

## 国际快堆发展综述

张东辉, 王松平, 代智文

(中核霞浦核电有限公司, 福建 宁德 352000)

**摘要:** 快堆着眼于铀资源的高效利用和放射性废物最小化管理, 是核能发展的高阶阶段。因此, 在第4代核能系统的6种堆型中, 有3种是快堆。在历经多年发展之后, 从全球来看, 快堆中的钠冷快堆已完整走过实验堆、原型堆和示范堆, 系统性解决了技术和配套体系问题, 其工程化水平已处于商业化前夜。快堆规模化推广, 将打破核能发展的天花板,  $^{238}\text{U}$ 的利用使得核能总资源量达到全球已知化石能源总和的5.6倍, 可以在千年尺度上解决全球能源问题。同时, 快堆的推广也将为清洁能源体系的建立、双碳目标的实现打下坚实基础。本文综述了国际快堆技术的发展概况, 提出第4代核能系统——快堆在安全性、可持续性、经济性和核燃料循环体系建立等方面面临的技术挑战与突破, 并指出快堆未来的发展趋势。

**关键词:** 快堆; 清洁能源; 双碳; 第4代核能系统

中图分类号: TL41

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)S2-0265-06

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0501

## Review on Development of Sodium-cooled Fast Reactor Worldwide

ZHANG Donghui, WANG Songping, DAI Zhiwen

(Xiapu Nuclear Power Corporation, Ningde 352000, China)

**Abstract:** Fast reactors focus on the goal of efficient utilization of uranium and the minimization of radioactive waste, which is an advanced stage in the development of nuclear energy. Therefore, three of the six reactor concepts for generation-IV nuclear energy systems are fast reactors. Through decades of development around the world, sodium-cooled fast reactors (SFR) have completely developed through experimental, prototype, and demonstration reactors' stage, solving technical and engineering system problems systematically, and towards the commercialization stage. The promotion of fast reactors will break the limitation of nuclear energy, and the use of  $^{238}\text{U}$  will make the total resource of nuclear energy reach 5.6 times the sum of all fossil fuels, which can solve global energy problems on a millennium scale. Meanwhile, the promotion of fast reactors will also play a key role in establishing a clean energy system and the achievement of carbon peaking and carbon neutrality goals. This paper provides an overview of the development of fast reactors worldwide, highlighting the technical challenges and breakthroughs of fast reactors in terms of safety, sustainability, economy, and the establishment of nuclear fuel cycle systems. It also points out the development trends of fast reactors in the future.

**Key words:** fast reactor; clean energy; carbon peaking and carbon neutrality goals; generation-IV nuclear energy systems

快堆,即快中子增殖反应堆,是利用快中子引起原子核裂变链式反应并可实现核燃料增殖的核反应堆。与传统热中子反应堆相比,快堆具有更高的中子经济性和燃料利用率,可以更高效地利用铀资源、嬗变长寿命放射性废物,是实现核能环境友好型大规模可持续发展的重要现实途径。

快堆的核心技术包括反应堆中子物理设计、热工水力设计、材料和燃料等。此外,快堆还应考虑配套的后处理等核燃料循环相关技术。其中,反应堆物理设计涉及中子能谱控制、堆芯功率分布展平优化等方面;热工水力设计则关注反应堆冷却剂的热工水力特性,确保反应堆在正常工况下的稳定运行和事故情况下的安全;核燃料循环与后处理技术是支撑快堆实现核燃料增殖和

放射性废物最小化的关键环节。

我国核能发展坚持“热堆-快堆-聚变堆”三步走战略。快堆作为三步走中的关键第2步,可以将裂变核能提升到一个全新水平,实现千年尺度的能源自由。在“碳达峰、碳中和”的目标实现上具有重要的战略意义和科学价值,是维持核能大规模可持续发展的必然选择,是应对可再生能源的不稳定性、构建未来新型能源体系的关键,助力实现我国能源安全和可持续性目标。本文综述国际快堆技术的发展概况,并指出快堆未来发展趋势。

