

# 核供热站——安全、清洁、现实 而又经济的新能源

## Nuclear Heating Plant

梅启智

(清华大学核能技术设计研究院)

开发200兆瓦核供热堆工程技术是“八五”期间能源技术发展的六项主要任务之一。

工程主体就是建造200兆瓦低温核供热示范站,目前已经国家立项在吉林市建造。这项工程是在清华大学核能研究院研制的5兆瓦低温核供热试验站的基础上进行的工业示范项目。

5兆瓦试验性低温核供热站于1989年12月19日顺利实现连续满功率运行,是世界上第一座使用新型水力控制棒传动的一体化自然循环壳式低温核供热反应堆。迄今,已连续两年为核能技术设计研究院5万平方米的建筑物供暖。

对于5兆瓦低温核供热堆,国家核安全局的审评鉴定为:“能满足核安全的基本要求,不致对工作人员、公众和环境造成损害和污染”。

### 一、低温核供热站的构成及工作原理

低温核供热站的主要构成见图1。它包括:1.产生热量的低温核反应堆;2.确保放射性的一回路水不和热网水直接接触的中间回路;3.进入居民区的普通热网。

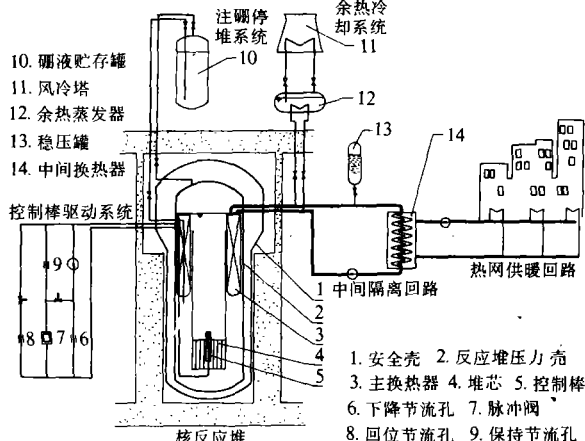


图1 200兆瓦示范性核供热站系统示意图

核供热站的核心是反应堆堆芯,堆芯由按一定规则排列的燃料棒组成,棒与棒之间是水。在棒的锆包壳内

装的是低加浓二氧化铀( $\text{UO}_2$ )。144根直径10毫米的燃料棒组成一个燃料组件,200兆瓦低温核供热站的堆芯有120个燃料组件。堆芯内有一个供点火用的中子源,中子比原子小得多,中子碰到铀原子核会发生使铀核分裂的反应,称为核裂变反应。在裂变反应过程中放出更多的中子,同时也释放出巨大的能量——核能。这些中子又能使其它的铀核发生裂变,于是裂变过程就能自持下去,不断发出热量。

堆芯中约有37根由强烈吸收中子的物质制成的棒,称为控制棒。插入控制棒,中子因被吸收而使裂变反应减少,从而使反应堆功率下降,直至裂变反应完全停止;如果提升控制棒,反应堆功率可以不断上升直至额定功率。在这里,控制棒采用水力传动,它具有步进式升降和快速自动插入两种功能。

核燃料放出的热能是由压力壳中的循环水带出的。温度约为 $135^\circ\text{C}$ 的水自堆芯底部进入堆芯受热并冷却堆芯后,水温升到约 $200^\circ\text{C}$ ,从堆芯上部流出,经抽吸管进入换热器,水温降到约 $135^\circ\text{C}$ 后又回到堆芯底部。靠温差形成的密度差来驱动压力壳中水的流动,形成自然循环而不需要通常核电站必须的一回路循环水泵来强迫水流动。

循环水把热量传递给主换热器,主换热器将热量传递给二回路。六个换热器对称布置在压力壳与抽吸管之间的环形空间内。

堆芯、换热器都装在一个钢制的压力壳内,人们称之为“一体化布置”。压力壳直径约为5.0米,高约13.8米,工作压力约为22个大气压,全部进出压力壳的穿管均布置在压力壳上部,可防止因穿管处泄漏而造成冷却水的大量流失。

