

低温核能供热用深水池供热堆

Deep-Pool Reactors for Low-temperature Nuclear District Heating

田嘉夫

(清华大学核能技术设计研究院, 教授 北京 100084)

一、我国首先研制成功适用于低温核能供热的深水池供热堆

核能发电在世界上已进入商业化应用,我国电力系统也启用了核电,作为一种新型的清洁能源,预计它还会有更大的发展。核能够发电,当然也能用来供热。供热也是一种核能利用形式,但它与发电不同,无论国内还是国外核能供热还都处于商业化应用前的探索和研究阶段。在我国,这项工作很受重视,这一方面是因为我国经济建设发展中,需要投入大量的热源建设;另一方面与核电不同,供热所需要的低温低压技术,我国容易掌握,我国也有条件首先研制和开发这种专用于供热的核能装置。一旦开发成功,作为一种清洁能源,将会为减轻我国城市严重的燃煤污染和减少对全球温室气体的排放走出一条新路。这对于日趋紧迫的我国大气环境问题,无疑是值得重视的。

近些年,核电成本已逐渐降低,有些国家的核电成本已远低于其它能源的发电成本,核电容量已占其总发电能力的 3/4 以上。核电在经济上具有竞争力有两个原因:一是核燃料便宜,按发热量计算,它的成本可能是其它燃料(如煤)的 1/3 或更低;二是大型(商用规模)核电站技术成熟,进入了规模生产,造价虽比其它电站高,但已具有竞争力。其中核电站规模是一项很重要的因素,因为只有机组容量在 600MW 以上的比造价较低、核燃料利用率较高的核电站(热功率在 2 000MW 以上)才有竞争力。

核能供热面临的形势是不同的,就全世界来说,供热需求的总量很大,大于发电对能源的需求,但供热是分散的,核供热站必须在规模上远小于核电站才行。目前,只有采暖地区集中供热系统允许采用较大一些规模,例如,热功率可达 200MW 或 400MW。但采暖热负荷是季节性的,年利用因子不高,对经济又有不利影响。因此,核能供热面临的问题就是能否在 1/10 的规模下,对利用因子不高的热负荷,发挥核燃料价廉的优势,达到在经济上有

竞争力的要求。从国外的研究情况看,很多研究设想都是在其原有核电站技术的基础上,简化结构和设备,改造成低温低压装置去供热,虽然在安全上可以满足靠近城市建设的要求,但在比造价上都不会低于核电站,而仅季节性供应低温热水的效益更是无法与全年发电相比的,因而还都没有进入商业化建设。

这项研究工作的核心和关键能否设计出既完全又经济的供应低温热能的反应堆。而且作为一种能源装置,它必须在经济上有竞争力,只有在它的供热成本与其它可获得能源具有可比性时,才能在市场机制下推广应用。这与发电是一样的,人们利用的是热能或电能,而并不计较它是来自什么能源或是采用何种技术,因此,核能供热技术的先进性必须反映在它的造价和供热成本上。这也是供热堆设计研究需要达到的基本要求。

深水池供热堆是为达到这一目的而设计的一种新型供热反应堆,它是由我国首先提出的,并于 1985 年获得我国第一批发明专利。经过多年的研究,现在可以看出深水池供热堆非常适用于低温供热,具有优异的安全性和经济性,而且所用技术都是国内的成熟技术,容易实施和建设,很有希望成为一种新型的供热能源,为改变我国对化石燃料的依赖和缓解大气污染提供一条现实可行的途径。

二、深水池供热堆的设计原理

深水池供热堆虽然也是一种动力堆,但它的设计不同于核电站,其主要特点是不将反应堆堆芯放在密闭的压力容器内,而是放在一个常压水池的深处,利用水层的静压力提高堆芯出口水温,从而满足低温供热的温度要求。这与其它供热堆的设计及通常工业中利用压力容器加压的设计概念是不同的,这是因为有以下的特殊原因:

1. 水静压力提高沸点 由于低温供热要求堆芯出口水温稍高于 100℃,利用水层加压可以有效地提高饱和温度。当堆芯以上有 10m 水深时,水的

饱和温度可提高 20℃(即沸点由常压下的 100℃变为 120℃),如再加高 10m,可再提高 14℃(即为 134℃),提高到 30m 时,饱和温度可达 144℃。利用这一特性可以将堆芯冷却水温度提高到 100℃以上,而堆内不出现沸腾,满足了堆芯的设计要求。从核工程的角度来看,增加水深提高压力的办法还有许多其它方面的好处。

2. 自然循环能力增强 反应堆在停堆以后还有剩余发热,需要自然循环来保持反应堆的长期冷却,但自然循环能力随反应堆设计功率的增大而减小,例如,100MW 反应堆会比 10MW 反应堆的自然循环能力下降 1 倍。商用供热堆功率都在 100MW 以上,需要增强自然循环能力,以便在设计上有更大的灵活性。当水池加深时,自然循环能力也同时加强了,因此,它也为大型商用供热堆的余热冷却创造了较好的条件。