## 1 国际发展概况

典型快堆主系统如图1<sup>[1]</sup>所示。

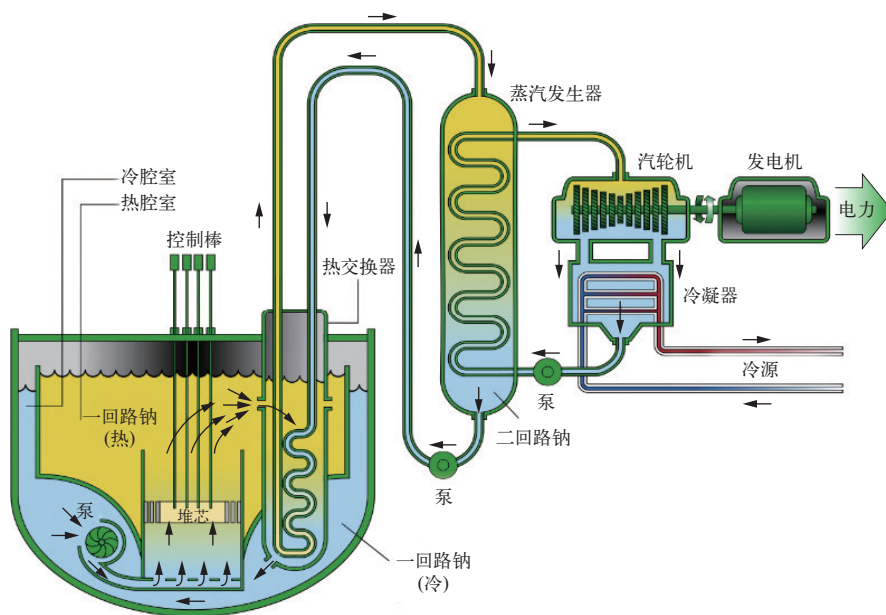


图1 典型的钠冷快堆结构示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Typical schematic diagram of sodium-cooled fast reactor<sup>[1]</sup>

快堆无中子慢化剂,中子平均能量较热堆高7个数量级。典型的快堆和压水堆中子能谱对比如图2所示。从图2可看出,在典型快堆中,由于中子未被慢化,其堆内中子能量均处于快中子和中能中子区,在能量低于1 keV的能区基本没有中子。热堆则采用将中子慢化到0.025 eV附近,以获得更大的裂变截面,实现更少的裂变材料达到临界质量。

自20世纪40年代快堆技术问世以来,全球范围内多个国家纷纷投入快堆的研发。目前,国

际快堆发展呈现出多元化、合作化的趋势。一些国家已经建立了较为完善的快堆研发体系,并积累了丰富的经验。同时,国际间的交流与合作也在不断加强,共同推动快堆技术的发展和应

用。20世纪80年代,随着石油危机的发生,西方工业化国家纷纷将目光投向核能,期望用快堆彻底解决国家的能源问题。在快堆技术的发展过程中,一些国家取得了显著的成果<sup>[2]</sup>。例如,俄罗斯(前苏联)和美国开快堆之先河,建造了大批研究堆,积累了大量数据;法国作为最早开展快堆研究

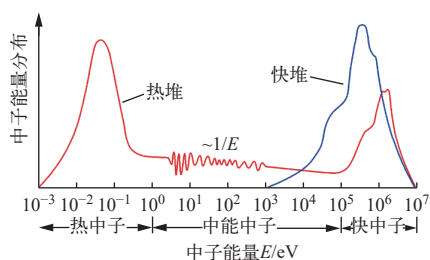


图2 快堆和热堆中子能谱对比

Fig. 2 Comparison of neutron energy spectra between fast reactors and thermal reactors

的国家之一,其凤凰快堆是全球首个实现商业运行的快堆,其建造的1 200 MWe的超凤凰快堆是迄今为止人类建造的机组容量最大的快堆;英、德、日、韩、印等国家也在同时期陆续开展了大量的快堆研发工作。我国作为快堆技术的后发国家,自“863计划”实施以来进展迅速,不但建成了65 MWt的中国实验快堆<sup>[3]</sup>,霞浦核电建设的快堆也是仅次于俄罗斯880 MWe商用大功率快堆电站BN-800的第二大在运快堆机组。但由于各国的国情不同,发展快堆的技术方案和规划也有所不同。我国持续推进快堆与压水堆匹配协同发展,构建“快堆-压水堆”二元核能发展体系,将助力核能在有限的时间窗口内成为大规模可持续的主力清洁能源,支撑我国能源安全和双碳目标的实现。

