

快堆在能源中的战略地位

THE STRATEGIC POSITION OF THE FAST REACTOR IN THE ENERGY SOURCES

鲍云樵

核能被世界公认为能源长期稳定供应的希望,它的开发利用包括裂变能和聚变能两个方面,全世界普遍认为,热中子堆→快中子增殖堆→聚变堆是核能开发利用的三个发展阶段。

截至1986年底,全世界已经运行的394座核电站,装机容量达27 033万千瓦,但其中绝大多数是热中子反应堆,铀的利用率一般只有1~2%,推广热堆只是裂变能利用的初期阶段。快中子堆

由于能增殖核燃料,可将铀资源的利用率提高60~70倍。

实践证明,发展快堆在技术上是可行的,在安全上是有保障的。国际上已经进入商用快堆经济可行性的验证阶段,而且看到了成功的希望。

我国在建设热堆核电站的同时,如何恰当地安排快堆的研究发展工作,以保证核能发展的后劲,实为重要。

一、发展快堆势在必行

(一) 快中子堆的特点

1. 增殖核燃料

快堆是直接靠核裂变产生的快中子来维持链式裂变反应的。快堆内只有冷却剂(钠),没有慢化剂,它以钚239作燃料。在热堆中,由于中子利用率低,每烧掉一个钚239原子只能由铀238转换0.6~0.7个新的钚239原子,核燃料越“烧”越少。而在快堆中,中子利用效率较高,“烧”掉一个钚239原子,理论上讲可以新生1.4个钚239原子。从这个意义上讲,快堆中的核燃料会越“烧”越多。只要最初向快堆“堆芯”投入一定量的钚燃料,在再生区投放铀238贫料,经过10~20年运行后,就能积累起足以装备与自身功率相同的新堆的钚燃料。在此期间,快堆还能提供比热堆还多的电能。所以快堆被人们誉为能发电的“核燃料

生产厂”。

2. 需要浓缩度较高的核燃料

由于快中子引发裂变反应的几率要比热中子小,所以快堆核燃料的钚239含量要在15%以上(热堆只要3%)。目前,应用较为普遍的快堆核燃料是二氧化钚和二氧化铀混合燃料。

3. 快堆核电站的热效率高

快堆采用液态金属钠做冷却剂,钠的导热性能远比水和二氧化碳高,同时快堆冷却剂的出口温度达到500~600℃,远比普通热堆高,因此,快堆的热效率可高达40%,而普通的热堆核电站只有33~35%。快堆核电站排放的废热要比热堆少,对周围环境的热污染也要比热堆小,甚至比煤电站还要小。按国外的数据,热功率为330万千瓦的电站,煤电站释放的废热所占功率为237万千瓦,压水堆为212万千瓦,快堆则只有132万千瓦。

鲍云樵 (Bao Yunqiao) 中国能源研究会副秘书长。

4. 快堆燃耗深

在核反应堆里,通常以每吨金属铀(或钚)放出的能量(兆瓦日)表示核燃料燃烧程度,亦叫燃耗深度。燃耗越深越是经济。热堆的燃耗深度只有33 000~35 000兆瓦日/吨铀,而快堆一般已达10万兆瓦日/吨钚,现在联邦德国的KNK试验快堆电站的最大燃耗深度已达到17万兆瓦日/吨钚。

5. 快堆技术难度大,成熟周期长

快堆堆芯布置紧凑,单位体积发出的热量是热堆的4倍左右,燃料元件包壳承受最高温度达620~700℃;中子通量达 $7 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{16}$ 中子/厘米²·秒,是热堆的100倍;最大燃耗达10~15万兆瓦日/吨钚;加上钠工艺的特殊性等诸因素,对快堆燃料和材料的性能、堆芯结构的设计、热工性能的保证等都提出了苛刻的要求。因此,虽然世界上第一座实验快堆早在1951年就已问世,但由于快堆的技术难度大,至今还未商业推广。而热堆只经历了15年的时间就达到了商业推广应用

(二) 发展快堆的意义

1. 充分利用铀资源,满足长期能源需求

100多年来,火力发电耗去了大量化石燃料。据估计,石油和天然气在今后几十年内可能耗尽,而煤炭也只能用几百年。如果只建热堆,则世界经济可采的铀资源将在未来50年内耗尽。要是发展快堆,采用快堆与热堆相匹配的优化燃料循环,则可使经济可采的铀资源满足人类上千年的能源需求。

我国现已探明可供民用的铀资源,够1 500万千瓦压水堆电站用30年。如果到21世纪初,我国能建成1 500万千瓦热堆核电站,快堆能在2015年达到商业推广应用,则供1 500万千瓦压水堆用的铀资源,可资6~7亿千瓦快堆用30~40年。这将对我国的能源供应作出重大贡献。

