

# 我国核安全技术发展战略研究

彭述明<sup>1</sup>, 夏佳文<sup>2</sup>, 王毅韧<sup>3</sup>, 彭现科<sup>4</sup>, 黄洪文<sup>1</sup>, 郑春<sup>1</sup>, 丁文杰<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730030;  
3. 国防科技工业科学技术委员会, 北京 100039; 4. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088)

**摘要:** 核安全是国家安全体系的重要组成部分, 是发展核事业的前提、基础和生命线。先进可靠的核安全技术是保持并提高本质安全的基石, 开展核安全技术战略研究对于建设核科技强国意义重大。本文采用“总-分-凝-综”的思路, 通过院士访谈、实地调研、会议研讨、资料调研等多种途径, 对我国核安全技术体系展开深入研究。结果表明: 在总体国家安全观和核安全观的指引下, 近年来我国核安全技术进展明显, 核安全业绩良好; 但也面临核安全标准体系建设有待深化、核安全软件研发统筹不足、核安全高精尖装备受制于人等瓶颈问题。为持续推进核安全治理体系与治理能力现代化, 实现核大国向核强国的历史性跨越, 建议进一步完善核安全标准体系; 统筹资源、集中攻关, 推进自主化核安全软件高质量发展; 强化“政产学研用”结合, 解决高端核安全装备“卡脖子”问题。

**关键词:** 核安全技术; 标准体系; 核安全软件; 核安全装备

**中图分类号:** TL99 **文献标识码:** A

## Development Strategy of Nuclear Safety Technology in China

Peng Shuming<sup>1</sup>, Xia Jiawen<sup>2</sup>, Wang Yiren<sup>3</sup>, Peng Xianke<sup>4</sup>, Huang Hongwen<sup>1</sup>,  
Zheng Chun<sup>1</sup>, Ding Wenjie<sup>1</sup>

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China; 2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730030, China; 3. Science & Technology Commission of STIND, Beijing 100039, China; 4. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Nuclear safety is a key component of the national security system, and it is the foundation and lifeline of the nuclear industry. Advanced and reliable nuclear safety technology is crucial for maintaining and improving intrinsic safety. Therefore, conducting strategic research on nuclear safety technologies is important for enhancing the nuclear industry in China. In this article, we conduct an in-depth research on China's nuclear safety technology system using methods including academician interviews, field surveys, conference discussion, and literature review. The results show that, guiding by the overall national security and the nuclear safety concepts, China's nuclear safety technology has made significant progress in recent years and its nuclear safety performance is good. However, China's nuclear safety technology system still face several bottleneck problems. For example, the nuclear safety

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-03-19

通讯作者: 黄洪文, 中国工程物理研究院核物理与化学研究所研究员, 研究方向为核能科学与工程; E-mail: hhw@caep.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国核科学技术发展战略研究(二期)”(2020-ZD-12)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

standards system needs improvement, the overall planning of nuclear safety software research and development is insufficient, and the precision and advanced nuclear safety equipment still depends on foreign countries. To continuously modernize the nuclear safety governance system and governance capacities and strengthen China's nuclear industry, several suggestions are proposed. First, the nuclear safety standards system should be further improved. Second, independent nuclear safety software with high quality should be promoted by coordinating scientific research resources to tackle key problems. Third, government, industry, university, research, and application need to be coordinated to research and develop high-end nuclear safety equipment.

