. 以第三代自主压水堆为依托，安全、高效、规模化发展核能

优化“华龙一号”和 CAP 系列自主第三代核电技术，2020 年前后形成型谱化产品，开展批量建设，带动核电装备行业的技术提升和发展；通过开展核燃料产业园项目，整合核燃料前端产能，海水提铀、深度开采等技术取得突破；突破关键技术，实现后处理示范工程及商业规模工程的建设，开展乏燃料中间储存技术和容器研制，与后处理实现合理的衔接；全面实施中低水平放射性废物的处理，制定轻水堆的延寿和退役方案，积极推进核废物地质处置和嬗变技术，使核能利用的全生命周期能够

保证公众和生态安全。2030 年前后，完成耐事故核燃料元件开发和严重事故机理及严重事故缓解措施研究，预期核安全技术取得突破，在运行和新建的核电站全面应用，实现消除大规模放射性释放；海水提铀形成产业化规模，支持核能规模化发展；形成商业规模的后处理能力，闭合压水堆核燃料循环，建立地质处置库。

2. 加快第四代核能系统研发，解决核燃料增殖与高水平放射性废物嬗变

建议我国现阶段以技术成熟度最高的钠冷快堆为主，尽快实现商业示范，不断提高经济性并产业化推广，同时发展以干法后处理为核心的燃料循环技术，争取在 2050 年实现快堆与压水堆匹配发展。适时开发用于嬗变的专用快堆或者 ADS 系统，紧密跟踪行波堆燃料研发情况。

3. 积极发展模块化小堆，开拓核能应用范围

小型模块化压水堆、高温气冷堆、铅冷快堆等堆型，固有安全性好，在热电联产、供热（城市区域供热、工业工艺供热、海水淡化）、浮动核电站、

开拓海洋资源等特殊场合有独特优势。

4. 努力探索聚变能源

深入参加 ITER 计划，全面掌握聚变实验堆技术；积极推进 CFETR 主机关键部件研发、适时启动 CFETR 全面建设。鼓励 Z 箍缩尽快实现点火，探索 Z 箍缩驱动惯性约束聚变裂变混合堆，加强聚变新概念的跟踪。

（三）存在的问题和政策建议

核电产业链包括前端（含铀矿勘查、采冶、转化、铀浓缩，燃料元件生产）、中端（含反应堆建造和运营，核电设备制造）、后端（乏燃料储存、运输、后处理、放射性废物处理和处置，核电站退役）等环节。核电站从建设到退役要历经百年时间；放射性废物处置历经时间更长，需要及早统筹规划。我国核电发展存在“重中间，轻两头”的情况，随着核电规模化发展，前端和后端能力不足的现象将更加严重。

核能领域有几项前沿或者颠覆性的技术，可能会对未来能源结构产生深远影响，比如海水提铀、快堆、钍铀循环、聚变能源、聚变裂变混合能源。这几项技术理论上都存在解决全人类千年以上的能源供应的潜力。每一项技术成熟度不一，又存在不同的技术路线，但是国内研究全面铺开，造成力量分散，各自为战。

针对上述问题，建议国家进一步加强顶层设计

和统筹协调；系统布局，建立和完善核能科技创新体系；加强基础研究，特别是核电装备材料、耐辐照核燃料和结构材料等共性问题的研究；加强包括前端和后端的核电产业链的协调配套发展。建议依托我国现有的核相关领域有实力的科研机构和企业，整合国内资源，组建核能国家实验室，集中力量推进我国核能产业健康、快速发展，促进我国能源向绿色、低碳转型。

参考文献

- [1] IAEA. Nuclear power reactors in the world [R]. Vienna: IAEA, 2018.
- [2] World Nuclear Association. World nuclear performance report 2017 [R]. England and Wales: WNA, 2017.
- [3] 中国核能行业协会. 2018年1—3月全国核电运行情况 [R]. 北京: 中国核能行业协会, 2018.
China Nuclear Energy Association. Nuclear power plants operation in China from January to March, 2018 [R]. Beijing: China Nuclear Energy Association, 2018.
- [4] Mydee Schneider, Antony Froggatt. World nuclear industry status report 2017 [R]. Paris: MacArthur Foundation, 2017.
- [5] IAEA. International status and prospects for nuclear power 2017 [R]. Vienna: IAEA, 2017.
- [6] IAEA. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 [R]. Vienna: IAEA, 2017.
- [7] Mydee Schneider, Antony Froggatt. World nuclear industry status report 2015 [R]. Paris: MacArthur Foundation, 2015.
- [8] IAEA. Advances in small modular reactor technology developments, 2016 edition [R]. Vienna: IAEA, 2016.
- [9] IAEA. Nuclear technology review 2017 [R]. Vienna: IAEA, 2017.