压力壳外面是直径约为6.0米,高约15.0米的第二层承压壳,习惯上称为安全壳,由碳钢制成。它的功能是当万一发生压力壳泄漏时,把带放射性的冷却水拘在壳内不外泄,并保证堆芯仍被水淹没,不致发生堆芯熔化事故。安全壳能承受压力壳破裂时安全壳内形成的压力。

主换热器的二次侧为二回路,水压约为26个大气压,以保证换热器泄漏时带放射性的一回路水不进入二

回路。循环水温约为135℃/65℃。二回路的循环水通过中间换热器将热量传给三回路，这个回路就是城市的供热管网，它可以把热量传送到各个需要的地方，从而满足城市采暖及工厂低温工艺用热的需要。三回路的参数为：水温约110℃/70℃，压力约13个大气压。

为保证反应堆正常工作，供热站内还设有其它辅助系统。一回路冷却水供给、处理系统余热载出系统，二回路水处理系统，电气仪表和控制系统，气体系统，注硼系统，泄压和排放系统，液体废物处理、固化和存放系统，剂量监测系统，采样系统，去离子水供给系统，设备冷却水系统，消防水系统，生活水系统等。在供热站中心控制室里，各回路及反应堆运行的参数用计算机集中监测及显示。

二、发展低温核供热的必要性

从我国能源供应、交通运输和环境污染看发展核供热，特别是发展低温核供热都是十分必要的。

1. 从能源供应看

在世界能源消耗结构中，供热消耗占有相当大的比例。德国和日本供热所消耗的能源分别占总能源的70%和60%左右。苏联和美国以热能形式消耗的能源分别占总能源消耗的60%和40%。在上述国家里，供热所消耗的能源约为供电所消耗能源的两倍以上。我国供热所消耗的能源约为总能源消费的2/3，约为发电消耗能源的3倍多。

能源供应不足是限制我国国民经济发展的一个重要因素，在常规能源缺少地区寻找替代能源成为当务之急，而核能则是当前唯一的较成熟的替代能源。据研究，人们发现，供热所需能量大约一半在120℃温度范围以下，恰好处于低温核供热的参数范围之内，所以发展低温核供热以代替部分常规能源使能源合理化，保证国民经济发展需要是非常必要的。

2. 从缓解交通运输紧张状况看

我国煤蕴藏量虽然丰富，但分布不均，北煤南调，西煤东运，煤产地与用户集中区往往距离遥远，造成运输上的沉重负担。我国煤炭运输占铁路运输总量的40%，水运的30%，公路运输的25%以上。我国铁路运煤的平均运距为426公里。若选用核能供热，由于核反应释放出能量巨大的核能，而化石燃料燃烧仅仅释放出相对能量小得多的化学能，因此单位重量的核燃料所含热值为单位重量标准煤所含热值的270万倍，即1公斤铀235相当于2 700吨标准煤。显然，一旦用核供热取代煤供热，运输紧张的状况将得到较大的缓解。例如，800万平方米的采暖面积，由400兆瓦的煤供热站供暖，则年耗煤约40~60万吨，需要约1万个火车皮来装载，平均需运力约2亿吨公里，若改用同功率的核供热供暖，年仅消耗核燃料约2吨，所需运力可忽略不计。

3 从环境污染看

煤供热站产生大量的气态废物，造成城市大气污染，我国许多大城市的大气污染超过了国家允许标准。据计算，一座400兆瓦的煤供热站每年产生二氧化硫气体约1万吨，烟尘和其它颗粒有害物质400吨。由于煤中含有微量放射性铀和钍，故煤燃烧不仅产生二氧化硫等有害气体，而且存在对周围居民带来额外放射性辐照问

题，尽管辐照剂量远低于天然本底和国家标准允许值，但仍比相同功率低温核供热站高10倍以上。若建成2×200兆瓦低温核供热站则可取代中小烧煤锅炉近千台，不仅完全消除了二氧化硫等有害气体和降尘对城市的污染，且可为城市节省可观的煤和煤渣的堆放场地。

