

一种新型的核能供热装置——深水池供热堆的原理和工程特性*

施 工 赵兆颐 郭景任

(清华大学工程物理系 北京 100084)

田 嘉 夫

(清华大学核能技术设计研究院 北京 100084)

摘 要 核能用于低温供热,就需要解决反应堆安全性和经济性中的许多难题.深水池供热堆是按照一种新的设计概念专为低温供热而设计的,经过深入研究,发现它具有优异的安全性和经济性,非常适用于低温供热.由它形成的全部供热系统都处于低温低压之下,在工程上带来了简单、可靠、安全和经济等一系列优点.

关键词 低温供热堆,池式堆,安全分析,经济特性,区域供热

PHYSICAL PRINCIPLE AND ENGINEERING FEATURES OF THE DEEP POOL REACTOR FOR RESIDENTIAL HEATING

Shi Gong Zhao Zhaoyi Guo Jingren

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Tian Jiafu

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The use of nuclear energy for low temperature heating is confronted with challenges of safety and economy. The deep pool reactor, a low temperature heating reactor based on novel design principles, has been studied in detail. Results show that it has excellent safety and economic features, and is very suitable for low temperature heating purposes. The whole heating system including the nuclear reactor will be a simple and easy engineering system with the characteristics of reliability, safety and economy because the system and all its devices are based on low temperature and ordinary pressure.

Key words low-temperature heating reactor, pool type reactor, safety analysis, economic feature, district heating

随着世界上核能发电的商业化进展,我国能源系统也启用了核电,作为一种新型的清洁能源,预计它还会有进一步的发展.核能除发电外,还可以直接供热,毕竟,反应堆是一个产热装置,电是由热转换而来的.但热和电在性质和

应用上有很大差别,核能在供热方面还存在一些有待解决的问题,至今还没有进入商业化建设^[1,2].在我国,核能供热的研究工作很受重

* 1998-11-09 收到初稿,1998-12-17 修回

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,低温低压专用于供热的核能技术我国容易掌握,我国也有条件首先研制和开发这种类型的核能装置.而核热作为一种清洁能源,将会为减轻严重的燃煤污染和减少温室气体的排放又提供一条可行的途径.

热与电的最大不同是热的传输困难而昂贵,无论输送介质采用热水还是蒸汽,它所需要的管道、保温层和泵都需要比输电高得多的投资,再加上传输中的热损失、泵的耗电以及传输设施的维护,使得输热的经济距离仅限于几公里或最多几十公里.也就是说供热不能形成大的联网,要求热源是小规模或中等规模的.

就全世界来说,较大的供热联网是大中城市为采暖而建设的区域供热系统,它的容量大约可达 600—1200 MW,相应的最大热源装机容量为 200—400 MW.对于工业供热,容量就更小一些,大约 99%的用户是在 1—300 MW 之间,而且很有可能将它们联接起来实行集中供热.这样,在供热领域,核能经济的规模效益遇到了最大的挑战,因为核电站热功率在 2000 MW 以上才能达到经济规模.

核能商用供热面临的问题就是反应堆规模缩小到 200 至 400 MW,对负荷因子不高的采暖系统供热,与其他能源相比,是否能具有竞争力的问题.当然,随着环保要求及常规燃料价格等因素的变化,核能竞争力会有所提高,但经济性始终会成为推广应用的重要因素.因为这与发电是一样的,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,核能供热技术可行与否的先决条件是它必须有合适的建设投资和供热成本.这也正是低温供热堆设计研究需要达到的目标.

在核能专用供热的反应堆研究中,很多设想是希望将核电站的技术简化和改进,变成低温低压的供热堆,虽然这有利于核电技术和核电设备生产能力的利用,但往往造价很高,单位功率的投资不会低于核电站.而采暖供热的收入是无法与全年发电相比的,因此,还都没有投

入商业化建设.