**Keywords:** nuclear safety technology; standards system; nuclear safety software; nuclear safety equipment

## 一、前言

核安全在国家安全体系中具有举足轻重的地位，是国土安全、国防安全、经济安全等其他安全的重要支撑。核安全工作具有高度的专业技术特征，历史上发生的严重核事故在一定程度上都与核安全技术的缺陷或不足有关 [1]。持续开展科技创新、完善核安全技术体系、从本质上提升核安全水平、预防核事故发生，对保障国家国防安全、实现核事业健康有序发展、推动生态文明建设、支撑经济社会高质量发展、满足居民现代化生活需求具有重要意义。

核安全技术是为保证核与辐射安全、防止核事故发生以及减少或缓解核事故造成的危害损失而产生的科学理论与技术方法 [2]。随着切尔诺贝利、三哩岛、福岛三起核事故的发生，核安全技术受到重视的程度愈来愈高。相比核电发达国家，我国核安全技术起步较晚、基础薄弱；近年来出台了多项政策文件，全面部署核安全技术领域的相关工作，力争尽快达到国际先进水平。目前，我国在核安全法律法规体系、核安全监管体系、核安全软件自主化、核安全装备自主化、核安全文化建设等方面取得了显著进步，为核电“走出去”打牢坚实基础。

为持续提升我国核安全技术水平，实现核科技强国的长远发展目标，在中国工程院“中国核科学技术发展战略研究（二期）”咨询项目的支持下，本文着力开展核安全发展战略研究和核安全技术发展顶层设计：分析核大国的核安全技术整体进展，研究新时代背景下现代化建设对核安全技术的宏观需求，总结已有成就并凝练存在的问题，提出核安全技术重点方向和攻关路径；针对性提出对策

建议，以期为我国核安全技术发展、管理举措研究提供基础参考。

## 二、国外核安全技术发展现状

### （一）核安全标准体系不断完善，规定明确可操作

国际原子能机构（IAEA）于 20 世纪 70 年代开始制定安全标准，90 年代中期对已有安全标准进行了大规模梳理；此后不断更新和完善，形成了具有较高水准的核安全标准体系。随着世界核电相关产业的迅速发展，IAEA 制定的核安全标准已成为保障核能安全、高效、可持续发展的重要手段，被许多成员国采纳使用 [3]，如世界上拥有核电装置数量最多的美国、法国。

美国、法国在参考 IAEA 标准的同时，立足本国工业基础和技术体系，分别建立了符合国情的自主化核电标准体系。由于核能技术发展存在先后，美国、法国在核安全标准制定模式上存在一定差异性，但最终均建立了独立、完整、可操作性强的核电标准体系；随着核安全技术的持续深入发展，相关核安全标准体系也在不断更新和完善，这也为两国核电装备出口提供了良好基础。

美国在核电技术上具有先发优势，核领域标准最为齐全完整，覆盖了核工业全产业链；相关标准超过 1000 项，绝大多数标准具有原创性 [4]。作为核电技术引进国，法国采用了“引进—转化—再创新”的高效发展道路：在参考美国相关标准体系的同时，充分考虑本国法律、工业基础等实际因素的影响，成立专门的标准化组织负责核安全标准制定并进行统一管理；尽管这种集中管理模式在一定程度上削弱了标准对技术创新发展的引导潜力，但为加快工业体系应用、合理降低对标准使用者的资质

要求、固化标准内容、稳步形成高质量标准体系提供了极大便利 [4]。

### (二) 基础研究持续深入, 反应堆数值模拟能力不断增强

核电安全分析软件是核电站设计、建造、运行的重要支撑。核科技强国在发展核电技术过程中均高度重视核安全分析软件的研制, 发展了适用于不同场景的核安全分析软件; 为验证核安全分析软件的有效性, 搭建了大型整体性能试验台架 (如法国 BETHDY 实验台架、日本 ROSA 实验台架、美国俄勒冈大学的 APEX 实验台架等 [5]), 对相关软件的应用推广起到了重要作用。

随着核安全分析软件研究的深入, 近年来事故现象与机理、算法理论等基础研究得到显著加强。欧盟通过 NURESIM、NURISP、NURESAFE 等连续性项目的实施, 提高了先进算法 / 建模、超级计算平台应用等方面的研究层次, 形成了更高时间和空间精度的堆芯物理、热工水力、燃料性能、材料辐照性能等方面的核安全分析软件系统。另外, 在 CASL 计划、NEAMS 项目支持下, 美国相关机构完成了高精度核安全分析软件研发工作 [6,7]。得益于数十年研发经验与知识成果的积累, 这些核安全分析软件的技术状态和能力趋于成熟, 在核电厂设计、安全运行、事故预防方面发挥了关键作用。