3. 大的水容积是安全的需要 水池加深扩大了池水容积,这也正是大型商用供热堆安全上的需要。在现代压水堆核电站的改进设计中,都增加了许多水池,以便在出现事故时能吸收过多的能量和保持堆芯不会裸露,这都是提高安全性的需要。水池的加深直接扩大了反应堆的水容积,是最理想的安全手段,在发生事故时可以有足够长的时间去采取纠正措施。

4. 常压安全 反应堆堆芯不放在密闭的加压容器内还有一个最大的好处,就是在出现异常情况时,例如,在失去外电源,失去水流冷却条件,温度升高或功率增长时,不会导致压力升高(反应堆水池是处在常压状态),不存在压力增高的危险;而且在堆芯会产生大量汽泡,汽泡有很强的负反馈机制,会限制反应堆功率或温度的升高,会降低功率并导致停堆。这是深水池常压反应堆有别于其它密封加压反应堆的特殊具有的安全性能。

5. 造价低 深水池是由深埋地下的钢筋混凝土制成,与钢制压力容器相比,其性能可靠、坚固、耐久、没有辐照损伤问题、制造容易、成本低廉。水池表面不加压力,没有密封加压要求,省去了很多压力系统和设备,也省去了许多预防失压的安全设施,很多系统得以简化,很多设备可采用操作人员熟悉的常规设备,这些不仅大大降低了反应堆造价,而且提高了运行可靠性。

三、深水池供热堆设计简介

深水池供热堆有多种设计,其中深水池 3 型(DPR-3)是结构最简单,造价最低,专用于采暖供热的一种堆型(亦称常压采暖供热堆)。深水池供热堆系统布置如图 1 所示:在一个圆柱形混凝土水池的底部放置反应堆堆芯,池水由底部进入堆芯以后

被加热至 100℃,热水由堆芯上部流出进入衰减筒,在筒内水的流速很慢,以便衰减其放射性,放射性降低以后流出水池,进入换热器,水温降至 70℃并进入循环泵,再流回水池形成一次冷却回路。在换热器中将热量传给二次水,二次水再经换热器为城市热网循环水加热,可将 60℃的循环水加热至 90℃,满足采暖基本热负荷的需要。

反应堆的控制系统、余热冷却系统以及燃料更换和运输操作等系统,均与现有池式实验反应堆类似,都是简单而成熟的技术。总之,从核热的产生、输送到用户的接收,工程上都处于低温常压的简易过程中,其好处就是简单、高效、安全和经济。

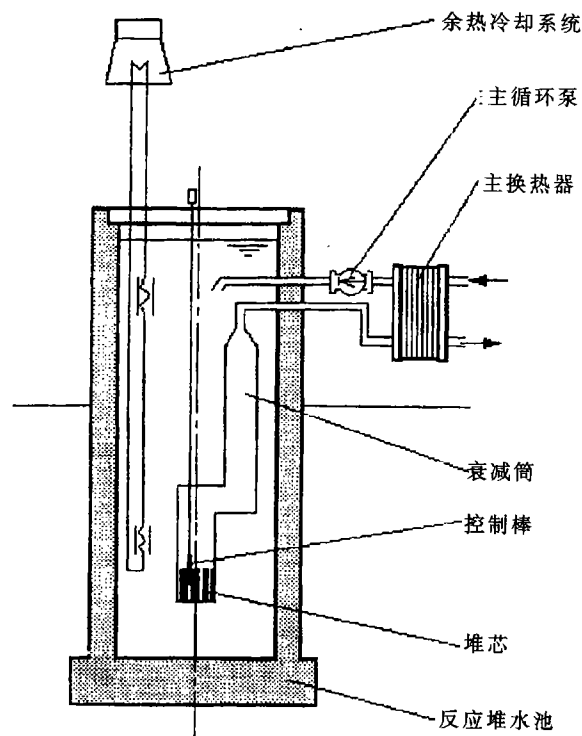


图 1 DPR-3 型深水池供热堆简图

四、深水池供热堆的安全性

利用轻水堆系统通用计算程序,对深水池供热堆可能发生的各种事故进行了计算分析,结果表明,这种常压供热堆对很多事故有缓解的能力,有较高的维持自身安全的特性。

1. 在失去外电源,所有循环泵停转,失去强迫流动冷却条件时,由于深水池有较强的自然循环能力,反应堆可以平稳地过渡到余热自然循环冷却状态。

2. 反应堆水池内平均水温为 78℃,没有向池外喷射的内能(与压力容器内超过 100℃的水不同),即使发生严重的管路破损或水池泄漏,依靠剩余池

水的蒸发,仍可保持在26天内堆芯不会裸露。

3. 可假设一种更严重的事故,即在应该停堆时,若控制棒没有下落,深水池供热堆的常压安全性也会使反应堆功率下降,并自动进入停堆状态。这是任何加压密封反应堆都没有的高度安全性。