在众多低温供热堆的设计研究中,深水池供热堆的设计原理是不同的,它的工程效果也有显著差别.深水池供热堆的概念是我国首先提出来的,并于 1985 年获得我国第一批发明专利^[3].对这一新的核能和平利用的工程课题,已进行了全面的设计研究,完成了方案设计、设备调研、物理热工计算、厂房建筑及辅助系统设计、经济分析、环境影响评价、工程预可行性研究、事故安全分析以及专家评审论证等多项工作.现在可以看出,深水池供热堆很适于低温供热,具有优异的安全性和经济性,这是经专家多次论证得出的一致结论^[4-6].

1 深水池供热堆的设计原理

深水池供热堆的主要特点是不将反应堆堆芯置于密闭的压力容器内,而是将堆芯放在一个开口水池的深处,利用水层的静压力提高堆芯出口水温,以满足低温供热的温度要求.这与通常工业中利用压力容器加压的设计概念是不同的,这是因为有以下各节所述的原因.

1.1 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 10 m 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℃),如再加深 10 m,可再提高 14℃(即为 134℃),加深至 30 m 时,饱和温度可达 144℃.利用这一特性可以将冷却堆芯的水温提高到 100℃以上,而堆芯内不出现沸腾.增加水深提高压力从而提高温度的办法,给核工程设计带来许多其他方面的好处.

1.2 自然循环能力增强

反应堆冷却水的自然循环是保证反应堆安全的重要手段,一座反应堆的自然循环能力由以下关系式决定^[7]:

$$N_t = 4.43 C_p \rho \beta^{1/2} \Delta t_0^{3/2} \Delta H_0^{1/2} A \xi^{1/2},$$

式中 N_t 为反应堆自然循环功率, C_p 为比定压热容, ρ 为密度, β 为线膨胀系数, Δt_0 为堆芯冷

却剂出入口温差, ΔH_0 为堆芯与热交换器高度差, A 为堆芯冷却剂流通截面积, ξ 为冷却剂流动阻力。

反应堆的自然循环能力与 A 成正比, 而 A 随反应堆功率(或堆芯体积)的 $2/3$ 次方变化, 所以, 当反应堆功率增大以后, 自然循环能力降低。例如, 100 MW 反应堆会比 10 MW 反应堆的自然循环能力下降 1 倍。商用供热堆功率都在 100 MW 以上, 为保持自然循环能力, 往往需要采取特殊措施。但在上式中可以看到, 自然循环能力还与冷热源高度差 ΔH_0 的 $1/2$ 次方成正比, 加深水池就提高了高度差, 也就为大型供热堆自然循环方式, 即不依靠外界提供能量的方式导出余热创造了有利的条件。

1.3 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, 为了在出现事故时能吸收过多的能量和保持堆芯不会裸露, 都增设了许多水池。深水池直接扩大反应堆的水容积是最理想的扩容办法, 使得反应堆在发生事故时进展缓慢, 允许有足够长的时间去采取纠正措施。

1.4 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), 不存在超压的危险; 而且由于是低压相变, 当水变成蒸汽时, 汽液两相比较大的密度差导致强的负反馈, 可迅速有效地抑制反应堆功率或温度的升高, 进而降低功率并导致停堆。这是深水池常压反应堆有别于其他密封加压反应堆的特殊具有的安全性能。

1.5 造价低、可靠性高

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, 它的性能可靠、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

有使用经验的常规设备, 这不仅大大降低反应堆造价, 而且提高了运行可靠性。

2 深水池供热堆的安全性

从上述的原理设计中可以看出, 深水池供热堆与现有的压水堆、沸水堆或其他加压动力堆相比会有许多不同的安全特性。利用现在国际上通用的轻水堆系统的安全分析程序, 对这一系统进行了数值计算和分析, 而这种分析结果也是安全审评的重要依据。主要计算结果简介如下。

首先选取深水池供热堆 3 型(DPR-3) 200 MW 的设计, 作为计算分析的对象。深水池 3 型的结构最简单, 造价最低, 是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, 主要设计参数见表 1, 详细设计见参考文献[8]。