### (三) 核安全装备的创新能力提升, 掌握高精尖核安全设备的市场主动权

以美国为代表的核科技强国依托雄厚的工业基础、核电技术先发优势, 通过自主知识产权、核心关键技术的不断积累和扩充, 掌握了核安全设备的研发、设计、生产、检测维修等系列先进技术, 形成了完整的核安全装备体系; 通过持续优化改进, 装备产品性能得到大幅提升, 在精度、可靠性等方面占据绝对优势, 掌握精密仪器、关键设备的市场主动权。以堆用核仪器仪表为例, 美国、法国企业经过长期发展, 覆盖各个细分方向; 美国 Thermo Fisher 公司为全球 16 个国家和地区的 130 多个核电反应堆提供了 650 多个中子通量监测道, 为全球 30 多个研究堆提供了 130 多个中子通量监测道 [8]。

## 三、我国核安全技术取得的成就

### (一) 核安全业绩良好, 核安全技术接近国际先进水平

当前, 我国核能整体安全形势平稳, 安全记录良好, 运行核电机组未发生 2 级及以上核事故, 主要运营业绩保持了世界先进水平, 部分安全指标达到国际领先。新建核电机组的设计性能指标满足国际最新核安全标准, 在建核电机组质量可控, 研究堆、核燃料循环设施安全隐患得到消除且安全风险进一步降低。核设施退役、废物治理工作持续推进, 核技术利用管理日趋规范, 铀矿冶辐射环境风险治理取得明显进展。核电厂在抵御洪水、地震等极端自然灾害, 预防并缓解严重事故等方面的能力进一步提升, 应急准备、应急响应能力不断增强 [9]。

### (二) 基本建成与国际接轨、符合国情的核安全法律法规标准体系

我国不断健全政策法规体系, 将核安全纳入国家总体安全体系并写入《中华人民共和国国家安全法》, 颁布实施《中华人民共和国核安全法》, 推动《中华人民共和国原子能法 (征求意见稿)》的立法审议。首次发表《中国的核安全》白皮书, 系统描绘相关法规标准体系的建设路线图; 根据国际最新标准, 修订核安全部门规章, 完善核与辐射安全管理体系 [10]。

### (三) 核安全分析软件研制取得预期进展

中国核动力研究设计院在核电重大专项“核电关键设计软件自主化技术研究”的支持下, 完成了针对我国第三代先进核电“华龙一号”定制开发的核电设计与分析软件包 NESTOR [11]。国家电投集团科学技术研究院有限公司依托“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站科技重大专项”中的“核电关键设计软件自主化技术研究”课题支持, 完成了反应堆堆芯物理、热工水力、系统安全分析一体化软件包 COSINE 的研发 [12]。中国广核集团有限公司独立研发了具有完全自主知识产权的核设计软件包 PCM, 据此完成“华龙一号”堆芯设计 [13]。这些专用软件的良好进展, 展示了我国核安全分析软件的自主化能力, 为国产核电装备“走出去”提供了重要助力。

### （四）核安全装备技术持续改进，装备国产化率不断提升

通过技术引进和自主攻关，我国基本掌握了第二代/第三代核电核岛、常规岛大多数关键设备的设计制造技术。目前，第二代改进型核电设备完全实现国内制造；自主研发的第三代先进核电“华龙一号”设备国产化率超过85%，反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器、堆内构件等设备均由国内制造。整体来看，核电安全的关键设备和材料国产化工作稳步推进，除少数设备、零部件和材料外，基本实现自主化。