三、低温核供热的安全性

低温核供热站是一种既安全而又清洁的理想热源。

1 核供热反应堆不会像原子弹那样爆炸

原子弹，它是由高浓度的(>90%)裂变物质(几乎是纯铀-235或钚-239)和复杂精密的引爆系统所组成，当引爆装置点火起爆后，弹内裂变物质被爆炸力迅速压紧到一起，大大超过了临界体积，巨大核能在瞬间释放出来，发生了破坏力极强的、毁灭性的核爆炸。

核供热反应堆的结构和特性完全不同，既没有高浓度的裂变物质又没有复杂精密的引爆系统，不具备产生原子弹爆炸的两个必要条件，因此当然不会产生像原子弹那样的核爆炸。低温供热反应堆采用的是低浓度(约3%)裂变物质的燃料。反应堆还有安全控制系统，该系统使核能缓慢地有控制地释放出来。此外，堆芯的设计使反应堆具有自稳定特性，当核能释放太快，堆芯温度上升太高时，链式裂变反应会自行减弱乃至停止。

2. 低温核供热站对周围居民的放射性影响很小

人们生活在大自然与现代文明之中，每时每刻，不知不觉地在接受来源于天然放射性本底和各种人工放射性辐照。多年来，人们对宇宙射线、住房、土地造成的放射性本底，对饮食、吸烟、乘飞机和X光胸透等造成的放射性辐照早已习以为常地接受了。与这些生活中的放射性辐照量相比，低温核供热站对周围居民的放射性影响是微不足道的，它不仅比同功率的煤供热站对周围居民的放射性影响小，甚至比常吸香烟的放射性影响还小。

各种放射性源造成的平均剂量比较

| 来 源           | 受照人年平均剂量(毫希) |
|---------------|--------------|
| 天然本底(每年)      | 2            |
| 一次X光胸透        | 10~20        |
| 每天吸20支香烟(每年)  | 0.5~1        |
| 乘飞机一小时        | 0.002        |
| 20万千瓦煤供热站(每年) | 0.013        |
| 20万千瓦核供热站(每年) | 0.0012       |

3 低温核供热站是理想的清洁热源

低温核供热站是一种理想的清洁热源，它不像煤供热站那样会向外部环境散发灰渣、烟尘和硫、氮、碳等氧化物以及汞、镉、三四苯并芘等致癌物质，一旦用核供热站取代了煤供热站就可以从根本上消除对大气环境的严重污染。

煤供热站和核供热站有害物质的年排放量(吨/年)

|               | SO <sub>2</sub> | No <sub>x</sub> | 烟灰和特殊物质 |
|---------------|-----------------|-----------------|---------|
| 2×20万千瓦煤供热站   | 6 000~16 000    | 3 300~3 800     | ~440    |
| 2×20万千瓦低温核供热站 | 0               | 0               | 0       |

4 低温核供热站的设计安全原则和安全特点形成低温核供热站优异的安全性。

低温核供热站主要是为城市或工矿企业提供热源,须建造在城市和工矿企业附近,因此要求确保在最严重事故条件下,放射性物质的释放不会对周围环境造成严重影响,以及居民受到的辐射剂量应低于允许限值。为此,200兆瓦核供热堆是遵循以下安全原则进行设计的:

(1) 应为安全停堆和维持安全停堆状况提供必要的手段。

(2) 应为停堆后从堆芯排出余热提供必要的手段。

(3) 应采取多种措施减少和阻止放射性物质向环境的释放,确保多种运行工况和事故工况下放射性物质对居民造成的辐射剂量不超过规定的限值。

200兆瓦核供热堆的安全特性是:

(1) 两套相互独立的可靠的停堆系统(靠重力插入堆芯的控制棒停堆系统及注硼水停堆系统),可保证在任何事故工况下安全停堆。

(2) 反应堆一回路设备采用一体化布置,并设置有双重承压壳(压力壳和安全壳),大大降低了失水事故的可能性。加之低温、低压、低功率密度,堆内水容量大,可保证在任何事故条件下,堆芯仍能被水淹没。

