

先进小型核反应堆发展前景及其所面临的问题

刘冲,黄勇^①

(南华大学 电气工程学院,湖南 衡阳 421001)

[摘要] 采用标准化和模块化设计的小型核反应堆在安全性和经济性方面的优势,将扩大核能在新兴工业国家和发展中国家的市场,有望成为我国核电设备出口的重要组成部分。文章描述了小型核反应堆的发展现状,分析了小型核反应堆的优势、应用前景及推广应用可能面临的问题,提出了在我国开展小型反应堆研究和应用的建议和策略。

[关键词] 核能; 小型反应堆; 先进反应堆; 模块化

[中图分类号] TL413+ **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2018)04-0010-05

在当今全球工业经济迅速发展的时代,许多国家都面临着能源供应安全、环境约束等诸多现实问题。核能作为重要的新兴能源,不仅在满足世界日益增长的能源需求方面可以发挥非常重要的长期作用,而且对解决与全球气候和环境影响有关的挑战具有明显优势。

小型反应堆(SMR, Small and Medium-sized Reactors)核电站凭借初期投资少、建造周期短、可以有效解决中小电网输电问题等优势得到了世界各国,尤其是发展中国家的关注^[1-2]。采用标准化和模块化设计的先进小型反应堆,具有更高的安全性和灵活性^[3],因此,人们越来越重视小型核反应堆技术的研究、开发和应用,许多西方及亚洲核电国家甚至把加快先进小型反应堆研发上升到了国家战略^[3]。进入21世纪以来,全球核工业再次掀起小型核电机组的开发热潮,一方面是因为大型堆的总造价高、建设周期长,另一方面也存在小型电网对小堆型核电机组的需求。国际原子能机构(IAEA, International Atomic Energy Agency)在本世纪初就发布了一系列小型反应堆发展报告,努力推动小型反应堆技术的研究和开发,并大力提倡小型核电厂在发展中国家的应用,鼓励发展和利用安全、可靠、经济上可行与核不扩散的中小型反应堆。由此可见,小型反应堆将成为全球核工业复兴的一个重要组成部分。

一 小型核反应堆的发展现状

根据国际原子能机构的定义,核电机组功率小

于300MWe的反应堆为“小型反应堆”^[1-5]。按技术路线的不同,小型反应堆大致可分为轻水堆、高温气冷堆、液态金属冷却快中子反应堆和熔盐反应堆等几大类型^[2,4]。小型反应堆的开发已经有几十年的历史,全球核工业已建造了数百座小型动力堆用作海军舰艇动力装置或中子源,许多国家在小型反应堆的研发、设计、建设和应用领域积累了大量的工程技术经验^[5]。

日本和韩国从20世纪90年代末就意识到了小型核电厂的潜在国际市场,并积极开展了针对发展中国家需求的小型反应堆研究,以便将来在国际市场上占据优势。

美国凭借在AP600和AP1000研发、安全评审过程和综合测试结果与分析中积累的经验,对非能动安全系统的瞬态特性和设计原则有了很深刻的认识,多种先进小型压水堆方案开始从概念阶段走向全面工程设计和安全评估阶段,“非能动”的理念也引入到小型堆设计中。美国“国际革新安全反应堆”(IRIS, International Reactor Innovative and Secure)项目是最早进入全面工程设计和安全评估的先进小型压水堆,采用了一体化、模块化压水堆设计方案,在固有安全性方面较传统堆型有较大改善^[6-9],有效地提高了反应堆的安全性和经济性,它的一些设计方案基本成为了现有先进小型压水堆的设计标准,众多其它的先进小型压水堆方案大多都参考了IRIS设计原则和安全评估方法。比如,美国

[收稿日期] 2018-03-28

[基金项目] 湖南省自然科学基金项目“核信号数字化成形甄别关键技术研究”资助(编号:2018JJ2316)