俄罗斯是世界上唯一一个几十年来坚持持续不断发展快堆的国家<sup>[4]</sup>。其国家战略是通过保持核能技术的先进来保障其大国地位,近年来更是实施了包括快堆、聚变等在内的“突破”计划。截至到目前,俄罗斯共建造了BR-5、BOR10、BOR-60等研究堆,并前后建成了BN-350、BN-600、BN-800等多座大型快堆。目前,其多功能实验快堆MBIR正在建造,以替代即将达到寿期的实验堆BOR-60;300 MWe的模块式铅冷快堆BREST-OD-300正在建造;1 200 MWe的BN-1200M也获得了俄罗斯安全监管部门的审查,开始进入建造准备阶段。

美国的快堆技术一度领先全球,自1946年在洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室建造了世界上第1座快堆克莱门汀(Clementine)后,又建造了EBR-I、EBR-II、Fermi、SEFOR、FFTF等实验堆,目前其主要精力集中在燃料和新材料开发上。在快堆型号开发方面,GE公司的PRISM一体化快堆、泰拉能源的Natrium快堆是其发展的

重点。其中,Natrium钠冷快堆已经开工建设,这也是美国第1个非水堆先进核能电站。联邦政府投资建造的实验快堆VTR也在准备中<sup>[4]</sup>。

法国作为欧洲核能发展的领头羊,在快堆方面持续不断开展了相关工作<sup>[4]</sup>。1967年,法国建造了40 MWt的实验快堆狂想曲(Rhapsodie)。1973年,建成了250 MWe的原型快堆凤凰(Phénix),用从灰烬中重生的凤凰寓意在热堆的乏燃料中生长起来的快堆。1985年,法国建成了商用示范堆超级凤凰(SuperPhénix),但由于和凤凰堆跨度太大,其运行状态差强人意,最终于1998年宣布退役。在21世纪伊始,法国又开启了600 MWe第4代钠冷快堆ASTRID的研发,并基本完成了概念设计,且选择凤凰堆所在的马库地区作为厂址,但由于经费问题,ASTRID项目目前处于暂停状态。

日本是一个能源短缺国家,利用核能缓解其能源供给问题是日本的国策。为实现核能的可持续发展,日本也是较早开展快堆研究的国家,1977年就建成了140 MWt的实验快堆长阳(Joyo),1994年建成了280 MWe的原型快堆文殊(Monju)。之后,日本又开发了1 500 MWe的商用快堆JSFR<sup>[4]</sup>。

印度也是一个能源短缺国家,在核能方面制定了雄心勃勃的发展计划。在快堆方面,1985年建成了40 MWt的实验快堆FBTR,目前正在建造500 MWe原型快堆PFBR。在PFBR建成后,还拟建造4座500 MWe的PFBR,根据其规划,快堆容量远期要达到250 GWe以上<sup>[4]</sup>。

国际主要大型快堆参数列于表1。

## 2 技术挑战与突破

尽管快堆技术具有诸多优势,但在实际发展过程中仍面临诸多技术挑战。例如,快堆对核燃料和反应堆结构材料的要求较高,需要开发具有优异性能的新材料。总体来看,快堆的主要技术挑战主要在第4代核能系统提出的几个方面,包括更高的安全性、发展的可持续性、提升的经济性和配套的核燃料循环体系建立等。

### 2.1 安全性

以池式钠冷快堆为代表的快堆具有良好的固有安全性。作为冷却剂的钠在常压下沸点为883℃,距540℃的工作温度还有超过340℃的裕度,因此快堆的工作压力接近常压;钠的导热系数是水的100多倍,可在各种工况下有效导出堆内热量,

表1 国际主要大型快堆参数<sup>[4]</sup>  
Table 1 Main parameters of large-scale SFR<sup>[4]</sup>

国家	电站名称	冷却剂	堆型	电功率/MW
俄罗斯	BN-600	钠	池式	600
	BN-800	钠	池式	880
	BN-1200M	钠	池式	1200
	BREST-OD-300	铅	池式	300
印度	PFBR	钠	池式	500
	FBR1&2	钠	池式	600
法国	ASTRID	钠	池式	600
韩国	PGSFR	钠	池式	150
日本	JSFR	钠	回路式	1 500
美国	Sodium	钠	池式	345

