

文章编号: 0258-0926(2016)S1-0127-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0127

钠冷快中子增殖堆安全监管重要关注点探讨

丁铜伟, 董博, 张强, 王林博, 黄婧

国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080

摘要: 钠冷快中子增殖堆(钠冷快堆)是一种最成熟、最具商业化前途的快堆堆型。但由于其材料、冷却剂安全性及经济竞争力等方面的原因,国内仍处于实验堆运行阶段。由于缺乏钠冷快堆安全监管方面的法规、标准、技术及经验,监管工作面临巨大挑战。本文将钠冷快堆与压水堆进行比较,并将钠冷快堆的特点与监管工作的特点相结合,从堆芯、系统及设备等方面提出15个监管重要关注点,并给出一系列相关建议。

关键词: 钠冷快中子增殖堆;安全监管;关注点

中图分类号: TL329 **文献标志码:** A

Discussion on Safety Regulation Major Concerns of Sodium-Cooled Fast Breeder Reactor

Ding Tongwei, Dong Bo, Zhang Qiang, Wang Linbo, Huang Jing

Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China

Abstract: Sodium-cooled fast breeder reactor (SFR) is recognized as one of the most mature and most promising commercial fast reactors. However, due to the aspects of materials, coolant safety and economics, SFR in China is still in the operation stage of experimental reactor at present. Due to the lack of SFR's regulations, standards, technology and experience of the safety regulation, the regulatory work is facing great challenges. In this paper, SFR is compared with PWR. The characteristics of SFR and safety regulatory are combined to propose 15 items of major regulatory concerns, such as core, system and equipment, and a series of related suggestions is given.

Key words: Sodium-cooled fast breeder reactor, Safety Regulation, Concerns

0 前言

目前快中子增殖堆(快堆)由于未达到商业化应用,缺乏相关的法律、法规、标准以及经验,形不成完备的监管体系。本文参考了压水堆安全监管时的关注点,结合中国实验快堆及国外钠冷快堆的特点,提出钠冷快堆监管中需关注的问题及建议供监管时参考。

1 钠冷快堆特点

钠冷快堆冷却剂钠化学性质活泼,易与氧和水起化学反应,为避免传热管破裂后,水与放射性钠反应造成的严重后果,增加了一条隔离回路,形成“放射性钠—非放射性钠—去离子水”的特

殊回路形式^[1],以增加其安全性。钠冷快堆按结构分为回路式和池式两种类型,其中绝大部分为池式结构,目前我国运行的中国实验快堆即为池式结构^[2]。在安全监管关注点上,这两种结构的快堆无本质区别。

钠冷快堆在中子能量、燃料、增殖、嬗变、能耗、冷却剂、装卸料、运行环境等方面与现今主流的压水堆都有较大区别^[3]。

2 安全监管重要关注点及建议

压水堆安全监管中关注的大部分重要问题,在钠冷快堆监管工作中都需引起重视,但同时又存在着各自的特点。因此压水堆的监管关注点只

能作为参考,不能直接应用。由于篇幅所限,本文仅论述安全监管需关注的一些重要问题。

2.1 堆芯及燃料部分

2.1.1 堆芯反应性 关注点:钠冷快堆堆芯燃料密集,可能由于燃料区中心位置局部区域的钠量减少或由于气体(氦气或裂变气体)被钠泵卷入堆芯形成钠空泡等原因^[3],会引入正的反应性,其结果会使反应堆功率激增,导致严重的事故。

建议:综合考虑反应堆的组成、燃料类型、钠体积分数、钠密度、堆芯高度及堆芯几何结构等的影响,避免引入正反应性,且必须使反应堆总的反应性系数始终为负。

2.1.2 快堆的控制 关注点:与热堆一样,钠冷快堆的控制也要靠缓发中子的作用,且燃料中的²³⁹Pu的缓发中子份额较小,瞬发中子寿命较短,导致钠冷快堆的控制系统要有更好的瞬态响应特性,因此控制系统必须设计得格外精准、可靠。目前,国内还没有此方面的实际相关经验。

建议:钠冷快堆在堆芯设计时必须进行零功率试验验证,以保证钠冷快堆的可控性。

2.1.3 实际增殖比 关注点:钠冷快堆最大优势是实现核燃料增殖,但是其实际增殖比随堆芯的燃料配置和铀的同位素组成而异。增加外围再生区组件的数目或硬化中子能谱可进一步提高增殖比;反之,缩小再生区或软化中子能谱有可能降低增殖比至1甚至小于1,此时反应堆的性质就发生了变化,由增殖堆变成了燃烧堆。

建议:需对反应堆的中子能谱、燃料配置和铀的同位素组成以及再生区燃料组件的数目进行重点关注。

2.1.4 堆芯传热 关注点:钠冷快堆堆芯密集,功率密度约为压水堆的3倍、沸水堆的6倍,冷却剂通过堆芯的温升约为132~200℃,而流量相对较低,所以堆芯传热问题特别突出。如何有效地将热量带出堆芯,避免堆芯燃料元件烧毁成为堆芯传热首先需要解决的问题。