[作者简介] 刘冲(1966-),男,湖南祁阳人,南华大学电气工程学院副教授,博士。

^①中广核研究院有限公司工程师。

的 NuScale 多功能小型压水堆和西屋小型压水堆 (Westinghouse SMR), 充分利用了已有的非能动安全系统和部件设计, 在技术成熟度上达到了较高的水平。法国 Flexblue 小型压水堆, 是法国原子能与替代能源委员会同多个公司合作研发的一种下潜式、柱形全模块化移动式的海上浮核电站。此外, 法国原子技术公司也开发了具有非能动安全特性的 NP300 型压水堆, 其设计目标是为海外市场提供电力、热力和海水淡化服务。俄罗斯的 KLT-40S 是一种用于破冰船上的小型反应堆, 可用于偏远地区的供电与供热。阿根廷国家原子能委员会开发的先进小型核电厂则是采用一体化蒸汽发生器的模块式压水堆, 用于发电、海水淡化或作为研究堆。韩国设计的 SMART 反应堆则具有一体化的蒸汽发生器和先进的安全特性, 主要用于发电、供热以及海水淡化, 等等。

近年来, 我国核电企业也加快了小型核反应堆研发和推广步伐, 在满足海上钻井平台, 海岛开发, 偏远地区等供电、供热、海水淡化, 核能制冷等多元化需求方面做了大量工作。我国的 CNP300 压水反应堆最早在秦山核电站建设投运; 自主研发的 NHR-200 则是一个构造简单且高效率的一体化压水堆, 可用于地区供热或海水淡化; ACP50S 海上核动力平台是中国广核集团自主研发、自主设计的紧凑型、多用途海上小型反应堆技术, 是一个以满足最高核安全要求和海洋用户需求为目标的分布式海洋综合能源系统, 其单堆热功率为 200MW, 可为海上油气田开采、海岛开发等领域的供电、供热和海水淡化提供可靠、稳定的电力; 中核集团研发的 ACP100S 海上小堆技术已被纳入我国能源创新“十三五”规划。作为小型反应堆 ACP100 的海上应用型号, ACP100S 则是完全自主研发、自主设计的小型海上反应堆。ACP100S 在研发设计原则上满足最新核安全法规及相关导则的要求, 吸收和借鉴了第三代核电技术和先进设计理念, 实现了研发和工程相结合、科研和试验验证相结合。

事实上, 中国核工业集团公司、中国广核集团公司、国家核电技术有限公司、中国电力投资集团公司、清华大学都在开展小堆的前期工作, 中船重工集团也进行了海洋核动力平台的研发, 初步形成了不同功率匹配的海洋核动力平台方案^[6]。

二 小型反应堆的应用前景

随着世界各国经济的不断发展, 对电力的需求在不断增加, 越来越多的国家计划发展核电^[6-7], 而

小型反应堆不仅具有核能发电、城市采暖供热、工业工艺供热/供电、海水淡化等多种功能, 还可以与其它新能源组成联合能源系统。许多海岛国家和海岸线长的国家都明确表示对海上小堆型核电站的急切需求, 这些国家将是核电技术和装备的主要目标市场, 这也为我国核电行业进入海外市场提供了良好的机遇。

(一) 小型反应堆的优势

小型堆以其安全性能高、运行灵活、适应性强、用途广等诸多优势, 在未来具有较为广阔的发展空间^[8,10-12]。与传统的大功率反应堆相比, SMR 的选址也更为灵活。大型核电站至少需要 300 英亩的土地, 而 SMR 仅需要 40 英亩, 海上核电站还可以建设在海上移动平台上。传统核电站的投建成本约 100~150 亿美元, 而修建两个 SMR 机组核电厂的耗资仅 10~20 亿美元。成本是决定产业命运的关键因素, 这样的成本规模显然极具吸引力, 更为重要的是 SMR 有望在未来 9~10 年内实现商业化批量生产。

(二) 小型反应堆是未来核电的现实选择

小型反应堆不仅建造周期短、成本低, 而且可以通过相应的交通工具运输, 能够为偏远地区或海岛提供现实的、经济可行的能源保障。小型反应堆还可以作为应对各种紧急情况的备用电源, 为遭受自然灾害袭击的地区提供电源, 从而提升对突发性灾害的应急处理能力。

在这方面, 美国和俄罗斯等国家已经走在世界前列。美国政府已经着手部署规模小、建设方便的微型核反应堆发展规划。俄罗斯用于破冰船上的 KLT-40S 小型反应堆有望在近期投入运行。