保证堆芯的完整性等。针对未来核能发展的需求,快堆主要在以下几个方面进一步提高反应堆的安全性。

### 1) 负反馈设计

良好的负反应性反馈是确保反应堆本质安全的基础。钠冷快堆的反馈主要包括多普勒反馈、堆芯径向变形、堆芯轴向变形、燃料组件弯曲、控制棒膨胀效应、钠密度/钠空泡效应等。前面5种反馈都可以可靠地设计为负反馈,对于钠空泡设计上则要格外关注,大型快堆如果在中心区域发生沸腾,则有可能引入正反应性。为此,有两种解决方案,第1种方法是将堆芯设计扁平,增加中子的泄漏,从而降低正反应性的数值;第2种方法是将堆芯做“夹心饼”式设计,通过在活性区中心区域设置贫铀区吸收中子,也可以降低正反应性的数值。相对而言,第2种设计可以提高中子经济性,更具未来发展方向。总体而言,堆芯反应性总体上要设计为负反馈,以确保反应堆对事故的自抑制能力。但需要注意,过大的负反馈将导致反应堆的调节难度加大。

### 2) 停堆系统

在停堆系统设计方面,除了需要设立两套独立的停堆系统,且每套都要具备将反应堆引导至冷停堆的能力,还需设置1套专门的非能动停堆系统,进一步提高反应堆的非能动保护能力。非能动停堆系统主要发展方向包括水力浮动安全棒设计、居里点安全棒设计、小球式设计等。其中,水力浮动式安全棒设计已经比较成熟,在俄罗斯BN-800快堆上已有成功应用。居里点安全棒设计是在停堆机构的上部设置居里点式磁性材料,

在反应堆功率流量失配的情况下,优于堆芯出口温度升高,导致居里点式材料磁性丧失,安全棒自动下楼。小球式停堆机构设计是在堆芯上部停堆棒管内封闭有 $B_4C$ 吸收体小球,在事故工况下下部封闭膜被切开,小球沿管道下落到堆内,从而实现停堆<sup>[5]</sup>。该型设计主要是针对在堆芯变形情况下停堆功能的实现开展的。

### 2.2 可持续性

可持续性 is 四代核电的首要要求,其本质主要在3个方面<sup>[1]</sup>: 1) 资源利用率; 2) 放射性废物管理; 3) 环境友好性。四代核电中的快堆,尤其是钠冷快堆可以很好满足这三方面的要求。

首先是资源利用率。热中子堆使用的 $^{235}U$ 在天然铀中仅占0.7%, 99.3%是 $^{238}U$ 。采用钚作燃料的快堆,在每次重核裂变时放出比热中子堆更多的中子,除了用于链式裂变消耗的一个中子外,有更多的中子可以将 $^{238}U$ 转化为 $^{239}Pu$ ,且转化的比消耗掉的更多,从而实现核燃料的增殖<sup>[3]</sup>。典型的钠冷快堆增殖比可以达到1.1~1.5。如此循环往复,理论上可以实现100%的铀资源利用率,考虑到循环过程中可能的损耗,利用率至少可以达到60%以上。但要实现这一目标,关键是燃料。目前有两种主流燃料,一种是MOX燃料,该种燃料是混合铀钚氧化物燃料,相对比较成熟。但由于燃料中氧的比例较高,对中子有慢化作用,反应堆能谱比较软,导致增殖比下降;另一种燃料是金属燃料,该种燃料为U-Pu-Zr三元合金。因燃料中不含氧,从而实现了更硬的能谱,可以获得更高的增殖比。因而,金属燃料也被选为先进快堆燃料。该型燃料开发的重点在于耐高dpa损伤的包壳材料。随着材料性能的提高,燃耗深度可以加深,从而显著提高快堆电站的经济性。

其次是放射性废物管理。在压水堆等热中子反应堆的乏燃料中,存在镅、镎、钷等长寿命次量锕系元素(MA),这使得热堆乏燃料要储存13万年以上才能衰变到天然铀水平,达到与环境无害的程度。在快谱系统中,可以利用高能中子将这些MA嬗变掉,从而实现将放射性废物的毒性时间从13万年下降到几百年,废物量下降1~2个数量级。为实现该目标,主要有两种方式,一种是开发专门用于嬗变的快中子系统,包括中子动态特性更好的中型快堆或中子能谱更硬的ADS(加速器驱动的次临界系统);另外一种是不分离MA,而是将

其与钚同步制成燃料随堆嬗变,也称为均匀嬗变,这种方式更加经济,且核燃料循环系统更加简化。

第三是环境友好性。这主要表现在正常运行对环境 and 人员的影响,以及事故情况下的影响。在这方面,钠冷快堆表现出比传统热中子反应堆和其他四代堆型的优势。经过对钠冷快堆超过400堆年运行数据的统计,正常运行时对环境放射性影响是水堆的约1/100。在事故情况下,即使在最严重的假设条件下,事故的后果也基本局限在厂内,对周边环境和公众的影响极小。在这方面,四代堆的主要改进方向是 $^3\text{H}$ 的控制,其中钠冷快堆通过钠净化用冷阱已经将90%以上的 $^3\text{H}$ 进行了捕集,明显优于其他四代堆型,后续主要在于改进冷阱结构,进一步提高捕集效率。