建议:钠冷快堆高温差、低流量的特性,决定了通过提供足够大的传热面积是解决堆芯传热问题的主要有效手段。为了提供足够大的传热面积,需减小燃料棒直径,随之而来的是制造工艺和费用的问题,因此需综合考虑。

2.1.5 燃料芯块和包壳 关注点:钠冷快堆为提

高热利用率和适应功率密度的提高,燃料元件包壳最高温度可达710℃^[3],约是压水堆的2倍;铀钚氧化物混合(MOX)燃料的燃耗深度是水堆的2~3倍。高温、深燃耗以及数量庞大的快中子的强烈轰击,使快堆燃料芯块的蠕变、肿胀及包壳的强度、变形、化学腐蚀等问题都比热堆复杂得多。堆内装载二、三百盒组件,且中子注量率和温度分布不均,辐照肿胀和热膨胀会造成组件盒的弯曲,在堆芯中会产生很大的应力,甚至会造成堆芯变形。

建议:采取多孔隙、低密度的芯块,并采用强包壳原则设计包壳,加长包壳气体空腔等综合措施,防止元件包壳变形,并确保包壳的完整性。

2.1.6 堆芯流量分配 关注点:堆芯流量分配不合理,可能导致燃料元件的破损、烧毁。由于堆芯分为燃料区和再生区,所以堆芯流量分配问题比水堆复杂。随着堆内运行时间的增长,首先,再生区内有较高中子注量率的区域内会有较高的铀累积,产热量存在陡峭(5~20倍)^[3]的径向梯度;其次,燃料区组件的轴向峰值和堆芯总功率也会随运行时间而增加。

建议:在堆芯流量分配方面要充分考虑铀累积对产热量的影响,在再生区的燃料装载中,必须通过燃料元件的堆内实验来确定功率熔化比,从而选择合适的堆芯流量,避免发生部分元/组件烧毁事故。

2.2 系统部分

2.2.1 控制棒驱动系统 关注点:钠冷快堆的反应性控制不能通过在冷却剂中加硼酸实现,移动燃料组件或反射层组件在工程上又不易实现,因此只能用抽插控制棒这唯一实用的途径;控制棒驱动机构在高温钠环境下工作,控制棒数量很少,控制不易。

建议:要求控制棒响应迅速,能够准确地停在需要的位置上;至少有两套互不干涉、不同驱动原理的驱动机构,且每套都可达到独立快速停堆。

2.2.2 换料系统 关注点:钠冷快堆的换料属停堆换料范畴,但又不同压水堆的换料方式,而是通过旋转偏心旋塞系统,在惰性气体保护的钠液面下进行,堆芯密集、栅距小、高温(220~250℃)以及钠的不透明性增加了换料操作的复杂性。

建议：换料机能够对准和连接到任何一个待换料的燃料孔道并保证密封，避免放射性外溢；由于堆芯密集，栅距小，因此要求在不可视的环境下换料机抓手定位非常精确。

2.2.3 事故余热排出系统 关注点：钠冷快堆事故余热排出系统（以下称系统）由钠—钠热交换器、空冷器及相连接的管道等组成“放射性钠—非放射性钠—空气”的循环。空冷器钠侧平均工作温度约为 400℃，空气侧工作温度为所处位置的环境温度，系统工作在高温差、小流量工况下，如果系统被过度冷却，会导致钠局部甚至全部凝固而造成系统失效，对堆芯安全造成影响；若系统冷却不足，则不能快速有效建立循环，堆芯余热不能及时排出，同样会对堆芯安全造成影响。

建议：采取保温、电加热及暖风冷却空冷器等综合措施，使回路中的钠保持在合适的温度范围内，以便在事故状态下能迅速、可靠的建立自然循环，将堆芯余热及时排出。

2.3 设备部分

2.3.1 压力容器 关注点：由于钠冷快堆特殊的运行环境，其反应堆压力容器属于高温、密封、承压、承重、超大尺寸薄壁容器，在寿命期内装载着上千吨高温钠持续运行且不可更换，因此要求应具有良好的力学和加工性能；钠液面的波动和内压的存在可能产生棘轮效应。直径为 12~21 m、厚约 2 m 起着支承、屏蔽、密封和引导装卸料机等多项作用的顶盖是相当复杂的部件，其上下端面温差最高可达 500℃，极易产生热变形。

建议：考虑机械应力、高温蠕变以及因吸收 γ 射线而引起的热应力等问题；根据规范评估棘轮现象，防止压力容器变形失效；采取隔热、分舱设计等措施防止顶盖热变形及热应力超限。

2.3.2 安全壳 关注点：与压水堆不同，钠冷快堆安全壳一般由密封小室和封闭厂房等组成。在反应堆寿命期内，冷却剂钠始终在高温（220℃）下运行，要求安全壳除了具备压水堆安全壳的防止放射性物质释放和防止外部事件等部分特点外，还必须具备在事故情况下耐高温以及防止钠与混凝土以任何形式的接触等功能。