此外, 由于大型核反应堆的一次性投资成本很高, 许多发展中国家难以承担和解决核电站建设的一次性融资问题, 而小型堆机组规模小、初期投入成本低, 它既可以单个机组建造, 也可以通过选择多个这样的系列化小型堆模块, 分阶段、分批次的资金投入和滚动式发展的核电建设方式, 来逐步增加核电站发电容量, 最终建成一座大型核电站。与大型核电机组不同的是, 其规模经济性是通过增加模块数量来实现的。因此, 备受这些国家的关注。

(三) 海上小堆核电站市场巨大

长期以来, 由于住人岛屿远离大陆, 电力供给和淡水供应一直是个难题。许多岛屿居民的电力和淡水供应得不到保障, 难以满足经济发展的需要。近海石油、天然气开发, 同样也面临着钻井平台电力保障供应和淡水供给的现实问题^[8]。随着海洋资源开发平台规模扩大、数量增多, 对动力能源需求更加

迫切。海上小堆技术的应用则是解决远海能源供给的重要途径,更加有助于提升一个国家的海上资源开发能力。因此,所有这些因素也是促成加速建造海上核电站的动因,“即插即用”型的小型模块化反应堆更受关注,应用前景广阔,海上核电站时代已经来临。

在国外,按照规划,俄罗斯还将建设一批浮动式核电站,为大型工业项目、港口城市、海上油气钻探平台提供能源。包括印尼、马来西亚、阿尔及利亚和阿根廷在内的近20个国家都对此表示了浓厚的兴趣,亚洲被认为可能是海上核电站的最大市场。

在国内,我国海域辽阔,西沙群岛、南沙群岛等远离大陆数百甚至上千公里,海上核电站将在我国海洋开发与建设中发挥重要作用。仅就海上石油钻采方面的需求而言,未来市场规模将超过1000亿元,仅渤海湾每年就将形成500亿元的核动力装备制造产值,同时带动相关配套产业的发展,可满足渤海海洋开发的市场需求,经济效益显著。此外,中国拟计划未来几年在南海各岛礁建造20座海上核动力浮动平台,按照每座造价20~30亿元造价,总造价大约为400~600亿元。海洋核动力平台的建造将支撑起我国对南海地区的实际控制、开发能力,完善南海地区的电力和能源系统,从而拉动南海地区的商业开发和我国相关产业的快速发展^[13]。

三 小型反应堆推广应用所面临的问题

小型反应堆凭借着其自身的优势,得到了世界各国尤其是发展中国家的关注。因为应用范围、运营监管方式等不同于大型商业压水堆的特点,小型模块化反应堆将带来核能系统的全面革新,发展小堆被业内认为是再造一个新的核工业。中国核电产业要想走出国门,在海外开拓小型反应堆国际市场并取得长足发展,除了要面临来自激烈的国际竞争压力和不确定性政治风险外部因素影响外,小型反应堆技术问题、安全性与经济性问题等,也是我国核电行业必须面对的现实问题。

(一)小堆技术问题

虽然我国在小型模块化反应堆的设计、研发和建造上取得了一定的成果,但是,反应堆小型模块化不只是尺寸上的简单缩小,更是反应堆技术的系统性变革。尤其是海上核电站建造的环境大多是近海或远海,由于其特殊的运行环境和作业环境,现有的技术并不能直接应用并制造出经济性良好和性能安全可靠民用海上核动力平台,其设计和装备制造仍具有很高的竞争门槛,同时还要兼顾技术上的自

主性和成熟性、装备设施性能的先进性等,才能在目标市场上具有较强的竞争优势。

与核电强国相比,我国在小型反应堆特别是海上小堆技术方面的研究起步较晚,到目前为此,我国还没有成型的商业化小堆技术方案完成建造,小型反应堆技术的成熟性和前景如何仍有待具体示范工程项目的验证。

(二)小堆安全性问题

在安全方面,世界各国在核电建设时都无一例外地始终坚持质量第一、安全第一的原则。在基于小堆技术的新型核电站的设计、建造和运行中,都要采用纵深防御机制和非能动安全技术,从设备上和措施上提供多层次的重叠保护,确保反应堆的反应性得到有效的控制、燃料组件得到充分冷却、放射性物质能有效屏蔽和任何情况下都不发生泄漏。