## 四、我国核安全技术面临的挑战

### （一）核安全标准体系建设有待深化

2018年11月，生态环境部核与辐射安全中心对我国核安全标准进行了梳理，编制了“核安全标准体系表”，由通用、核动力厂、研究堆、核燃料循环设施、放射性废物、核材料管制、民用核安全设备、放射性物品运输8个专业系列构成，共有标准项目111个。然而，相关标准的数量、完整性低于核电发达国家，模块化小堆、研究堆、核燃料循环设施、核设施退役等重点方向的核安全标准仍有所缺失，核设施退役计划、核设施退役特性鉴定计划等标准尚未建立。例如，在核电厂退役方面既缺少退役设计、退役安全、存量估算等方面的标准，又缺少总体程序、安全质量方面的规定，与相关法律、法规、规章等对于退役的规定和要求不相匹配[14]。

一是核安全标准体系建设的抓总单位尚未明确，管理呈现条块分割，导致核安全技术发展体系性不强、交叉与缺项问题共存。《中华人民共和国核安全法》仅规定了“国务院有关部门按照职责分工制定核安全标准”，没有明确规定总体及职责分工[15]；同时在标准制定过程中，行业内不同单位、不同堆型技术的发展主体存在着各自的利益诉求，均希望以各自主导的技术来引导行业标准制定，标准编制权的竞争也加剧了标准统一的困难。

二是具有自主知识产权的标准没有得到应有重视，标准制定与完善过程中的相关基础验证研究及实验数据较为匮乏。以核岛机械设备为例，一些关键参数及指标缺乏相应的基础实验数据，标准制定仍需参考国外做法[16]。基础研究、基础

数据的缺乏，严重削弱了我国在国际标准制定方面的参与力度和话语权；当国外标准升版时，国内标准亦需随之升版，详细的解释工作离不开国际和国外标准化组织的技术支持。

### （二）核安全软件研发统筹不足

随着核电软件自主化的不断推进，我国初步形成了可用于核电出口的自主软件平台，但仍以堆型专用为主。国内自主通用软件的研发仍处于初级阶段，与国外已开发数十年并获得广泛使用的通用软件相比，在通用性、可靠性、稳定性等方面均存在不小的差距；自主化软件的应用能力未能得到行业性公认，也未形成“使用-反馈-改进”的良性循环。

一是缺少核安全分析软件研发的顶层设计，参与各主体未形成合力。在我国，软件自主化已得到广泛重视，各科研渠道均有不同形式和程度的支持，相关核电企业、高等院校均有参与；但研发力量更倾向于独立实施业务，未能统筹资源，存在重复、交叉、缺漏等现象；各软件研发主体的实验数据、反应堆运行数据、基准题库共享补偿机制缺失，合作程度不够，在国家层面尚未构建统一共享平台。

二是软件算法、复杂现象等方面的基础研究薄弱。我国在核安全分析软件研发方面起步较晚，尽管近十年来已有明显改观，但整体业务仍以学习、模仿、消化吸收等方式推进；对于软件研发基础前沿问题，如严重事故现象、机理、分析模型，两相流算法适用性、精确性等探索不足，已有软件与国际先进水平仍存在一定差距。

三是核安全分析软件的质量控制水平有待提高。软件需要严格的验证和确认，涵盖程序产品和过程的分析、评价、审评、审查、评估、测试。国家核安全局2014年发布的《核电厂安全分析计算机软件的开发和应用》，初步建立了核电软件开发、评审体系方面的标准。也要注意，我国核安全软件的工程化水平还不高，产品质量控制体系仍需要一定周期的迭代和完善，开发者、评审者也需要进一步积累经验，以克服质量控制的技术手段与意识薄弱、软件质量难以保证、软件有效性/可靠性/可维护性程度低等不足[17]。

### （三）核安全高精尖装备仍受制于人

为响应国家核电“走出去”战略，核电设备国

产化进程不断推进；但在发展过程中过于重视国产化率，忽略了一些关键核安全设备、核心零部件及材料的研发，导致不少关键零部件及材料仍较多依赖进口。另外，已实现国产化的设备与材料，品质控制需要进一步提升。