### 2.3 经济性

经济性是核电站发展的核心指标。四代堆的经济性主要在3个方面开展优化,一是全系统的优化设计,使得在整个能源链上比其他能源形式有优势;二是通过模块化设计缩短建造周期,降低财务风险;三是发挥四代堆的高温特性(基本上所有的四代堆都是高温系统),开展供热、制氢等多用途应用。

对于钠冷快堆,目前比较急迫的工作包括:1)降低比投资。要充分发挥钠冷快堆固有安全性高的优势,简化系统设计、优化安全分级。同时,充分利用低工作压力的特点,降低设备制造成本。根据各主要快堆国家已有工程实践和分析预测结果来看,未来在规模化推广时,比投资基本可以和压水堆相当。2)降低燃料费。从实际运行数据来看,除燃料费的运行成本,钠冷快堆与压水堆基本相当。弹性比较大的部分在燃料费用。如果采用同厂址燃料再生模式的一体化快堆设计,则由于裂变燃料都是通过贫铀电厂自身生产,燃料费仅是组件的制造加工费,无需像压水堆等热堆一样购买天然铀和分离功,燃料成本将极大降低,且长期稳定在低位。因此,未来一体化快堆全寿期的经济性将显著优于目前所有的核能系统。如果考虑到一体化快堆还能生产多余燃料用于其他机组,以及在运行过程中可同步嬗变MA,其经济性将更优。

### 2.4 核燃料循环

与热堆的一次通过或有限循环相比,快堆的发展必须要和核燃料循环同步<sup>[6]</sup>。这也是为何快

堆只有少数核能强国才能开展的主要原因。首先,快堆的初装料所需工业钚来源于热堆乏燃料的后处理,这就需要建造千吨级大型后处理厂来批量化经济处理压水堆乏燃料;其次,由于快堆包壳材料的限制,快堆的辐照后增殖燃料也需要进行处理,重新制成燃料,反复在堆内使用才能达到更高的资源利用率。因此,快堆的发展必须同步考虑核燃料循环架构,以便达到系统最优化。

目前,最优的核燃料循环体系是快堆和压水堆组成的二元循环体系。天然铀首先供给压水堆使用,先最大程度发挥 $^{235}\text{U}$ 的价值;压水堆的乏燃料通过水法后处理大厂将工业钚、MA和堆后铀提取回收,裂变碎片通过玻璃固化整备,进入地质处置库;工业钚和堆后铀制成快堆燃料,同时按比例添加MA,在快堆内运行后,实现核燃料增殖和MA嬗变。辐照后的快堆组件通过干法后处理,将增殖的钚和剩余的铀、MA全部回收。其他裂变碎片整备成陶瓷体,由于其衰变周期较短,进行中等深度地质处置即可。增殖的钚留下自身使用的部分外,其余的钚可以用于建造其他快堆或提供给压水堆等热堆使用。这样的一套体系可以实现核能体系的整体最优化,即可以用有限铀资源保障核能大规模可持续发展,又可以有效管控长寿命高放废物。

## 3 未来发展趋势

钠冷快堆是所有四代堆中运行经验积累最为丰富的堆型。迄今为止,钠冷快堆完整走过了实验堆、原型堆、示范堆的全部阶段,从世界范围看,钠冷快堆最大已经可以建造到1200 MWe。我国通过相关快堆的设计建造,已经形成了世界上最为完整的快堆产业链。钠冷快堆已经处于商业化应用的前夜,不存在技术和装备制造方面的障碍。快堆的后续发展主要是找到适合于所在国情、不同设计的堆型。总地来讲,有下面两个显著趋势。

### 3.1 一体化快堆

服务于快堆的发展,核燃料循环有两种方式,一种是分离式建造,即核电站、后处理厂、燃料制造厂在不同的地方建造;另一种是同厂址集中建造,即一体化快堆。对于前一种,其优势是可以发挥规模效益,降低单位能力比投资。劣势也很明显,一是乏燃料必须经过6~8年的冷却,才能运输到后处理厂进行处理,这导致增殖核燃料的倍