建议：确保安全壳能承受事故工况下钠火产生的热量释放导致的安全壳内温度和压力的上升，并在任何事故工况下都能保证封闭厂房的混

凝土不失效。

2.3.3 钠泵 关注点：钠泵是钠冷快堆最重要的设备之一，直接关系到反应堆的安全。大型钠冷快堆由于冷却剂流量及堆本体结构等的限制，主回路只能使用单级离心式机械钠泵。特别是池式钠冷快堆的钠泵悬挂在压力容器顶盖上，泵轴伸出十几米到达压力容器下部冷钠池内，因此泵轴的制造极为困难。

建议：采取措施保证泵轴在运行时的偏心度以及高温和温度瞬变引起的泵轴变形等在合理范围内；由于钠泵运行时温度变化大于 100℃，因此泵轴承的设计需允许轴的温度膨胀不受约束。

2.3.4 蒸汽发生器 关注点：蒸汽发生器在钠冷快堆中不仅具有热传输作用，还承担钠-水回路的隔离功能，蒸汽发生器的功能是否丧失，关系着反应堆能否安全运行。钠冷快堆一般使用直流列管式蒸汽发生器，其传热管两侧压差高达 13~18 MPa；在高温下运行，各部分温差大、温度变化大；给水一次通过传热管变成过热蒸汽，蓄水容积和蓄热能力小；缺少汽空间，抗扰动能力差，易发生流量漂移引起停堆。

建议：需考虑钠介质、高压差、工作温度高、各部分温差大及温度变化大而带来的蒸汽发生器传热管热膨胀、热应力、热疲劳和蠕变等问题；由于蒸汽发生器蓄水、汽容积和蓄热能力小，要求自动控制能更加灵敏地应付负荷波动；采取加装节流件配合调节阀压降等措施减缓或消除流量漂移现象。

2.4 其他部分

2.4.1 钠火 关注点：快堆的冷却剂是液态金属钠，钠与水（或汽）接触就会产生剧烈的钠火反应，并可能引起爆炸；钠与空气接触就会燃烧。日本的文殊快堆就发生过管道破裂引起的钠泄露事故，造成了严重影响。

建议：反应堆厂房内应严格控制水的使用，涉钠工艺间应相互独立，彼此隔离，具有密闭隔离水、气的功能，涉及一回路钠的工艺间应具有防辐射功能，钠工艺间的火灾消防系统，应使用不与钠产生反应的专用灭火材料。采用适当的冗余，从设计上考虑预防钠泄露和钠火的发生；设置多重监测装置对钠泄露及钠火进行监测；设置钠火抑制装置、漏钠收集装置和事故排钠装置/

系统,减轻钠泄露及钠火的二次效应;进行完整的火灾危害性分析,其中应包括火灾和钠火叠加事故危险性分析。

2.4.2 冷却剂 关注点:冷却剂对结构材料的腐蚀关系着堆的安全与寿期,冷却剂系统所用材料应避免与冷却剂发生相互作用。钠冷快堆冷却剂为液态钠,冷却剂系统所用材料一般为不锈钢,而钠对不锈钢的腐蚀性与其含氧量和温度有很大关系。

建议:在快堆运行工况(钠温 < 700)下,依靠钠监测及净化系统将含氧量始终保持在 10×10^{-6} 以下^[3](如条件允许,最好保持在 3×10^{-6} 以下,对不锈钢的腐蚀率只有 $5 \mu\text{m/a}$),避免钠中杂质堵塞堆芯流道,腐蚀包壳、传热管及堆内构件等设备。

3 结 论

钠冷快堆与压水堆存在着本质不同,压水堆的安全监管经验不能直接使用。通过在中国实验快堆从事的仿真机研发、全厂热工参数匹配等科

研工作,设备冷却水系统设计等设计工作,以及担任主控室操纵员、培训老师的经历,使作者掌握了一定的快堆技术,在此基础上结合监管工作的特点,从堆芯、系统、设备及钠火等方面提出一系列重要关注点,并分别针对每个关注点的问题都给予了相关建议。

此外,由于钠冷快堆多了一条钠回路、钠设备技术复杂及大量使用不锈钢等因素,导致建造成本大幅度增高,经济性低于压水堆。期望通过降低燃料循环费用、改进和优化工艺回路、提高蒸汽发生器等设备的可靠性、严格控制冷却剂的含氧量以便延长反应堆寿期等方式,尽可能提高钠冷快堆的经济竞争力。

参考文献:

- [1]《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会. 核安全综合知识[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004.
- [2]丁铜伟,吴纯良. CEFR 热传输及发电能力分析[J]. 原子能科学技术. 2013, 47(10): 1773-1777.
- [3]连培生. 原子能工业[M]. 北京:原子能出版社,2002.

(责任编辑:王中强)