表 1 200 MW 的 DPR-3 型深水池供热堆主要参数

项目	参数
热功率/ MW	200
水池内径/ m	8
水池深度/ m	21
燃料组件数目/ 盒	249
组件内元件棒数目/ 根	60
元件棒外径/ mm	10
燃料部分高度/ mm	1500
棒栅距/ mm	12.5
池顶水面压力/ MPa	0.1
堆芯进/ 出口水温/ $^{\circ}\text{C}$	70/100
一次水总流量/ t/h	5710
一次换热器数量/ 台	6
一回路泵数量/ 台	6
二回路进/ 出口水温/ $^{\circ}\text{C}$	65/95
二次水总流量/ t/h	5705
二次换热器数量/ 台	6
二回路泵数量/ 台	6
热网供水温度/ $^{\circ}\text{C}$	90
热网回水温度/ $^{\circ}\text{C}$	60
热网水流量/ t/h	5700

利用轻水堆系统热工水力估算分析的通用程序 RETRAN-02, 对其可能发生的各种主要事故进行了计算分析, 分析结果证实, 反应堆有足够的安全性。对另外一种事故, 即假想的更为

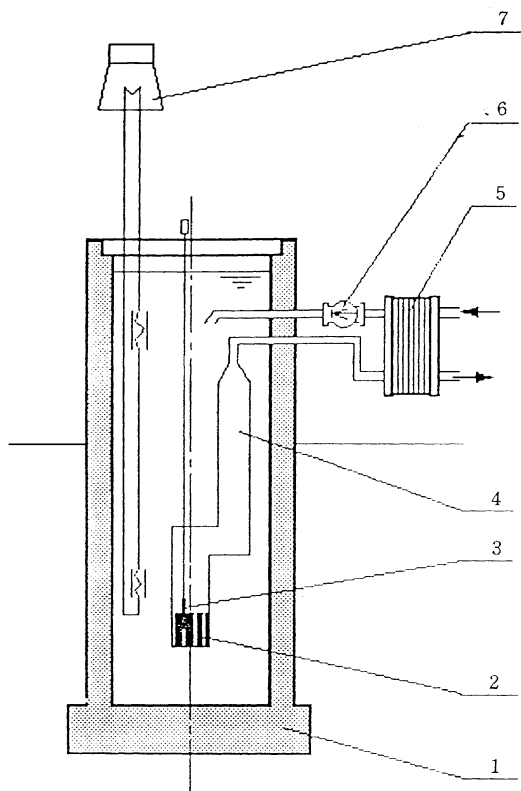


图1 200 MW池式供热堆简图

1——反应堆水池;2——堆芯;3——控制棒;4——衰减筒;
5——主换热器;6——主循环泵;7——余热冷却系统

严重的超设计基准事故(ATWS事故)也进行了计算分析.这种事故是假定在发生全部外电源断电、全部循环泵停转的同时,出现全部控制棒不能下落实现停堆的十分严重的情况.当出现这种情况时,任何加压反应堆的压力都会迅速升高,达到压力上限时只有依靠安全阀多次开启,释放部分介质才能限制压力的上升.最后需要注入高浓度硼水,才能使反应堆停下来.对于深水池供热堆则不同,从图2的计算曲线可以看到,当发生这种事故以后,堆芯内部出现汽化,由于气泡产生较强的负反应性,使反应堆功率迅速下降.随后功率在波动中逐渐降低,并进入自然循环冷却状态.经过一段时间以后,随着池水温度的升高,反应堆功率又进一步降低,最后进入热停堆状态(见图3).

在这一过程中,没有启动任何安全设备,也

28卷(1999年)12期

没有人员进行任何操作,是深水池的常压特性和特有的高度差形成的自然循环特性起到了决定性作用.这是其他加压动力堆所不具备的,是深水池供热堆原理设计所特有的安全性能.