一是产业政策引导、“产学研”结合的市场机制尚不完善。制造工艺需要在持续不断地应用、改良过程中逐渐成熟和固化，才能实现产品质量可控、性能稳定并持续提升。由于不少国产关键核电设备与国外同类产品相比存在一定差距，核电业主往往倾向于选择技术成熟的国外设备，导致不少国产设备仍停留在研究阶段或工程起步阶段。国产设备不能从实验室、工厂走向实际工程应用，便不易发现相关工程应用可能存在的问题，更谈不上精准改进[18]。以堆用核仪器为例，国内企业研发能力不足，生产工艺改进不充分，产品批次一致性不高，产业化能力有待提升，导致国内产品在可靠性、一致性方面弱于国外同类产品，影响了核电业主的产品选用。

二是新原理、新方法、原材料、元器件等基础研究投入不足。在核安全设备国产化水平不断提升的同时，国内企业的精密及高可靠性装备制造技术水平仍落后于国外，部分关键零部件及材料仍需大量进口。一些关键技术（如多种核 I 级阀门的研发、设计、生产、检测维修）国内装备企业尚未完全掌握，部分关键制造工艺（如自给能探测器方面的钒丝制造加工工艺、矿物绝缘电缆与接插件焊接工艺）国内企业还处于摸索过程中[8]；一些关键元器件（如用于辐射监测设备生产的高性能探测器、光电倍增管）均依靠进口[18]。此外，不少国内生产企业仍停留在产品仿制阶段，产品性能不够先进；以镍基焊条为例，单从化学成分、力学性能上来看，国产镍基焊条与国外产品相差不大，但焊接操作性能却明显不足，如电弧不稳定、焊条脱渣性差、电流适应性差等问题普遍存在。

三是核安全装备的质量文化、核安全文化建设重视不够。新装备及新工艺的突破，其配套的质量保证体系建设、核安全文化建设往往未能及时跟进，导致执行工艺纪律不够严格，低级错误问题频繁出现，设备整体质量控制不严。以三门核电站为例，一期 AP1000 核岛主设备制造过程中出现了不少质量问题，给设备制造工期、设备造价

等带来了不利影响[19]。

## 五、我国核安全技术重点方向及发展步骤

### （一）核安全标准体系

2025 年，核设施退役、小型堆管理等重点方向的核安全标准趋于完善并形成体系，标准质量持续提升，形成自主、统一、协调、先进并与核电发展水平相适应的核安全标准体系。

2035 年，核电贸易国双边、多边合作机制基本建成、持续推动，标准化科研、科研成果转化全面展开；与核电强国的标准互认、标准共建、技术交流合作稳步推进，促进我国在国际核安全标准制定方面的话语权提升。

2050 年，核安全标准体系全面达到国际领先水平，保障国内及海外市场的核电安全与可持续发展。

### （二）自主化核安全分析软件

2025 年，围绕核安全领域重大需求，成立核安全分析软件国家级实验室，开展核安全软件研发战略与政策研究；集中科研机构、高等院校、企业的优势力量，在现象、机理、算法理论等基础研究方面实现突破，支撑重点方向核安全分析软件的自主化；自主化软件在各核电单位及研究机构开展示范应用，初步实现“测试-反馈-改进”的良性发展与演进提升，促进国产核电“走出去”。