由于小型反应堆电站的初期投资规模小、选址要求低、建设比较灵活,小型反应堆甚至可以应用于电负荷较高、人群较密的城区。因此,建造地域分布将会更加分散,特别是海上核电站所依赖的平台环境大多远离大陆,在运行过程中必将都会受到包括自然环境、意外事件、安全监管与安防条件等各种特殊外部因素影响,在现有的技术条件和运营管理经验下,促进小型反应堆核电产业发展,如何解决小堆的安全性问题也是我国核电行业必须面临的新挑战。

(三)小堆经济性问题

包括海上小堆在内的小型反应堆,虽然具有很多优势,但也存在发展劣势,主要表现在:(1)建造成本问题。因为小型反应堆的单位功率的系统设备费、燃料费、操纵员培训费、人员管理费、审评费及后处理费等等都可能增加,这就意味着反应堆的单位千瓦材料成本有可能随着尺寸的减小而增加^[5,14]。(2)建造周期问题。采用模块化设计、设备系统模块化工厂预制和现场模块化组装建设的小型堆,单堆的优势并不突出。比如小堆群项目,由于某些原因导致后续小堆项目不能按原计划进行,其规模经济性和整体的建设周期可能就不再具有优势。(3)审批方面的问题。由于目前各国的法律法规、核电项目审评程序等主要是针对大型核电站的,发展小堆就必须为其设施制造制定出新的审批和检查程序,这些都将延长工程的建设周期,从而影响经济效益。(4)退役问题。小堆的乏燃料处理更复杂,场址分布更加分散,使得小堆退役过程也更为复杂,需要投入更多的资金来建造专门的核设施退役和乏燃料处理工厂。

因此,在小型堆开发与应用中,安全可靠、完全自主知识产权的核心技术、完善的法律法规和标准体系、完整的装备制造产业链及其经济性等,都是关系到小堆技术能否进入国际市场的重要因素。

四 小型堆研发与应用市场拓展的策略与措施

纵观全球,新兴经济体国家因经济发展、电力短缺以及环境因素等问题急需清洁能源支持,未来核电发展及全球核电市场开始由发达国家向新兴经济体国家转移。目前,中国核电“走出去”的目标市场集中定位在“一带一路”沿线国家,小堆型核电的优势在这些国家的核电发展中尤为明显,因此,针对我国小堆核电技术“走出去”面临的现实状况提出以下建议。

(一) 加强顶层设计,形成国家战略

核电作为高技术与资金密集型相结合的产业,加上核电行业涉及到国家安全、核技术与核扩散等一系列敏感问题,国家之间的核电合作基本上都是外交行为与商业行为,由国家层面主导和推动。国家相关部门在做“一带一路”、互联互通等市场布局时,要专门研究沿线国家小型堆核电市场的布局、供给和竞争形势,明晰哪些国家有发展小型反应堆核电站的需求和潜在市场规模。

(二) 深化体制改革,规范经营秩序

小型反应堆的大规模高速发展将对我国核电体制提出更高的要求,进一步深化核电体制改革成为现阶段急需解决的问题。政府应统筹规划和完善核电“走出去”战略,建立一个强有力的调节机制,由高层领导直接牵头,多部门共同参与,通过深化核电体制改革,建立科学、开放、公平的核电市场准入原则,规范企业经营秩序,整合我国小型堆研发的各方力量,核电企业抱团出海,才能真正发挥“国家队”的优势。

(三) 加快技术研发,创新合作模式

要使中国核电真正走出去,打开“丝路”沿线国家小型堆核电市场,必须要加速小堆技术的全面研发。同时,要打破核电研究机构和企业各自为政的局面,研究机构与核电企业之间、核电企业内部都应开展各种形式的合作,在国内外小堆建设和运营中实现互利共赢。只有拥有自主知识产权的小堆反应堆核心技术和建立有效的合作机制,才能在核电强国觊觎的“丝路”沿线国家的小型堆核电市场和激烈的国际核电市场中立于不败之地。

(四) 加强风险评估,完善法律体系

中国核电“走出去”必须充分考虑目标市场潜

在的政治环境与安全风险,对这些风险做出充分评估和准确判断,采取有效应对措施和策略,制定出最优的投资模式,化风险为机遇。政府要主导进行权威性评估,建立政治风险防控信息平台,及时向国内企业发布相关地区的政治风险信息,有效规避所在地区存在的重大政治风险与战乱隐患。同时,建立相应的风险预警与特殊情况处置机制,帮助对外投资企业消除政治方面的系统性风险。还要发挥行业协会、商会、NGO(非政府组织)等非官方平台的沟通作用,为企业“走出去”及在东道国落地生根创造良好的社会环境。