五、深水池供热堆的经济性

1. 投资大幅度降低

国内一些设计单位曾各自估算过深水池供热堆的投资,按现在价格估计,200MW供热堆基建投资大约需要1.15亿元,初装燃料费大约为6600万元,总计为1.81亿元。与加压供热堆相比,其建设总投资会下降1至2倍。与国内燃煤锅炉相比,大约相当于总投资合计约为1.1亿元的大型燃煤锅炉7台。核供热站建设的投资虽然要高一些,但核供热站的使用寿命为锅炉的2~3倍,所以在造价上可以相比。甚至120MW或更小些的核供热站也具有经济竞争力。

2. 供热成本较低

由于投资的降低,其相应成本有所下降;但在供热成本中核燃料成本所占比例较大,且由于供热堆功率规模比核电站小,燃料成本会升高。针对此问题,在深水池供热堆的研究中,根据季节性用热及池式堆换料的特点,制定了新的最佳燃料管理模式。

(上接第50页)

的开发,轻资源与环境的保护;只看到海洋的环境容量和自净能力,而忽视了对海洋环境的保护与治理;只注重海洋自身的问题,而忽视了海陆生态系统的相互作用机制与规律;把海洋资源与环境的管理同简单的发号施令等同起来。对上述问题也缺乏深入系统的综合研究。因此,必须从中小学做起,通过各种宣传、教育手段,向广大民众传输现代海洋知识,增强现代海洋意识。

2. 加强海洋管理的体制、法规和政策建设

长期以来,我国已建立起了条块结合的海洋管理体制,但在实践中条块分割、相互掣肘的现象仍很严重,致使海洋管理不力。一是管理的权利与义务不明确,包括海洋综合管理部门与海洋产业部门的职责不清,国家与地方海洋行政管理部门以及各级地方海洋综合管理的范围不明,同级地方海洋综合管理的界限未定;二是海洋资源与环境管理的法规和政策体系不健全,虽有某些单项资源管理的法规,但对资源综合体进行保护和对各种资源开发中的矛盾界定的法规条文欠缺,尤其是陆上各部门和地区向海洋这一巨大的“共有空间”随意排放污染物、破坏海洋资源与环境的行为约束和制裁的法规还不够完善,有些法规之间还存在矛盾;三是有些

式,并由反应堆计算程序计算后得出:可以提高燃料利用率,达到接近600MW电功率核电站的水平。深水池供热堆燃料利用率的提高,对低温核供热的应用有重要意义。

在核供热与燃煤锅炉供热作相对比较时,按现在的核燃料价格计算,与1吨煤(热值为5000kcal/kg)供热相同的核燃料费大约为60~70元,与全国各地煤价相比,深水池供热堆的核供热成本相对较低,说明核能供热具备了商业化应用的基本条件。

六、深水池供热堆的综合利用

在深水池供热堆的研究中还提出了一种池式耦合堆的设计概念,即利用供热堆的燃料组件及深水池供热堆容易更换燃料的特点,可以耦合建设几兆瓦至十几兆瓦的辐照堆。由于耦合建设辐照堆的投资和燃料成本都很低,所以产生了一种廉价的辐照途径。辐照应用市场广阔,例如,医用同位素的生产、单晶硅辐照加工等国际市场价格很高,有些还供不应求;另外,在核工业中有许多辐照考验的任务,在其他工业、农业、医学以及科学研究等领域,中子辐照和 γ 辐照都有广泛的需求。我国可以开发和建设这种特殊的高新技术企业,使供热和辐照的综合利用具有更加广泛的经济效益和社会效益。

(责任编辑 刘先曙)

地方和部门只顾自身利益和局部利益,不顾国家的整体利益,只顾追求经济效益而忽视生态环境效益,虽然海洋资源开发热火朝天,但资源与环境保护却无人问津;四是海洋管理部门的权限和管理力度不够。

3. 实行海洋的资产化管理

海洋资源与环境是能为人类带来收益的资产,但长期以来由于受资源不计价观念的影响,海洋资源无偿开发利用的现象盛行,造成资源的浪费和对环境的肆意污染。今后必须健全海洋资源与环境的资产化管理和有偿使用的机制。

4. 对海洋资源与环境进行功能区划管理

海洋资源的功能区划是海洋资源与环境综合管理的基础。只有按照海洋自身循环演变的规律和人类开发海洋的需要划分功能区进行海洋管理,才能实现海洋与人类的协调发展。而我国这方面的工作还很薄弱,亟待按照海洋资源与环境的分异规律进行系统的海洋综合区划,以避免实践中的主观性和盲目性,使海洋资源与环境的开发、利用和保护协调有序地进行,实现海洋的持续利用。

(略去13篇中文参考文献)

(责任编辑 肖庆山)