2035 年，核安全分析软件实现完全自主化，重点方向核安全分析软件达到并部分超过国际先进水平；实验验证平台能力不断完善，部分关键性平台获得国际认可。

2050 年，自主化核安全软件获得充分应用与工程验证，整体达到国际领先水平，面向国际市场推动广泛应用。

### （三）关键核安全装备

2025 年，国内核电业主（含其他核设施营运单位）与供应商之间形成长期可持续的合作模式，在保证核电安全运行的前提下，在国外设备供货方向逐步引入国产化设备。

2035 年，核电设备研发厂商与核电业主开展协同，保持国产化设备的高品质发展，形成稳定高效的核电设备供应链；通过经验反馈体系持续发现问

题、解决问题，积累研发生产能力，提高国内供货商的市场竞争力，鼓励参与国际市场竞争与合作；推动核电建造成本大幅下降，国产化核电设备获得国际市场认可。

2050年，关键核安全设备、零部件及材料达到并部分超过国际先进水平；核电建设成本进一步下降，国产化核电设备占据国际市场的较大份额。

## 六、对策建议

### （一）优化完善核安全标准体系

针对核安全标准部分领域存在缺项、缺乏自主统一体系等现状，提出发展建议：及时开展《中华人民共和国核安全法》相关配套性文件的制定工作，为核安全治理体系建设提供顶层依据；注重核安全标准体系建设的顶层设计，厘清相关管理部门之间的权责关系，明晰职责分工，制定核安全技术总体框架体系、基本内涵及发展路线图；加强核安全标准相关的基础研究，在标准的研究制定过程中，明确量化指标，提高可操作性。

### （二）统筹资源、集中攻关，促进自主化核安全软件高质量发展

为解决自主化核安全软件共享机制不健全、基础研究薄弱、验证确认不充分等问题，应有统一有序的组织协调、系统科学的规划论证、全面严格的质保标准、科学合理的平台验证、权威公正的确认机构。建议保持自主化核安全软件研发的统一管理，统筹相关软件研发主体的科研资源、要素配置，建立实验平台、基础数据的共享机制；加强软件算法、机理、现象等基础研究，打牢自主化核安全软件水平提升的基础保障；完善核安全软件的质量保证体系建设，开展自主化核安全软件的示范应用和推广。

### （三）注重核电装备基础研究，开展国产化装备质量建设

针对高精尖装备、关键零部件、材料自主可控不足等问题，提出发展建议：开展关键核级设备、零部件、原材料的加工制造工艺基础研究，发挥制度性优势，以计划与市场兼顾的方式安排优势单位解决基础性、战略性、“卡脖子”问题；发挥市场

的调节和主导作用，辅以政策引导、资源支持，精准高效解决装备自主化问题；完善核安全设备质量标准体系，强化制造企业的核安全文化建设。

### 参考文献

- [1] 陆浩. 中华人民共和国核安全法解读 [M]. 北京: 中国法制出版社, 2018.  
Lu H. Interpretation of the Nuclear Safety Law of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2018.
- [2] 蔡莉. 反应堆安全技术发展方向研究 [C]. 北京: 中国核学会2017年学术年会论文集, 2017.  
Cai L. Research on development direction of reactor safety technology [C]. Beijing: Proceedings of the 2017 Annual Meeting of the Chinese Nuclear Society, 2017.
- [3] 商照荣, 王文海. 借鉴IAEA安全标准体系完善我国核与辐射安全法规标准体系 [J]. 核安全, 2010 (4): 3-13.  
Shang Z R, Wang W H. Referring to IAEA system to improve Chinese standards system on nuclear and radiation safety [J]. Nuclear Safety, 2010 (4): 3-13.
- [4] 邓瑞源, 王福囤, 梁雪元, 等. 国际国内核领域标准概况 [J]. 核标准计量与质量, 2017 (1): 4-10.  
Deng R Y, Wang F T, Liang X Y, et al. Overview of international and domestic nuclear standards [J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2017 (1): 4-10.
- [5] 刘宇生, 张春明, 马帅, 等. 大型热工水力试验台架研究 [C]. 北京: 中国核学会2013年学术年会论文集, 2013.  
Liu Y S, Zhang C M, Ma S, et al. Research on integral thermal-hydraulic test facilities [C]. Beijing: Proceedings of 2013 Annual Meeting of China Nuclear Society, 2013.
- [6] 何元雷, 李小燕, 王勇. 核能数值反应堆国内外研究现状及进展 [J]. 核科学与技术, 2015, 3(2): 41-47.  
He Y L, Li X Y, Wang Y. Current research status and progress of nuclear energy virtual reactor in China and abroad [J]. Nuclear Science and Technology, 2015, 3(2): 41-47.
- [7] 杨文, 胡长军, 刘天才, 等. 数值反应堆及CVR1.0研究进展 [J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 1821-1832.  
Yang W, Hu C J, Liu T C, et al. Research progress of China virtual reactor (CVR1.0) [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 1821-1832.
- [8] 花锋, 杜俊涛, 郑勋涛, 等. 核电厂堆用核仪器技术现状与发展趋势 [J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(4): 517-522.  
Hua F, Du J T, Zheng X T, et al. The recent status and future development trend of nuclear instrumentation technology of nuclear power plants [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, 39(4): 517-522.
- [9] 杨金凤. “十二五”之成: 核安全水平全面提升 [J]. 中国核工业, 2017 (5): 13-15.  
Yang J F. Completion of the 12th Five Year Plan: Comprehensive improvement of nuclear safety level [J]. China Nuclear Industry, 2017 (5): 13-15.
- [10] 国家核安全局. 国家核安全局2019年报 [R]. 北京: 国家核安全局, 2019.  
National Nuclear Safety Administration. Annual report of National