目前,我国涉核法律体系建设还远远落后于核电发展步伐,无法适应我国核电产业“走出去”的要求,应该尽快完善我国涉核法律建设。首先,要完善国内涉核法律体系建设,形成较为完善的核能法律法规体系。可以通过借鉴西方国家核安全立法先进经验,制定适合中国国情的法律,同时完善相应部门的规章制度^[15-16]。其次,要加快统一我国核电标准技术路线,尽快形成完整的核电标准体系。只有这样,才能提升我国在涉核国际规则制定中的话语权,从而使我国在国际涉核事务上占据主动权,为我国核电进军海外核电市场提供法律保障。

五 结语

先进小型反应堆设计方案普遍采用了模块化、一体化设计和非能动安全系统,有效地提高了反应堆的安全性和经济性。目前,随着国际核电市场稳步复苏、核电技术不断改进和建设成本逐步下降,许多核电国家纷纷调整了核能发展战略,将小型反应堆作为未来核电发展的重点,目的是扩大核能在多种领域的应用,并提高在国际核能市场的竞争优势。

我国应加快完善小型反应堆的安全法律法规、规范标准和健全管理体系的步伐,推行小型反应堆运营管理专业化模式,致力于发展小堆自主核心技术,加快推进性能更先进、安全系数更高的先进小型核反应堆的研发进程,积极参与小型堆核电的国际市场竞争。

[参考文献]

- [1] IAEA. Status of Small and Medium Sized Reactor Designs [R]. Vienna: IAEA, 2012.
- [2] 刘志铭,丁亮波.世界小型核电反应堆现状发展概况[J].国际电力,2005,9(6):27-31.
- [3] 陈培培,周赞.世界先进小型压水堆发展状况[J].核动力工程,2012,33(5):136-139.
- [4] 张国旭,解衡,谢菲.小型模块化压水堆设计综述[J].

- 原子能科学技术,2015,49(增刊1):40-47.
- [5] 郭志峰,王海丹.中小型核电反应堆的市场前景[J].国外核新闻,2011(5):18-19.
- [6] 熊厚华,杜继富,曾正魁,等.模块式小型反应堆研发现状及前景分析[J].价值工程,2015(2):30-31.
- [7] 陈传涓,李家杰,杨泽华,等.小型反应堆技术及我国应用前景[C]//.宁波:先进核电站技术研讨会,2013(9):5-12.
- [8] IAEA. Advance in SMR technology development[R].Vienna: IAEA, 2014.
- [9] 林一平,陈玲玲.建造浮动式核电站群势在必行[J].交通与运输,2017(1):53-55.
- [10] 周蓝宇,齐实,周涛.小型模块化反应堆发展趋势及前景[J].科技创新与应用,2017(21):195-196.
- [11] 李佳佳,刘峰,赵芳.国外海上浮动核电站的产业发展现状[J].船舶工程,2017,39(4):7-11.
- [12] 陈培培,周贇.我国发展先进小型轻水反应堆的一些思考[J].中国核电,2012,5(1):136-139.
- [13] 陈文军,姜胜耀.中国发展小型堆核能系统的可行性研究[J].核动力工程,2013,34(2):153-156.
- [14] 张宇.我国小型堆项目开发前景分析和探讨[J].能源工程,2012(6):14-17.
- [15] 胡帮达.我国核安全法规体系的问题及其完善[J].世界环境,2017(2):16-17.
- [16] 刘峰,李佳佳,刘丽红,等.国外海上浮动核电站政策和标准规范[J].船舶工程,2017,39(4):12-15.

The Development Prospect and Problems of Advanced Small Nuclear Reactor

LIU Chong, HUANG Yong

(University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The advantages in safety and economy enables small modular reactors (SMRs), which are characterized by standardized and modular designs, to expand nuclear energy markets in emerging industrial countries and developing countries, and become an important part of China's export of nuclear power equipment. This paper describes the development status and application prospects of SMRs, analyzes the possible problems of popularization and application, and puts forward some suggestions and strategies for the research and application of SMRs in China.

Key words: nuclear energy; SMRs; advanced reactors; modularization