(3) 全部自然循环的余热载出系统,不需动力电源,确保停堆后剩余发热可靠排除。

(4) 放射性物质的三道屏障(燃料元件包壳,一次冷却剂压力边界和安全壳)及三重回路(一回路,中间回路及热网回路)阻止放射性物质进入环境。

因此,该型反应堆具有很高的固有安全性,能够保证安全可靠地运行,从根本上避免了类似三哩岛和切尔诺贝利那样严重危害环境的核事故。

三哩岛核事故的本质是,小破口失水事故叠加上应急安全注水失效,最终导致堆芯裸露而损坏。而低温核供热反应堆,在出现任何失水事故时(甚至包括压力壳的破口),由于上述安全特性,加上堆的运行参数低(200℃,22巴),堆壳内水容量大,当事故终止时,堆芯仍处于被淹没状态,堆芯的余热由液面蒸发——主换热器冷凝过程即足以排除,不需要任何外加手段即可保证堆芯不致裸露发生三哩岛那样的堆芯损伤事故。

切尔诺贝利核事故的本质是,该反应堆存在着一个正温度系数的工作范围,在此工况下,反应堆极不稳定,产生了功率骤增,直至燃料烧毁,同时使反应堆壳破坏,作为慢化剂的高温石墨又与空气作用,发生猛烈燃烧。反应堆厂房毁坏,致使大量放射性物质进入环境,造成灾难性事故。而低温核供热堆在设计上作到,保证在任何工况下,反应堆均具有负温度系数,水力驱动控制棒又排除了弹棒的可能性,因此从根本上排除了发生类似切尔诺贝利那样反应性事故造成堆芯熔化乃至爆炸的可能。

#### 四、低温核供热站技术上的现实性

低温核供热站优异的固有安全性带来它的技术上的现实性。

1. 低温低压的参数使关键设备制造变得容易,完全可以依靠我国自己的力量设计制造。已经历两个冬天运行考验过的5兆瓦试验性低温核供热站,是由清华大学设计,国内厂家制造的。经过论证,200兆瓦左右的供

热堆,即可达到商用经济规模。这样小的单机容量,加上低温低压参数,商用低温核供热站的全部关键设备也同样可以完全立足国内,依赖现有成熟的科技力量和工业基础来设计制造。

2. 不需要制造困难、价格昂贵的一回路主循环泵和发电用蒸汽发生器。

3. 燃料元件勿须专门设计和制造,可以选用我国现有的秦山核电站用燃料元件。

4. 水力驱动控制棒传动系统的设计制造技术也已在5兆瓦试验性低温核供热站上得到解决。

5. 5兆瓦试验性低温核供热站两个冬天运行经验表明,低温核供热堆能自动跟踪热网负荷,极易操作。

#### 五、低温核供热站的经济性

低温核供热站优异的安全性和现实性为它带来了优异的经济性。

低温核供热站系统简单,省去了核电站必须的耗资巨大的主循环泵、蒸汽发生器、应急电源和应急安全注水系统,其它一些系统也大为简化,从而使供热站的造价大大降低。

低温核供热站的供热效率高达98%,比燃煤供热站热效率几乎高20~40%左右。一座2×200兆瓦的低温核供热站一年可节省煤炭40~60万吨,节约铁路运力约2亿吨公里。尽管低温核供热站一次投资比煤供热站高,但供热成本却较煤供热站低。可以说,低温核供热站是一种廉价的热源。

#### 六、低温核反应堆的多种用途

低温核反应堆除供作热源外,还可考虑综合利用,开发其巨大的经济潜力。例如可在油田建低温核供热堆,以核代油提供热源向油井注射热水以提高原油回收率,还可提供工业用汽,夏季制冷,海水淡化和发电等。

200兆瓦核供热技术列入了国家八五计划纲要,这给了我们一个机会。如果能抓住这个机会,尽快使低温核供热站商用化,那么在核供热事业上我国有可能居于世界前列,为人类作出贡献。

(责任编辑 冷远猷)

#### 重要更正

1. 本刊1991年第6期(总第39期)第54页标题“轻工业的充分发育是经济发展不可逾越的阶段”中的“愈”应为“逾”。第55页左栏第12行中的“愈”亦应为“逾”。

2. 本刊1991年第7期(总第40期)

第7页左第2段第7行“天国山”应为“天目山”;

第44页图2右上角“二连”应为“满洲里”;

第44页图2中部“临海市”应为“临河市”。

本刊编辑部