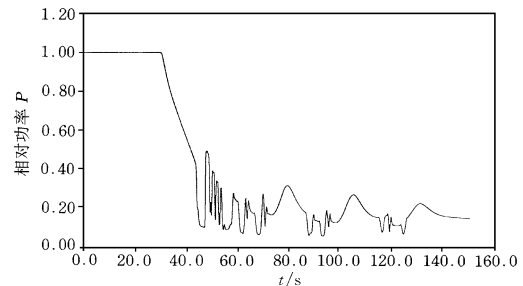


图2 断电 ATWS 事故前期反应堆相对功率

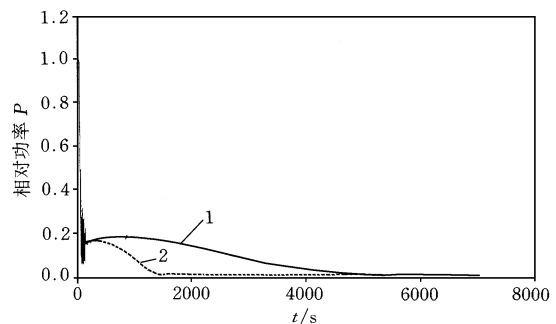


图3 断电 ATWS 事故反应堆相对功率

1——未考虑碘毒影响;2——考虑碘毒影响

3 深水池供热堆的经济性

3.1 投资大幅度降低

正如在设计原理中所述,深水池供热堆与其他加压供热堆相比,估计建设总投资会下降1倍至2倍.按近年价格估计,200 MW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.与国内燃煤锅炉相比,一座堆相当于大型燃煤锅炉7台,锅炉投资合计约为1.1亿元.核供热站建设费用比投资建锅炉的费用还是要高一些,但核供热站的寿命为锅炉的2—3倍,在投资经济性上两者是可以相比的.

3.2 供热成本下降

由于池式供热堆的燃料更换远比核电站方便,而且季节性的供热运行有充裕的换料时间.因此,在200 MW深水池供热堆的设计中,重新

制定了燃料管理模式,经反应堆理论计算得出:在选取与国内核电站同样燃料的情况下,可以接近电功率为 600 MW(热功率近 2000 MW)的核电站的平均卸料燃耗水平.深水池供热堆燃料利用率的提高,对低温核供热的经济性有重要意义.

在核供热与燃煤锅炉供热作相对比较时,按现有核燃料价格计算,与 1t 煤(热值为 20900kJ/kg)供热量相同的核燃料费大约为 60—70 元,与全国各地的煤价相比,深水池供热堆的供热成本是相对较低的.

4 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概念设计,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,在供热堆附近,可以耦合建设一个功率为几 MW 至十几 MW 的辐照堆^[9].由于耦合建设辐照堆的投资和燃料成本都很低,所以产生了一种极为廉价的辐照途径.辐照应用市场广阔,例如,医用同位素的生产、单晶硅辐照加工等在国际市场上价格很高,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^[10].供热和辐照综合利用具有更加明显的经济优势,我国可以首先开发和建设这种特殊的高新技术企业,将会给国家带来广泛的经济效益、社会效益和环境效益.

总之,由于深水池供热堆在原理设计上的

不同,不仅具有高度的安全性和可与现有能源相竞争的经济性,而且是在极其简单的反应堆结构上实现的.这样,从核热的产生、输送直到用户接收的全部系统,都处于低温低压的简易过程中,而热效率并不降低.这种工程系统的优点就是简单、可靠、安全和经济.这项低温核供热的研究成果,对我国新能源的开发和应用,对代替化石燃料和改变城市受污染的现状以及减少全球温室气体的排放都有重要的现实意义.

参 考 文 献

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear Applications for Steam and Hot Water Supply. IAEA - TECDOC - 615, IAEA, Vienna, 1991
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination. IAEA - TECDOC - 574, IAEA, Vienna, 1990
- [3] 清华大学.深水池式供热堆. CN 85100044, 中国专利公报 1(1), 1985 年 9 月 10 日
- [4] 田嘉夫,杨富,向勤等.核动力工程,1992,13(1):31—37
- [5] Tian Jiafu, Zhao Zhaoyi, Yang Fu. Progress in Nuclear Energy, 1998, 33(3):279—288
- [6] 田嘉夫,赵兆颐,桂金龙.区域供热,1996,(6):16—19
- [7] Гуев Ъ Д., Калинин Р И., Ълговецкий А Я. Гидродинамические аспекты надежности современных энергетических установок. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989
- [8] 王欣,田嘉夫,赵兆颐等.核动力工程,1997,18(4):340—344
- [9] 田嘉夫,桂金龙,赵兆颐.核动力工程,1996,新堆与研究堆学术交流会专辑:111—113
- [10] 田嘉夫.清华大学学报,1997,37(5):12—14