- Nuclear Safety Administration in 2019 [R]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2019.
- [11] 刘东, 李庆, 卢宗健, 等. “华龙一号”设计分析软件包NESTOR的研发与应用 [J]. 中国核电, 2017, 10(4): 532-536.  
Liu D, Li Q, Lu Z J, et al. Development of nuclear power design and analysis package NESTOR [J]. China Nuclear Power, 2017, 10(4): 532-536.
- [12] 刘华. 我国核电自主化软件的验证和确认 [J]. 科技视界, 2015 (30): 67-68.  
Liu H. The verification and validation of independent software for nuclear power [J]. Science & Technology Vision, 2015 (30): 67-68.
- [13] 王超, 杨铄龔, 彭思涛, 等. 自主PCM核设计软件包的自动化验证 [J]. 核动力工程, 2018, 39 (S2): 46-49.  
Wang C, Yang S Y, Peng S T, et al. Automated validation of CGN nuclear software package PCM [J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(S2): 46-49.
- [14] 王苗, 付在伟. 核电厂退役标准体系建设需求分析 [J]. 核标准计量与质量, 2019 (2): 2-7.  
Wang M, Fu Z W. Requirement analysis of nuclear power plant decommissioning standard system [J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2019 (2): 2-7.
- [15] 高思旂, 宋大虎, 孟德. 核安全标准化工作的现状与建议 [J]. 环境保护, 2018, 46(20): 50-51.  
Gao S Y, Song D H, Meng D. Status and recommendations of nuclear safety standardization [J]. Environmental Protection, 2018, 46(20): 50-51.
- [16] 董瑞林, 梁雪元, 邓瑞源. 加强标准化建设, 推动核电“走出去” [J]. 核标准计量与质量, 2017 (1): 2-3.  
Dong R L, Liang X Y, Deng R Y. Strengthening standardization construction and promoting nuclear power “going out” [J]. Nuclear Standard Measurement and Quality, 2017 (1): 2-3.
- [17] 张娜, 刘东. 核安全相关设计分析软件开发过程质量控制研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(11): 63-66.  
Zhang N, Liu D. Research on the quality control in development process of nuclear safety software for design and analysis [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(11): 63-66.
- [18] 黄秋豹, 王晖, 甘霖. 核电厂辐射监测设备国产化进展及方向 [J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 90-92.  
Huang Q B, Wang H, Gan L. Radiation monitoring equipment localization progress and direction [J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(9): 90-92.
- [19] 刘世辉, 郭鹏, 牛传贵, 等. 三门核电工程核岛设备制造新工艺的应用和质量监督要点 [J]. 通用机械, 2018 (3): 50-53.  
Liu S H, Guo P, Niu C G, et al. Application and quality supervision of new manufacturing process for nuclear island equipment in Sanmen nuclear power project [J]. General Machinery, 2018 (3): 50-53.