增时间大幅增加到几十年,核能的规模将被长期限制在一个小规模;二是大量的铀频繁在路上运输,对于核安保极为不利。同厂址建造的优势十分明显,一是乏燃料可以当年处理,再加上金属燃料的高增殖比,倍增时间将缩短到几年,可支撑核能规模以指数级增长,迅速达到国家所需的装机规模;二是所有核材料都在厂内循环,不存在核扩散和核安保的问题。此外,由于干法后处理是模块式设计,后处理厂的规模对比投资的影响也非常有限。因此,一体化快堆是世界的主流发展方向,具有最高的核燃料循环效率,中国、美国、俄罗斯都有目标相似的方案。

### 3.2 系列化发展

钠冷快堆作为一种灵敏技术,可以满足不同用户、不同场景的需求。

型号一,大型基荷电站。该型快堆电站功率大于1 000 MWe,基于先进耐辐照包壳材料和快堆本身的燃耗反应性损失小的特点,可以实现24个月以上的换料周期,可以为电网提供稳定的基荷能源。

型号二,内陆调峰电站。钠冷快堆操作简单,可实现快速负荷跟随。另外,钠冷快堆的蒸汽参数高,常规岛可以采用全空气冷却。由于反应堆一、二回路都是钠作为冷却剂,也无需用水,所以钠冷快堆可以在干旱地区建造。与西北大型风电厂和光伏电厂配合,可以建立稳定的大型清洁能源基地,保证我国的能源安全和整体架构的低碳化,助力实现双碳目标。

型号三,供汽快堆。钠冷快堆的蒸汽温度可达490℃以上,可以满足绝大多数供汽需求。该型钠冷快堆可以和熔盐装置相结合,一方面隔离水和钠,提高安全性和可靠性;一方面通过熔盐储能装置稳定蒸汽输出,提高供汽的稳定性。

型号四,一体化模块快堆。该型一体化钠冷快堆功率规模为百MW级,主要瞄准全球能源供应,特别是发展中国家对稳定、经济能源的需求。可以实现快速建造,一次装料、终身运行。

型号五,小型可移动式快堆。针对海岛、基地、偏远无电网用户等的需求,可以利用钠冷快堆固有安全性高、低压的特点,开发MW级可移动式小型核电装置。装置总重量约20吨,可在工厂完成制造。采用智能控制,可无人值守。

展望未来,快堆技术的发展将呈现以下趋势:一是技术进一步成熟和完善,反应堆性能将不断提升;二是商业化应用将加速推进,快堆在全球能源结构中将会占据越来越重要的地位;三是随着环保意识的日益增强和核能安全性的不断提高,快堆技术将在实现核能可持续发展方面发挥更加重要的作用。

## 4 结束语

综上所述,国际快堆技术的发展正处于关键时期,既面临挑战也充满机遇。通过不断加强技术研发、推进商业化应用、加强国际合作与交流等方式,有望在未来实现快堆技术的广泛应用和可持续发展。快堆的商业化推广,一方面打破了核能发展的天花板,让人类拥有了千年能源;另外一方面对长寿命放射性废物可以进行有效管控,使得核能成为全方位的绿色能源。

### 参考文献:

- [1] A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems[R]. US: U. S. DOE, 2002.
- [2] COCHRAN T B, FEIVESON H A, PATTERSON W, et al. Fast breeder reactor programs: History and status[M]. [S. l.]: [s. n.], 2010.
- [3] 张东辉, 杨洋, 赵佳宁. 中国实验快堆的主要技术创新和工程经验[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(增刊): 194-198. ZHANG Donghui, YANG Yang, ZHAO Jianing. Main technical innovation and engineering experience of China Experimental Fast Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(Suppl.): 194-198(in Chinese).
- [4] 张东辉. 先进快中子反应堆技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2023.
- [5] 张东辉. 中国示范快堆技术选择探讨[J]. 中国核电, 2008, 1(2): 134-139. ZHANG Donghui. Technical selection for China's Demonstration Fast Reactor[J]. China Nuclear Power, 2008, 1(2): 134-139(in Chinese).
- [6] 张东辉, 乔鹏瑞, 杨勇, 等. 中国快堆及先进核燃料循环体系发展战略思考[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(10): 1816-1820. ZHANG Donghui, QIAO Pengrui, YANG Yong, et al. Strategic thinking on development of china fast reactor and advanced nuclear fuel cycle system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(10): 1816-1820(in Chinese).