法国和印度等国也有依靠发展快堆来保证本国能源自给的计划。

2. 快堆燃料成本低,可利用低品位铀矿

快堆的燃料循环费用大大低于热堆,它只占发电成本的15%。快堆的发电成本受市场铀价的影响不大,允许开采低品位铀矿,这就相当于明显扩大了经济可采铀资源量,因此从长远看,快堆可以提供廉价电力。

3. 快堆对环境污染小

快堆的废料处理量比热堆少,例如,一座热功率为61.5万千瓦的压水堆核电站,每年乏燃料处

理量为9.22吨,而热功率为70万千瓦的快堆核电站,每年乏燃料处理量只有2.45吨。

(三) 国外快堆发展的技术经济水平

至今,全世界已建成的大小快堆共20座,其中有一部分完成任务后已关闭,现在正在运行的快堆共13座,已积累了190堆·年的运行经验,其中有4座原型堆积累了44快堆·年的运行经验。

1. 运行性能良好

法国凤凰快堆(电功率25万千瓦)自从1974年并网发电以来,提供了150亿千瓦小时的电力,平均负荷因子达到59%,从1985年1月至1980年8月,负荷因子达到67%。超凤凰1号大型快堆(电功率120万千瓦),自1986年1月并网发电以来,在1986年6月的试运行中,负荷因子达到50%,现在已达到60%。美国的FFTF大型实验快堆(热功率达40万千瓦)10年平均负荷因子达71%。

2. 技术成熟程度大有提高

近20多年来,全世界已经积累了30万根快堆燃料元件的运行经验,其中绝大部分元件的燃耗都已超过10万兆瓦日/吨钚,有的已经达到15万兆瓦日/吨钚。换料时间也可缩短到10天以内,从而使电站的运行效益大为提高。

在凤凰快堆上有12.4万根燃料元件受到辐照,但只有3根燃料元件真正发生破损。元件破损率比普通轻水堆还要低。

3. 快堆安全性得到验证

钠冷快堆所用冷却剂的缺点是金属钠活性大,暴露在空气中会自燃,与水接触会发生剧烈反应,但这些缺点可以通过设计解决(使它与空气绝对隔绝,并单独设计钠回路,与水回路隔开,还可以用不透水的镍膜将氦渗出来,以消除氢气的危害)。现在已经找到了解决钠水反应的可靠方法,保证快堆的安全。

钠冷却剂的优点是其沸点高达881℃,快堆的运行温度通常是500~600℃,在这样的温区,钠不会沸腾,因此反应堆的内部压力可以很低,不象压水堆那样容易发生失压事故。钠的导热性能特别好,即使发生钠泵停转或控制棒卡死等事故,钠回路也可以靠自然循环带走热量。

快堆运行的实践证明,它的安全性是可信赖的。1985年,凤凰快堆人员(448人)的总放射性剂量负担为11.7雷姆,平均每人26.6毫雷姆,比大多数轻水堆要低得多。

联邦德国KNK-II实验堆运行10年,测量到的放射性剂量只为原来估算的1/4。

4. 缩短倍增时间有了希望

通常以铀钍混合氧化物作燃料的钠冷快堆,即使对反应堆进行精心设计,它的核燃料增加1倍的倍增时间也要15~20年,甚至更长。

印度在它的第一座快堆上采用了铀钍碳化物燃料,新型燃料有更高的重金属密度,可以使快堆的倍增时间缩短为10年左右。当然,碳化物燃料存在的辐照损伤大,后处理复杂,需要着力进行研究。印度在它的试验快堆上采用铀钍碳化物燃料的事实说明,这种新型燃料的推广应用已为时不远。

美国经过20年的研究,把原来的EBR-II试验快堆改为“一体化快堆”,采用了铀钍锆合金作燃料,燃料元件从反应堆卸出后,在堆厂房里就地机械脱壳、氯化造渣和电解精炼,并在熔融状态下将铀铸入石英管内。冷却后取出,装入不锈钢管中,制成新的燃料元件。处理中产生的高放射性废物可以就地存放和处置。这种所谓的“一体化快堆”,就是指它的燃料循环全过程可以就地进行。20年来,美国已用这种方法就地处理了5炉燃料元件,共计3万余根。从反应堆卸料到再次入堆使用,只需29天,燃耗都达到10万兆瓦日/吨,可以满足快堆发电的需要。通常,混合氧化物燃料快堆,乏燃料元件从反应堆卸出后,总要在冷却池里冷却1年以上,最短也不能少于9个月。

5. 改善经济性初见成效

快堆能否有竞争力,关键在于经济上能否与轻水堆相竞争。通过增大单堆容量、简化设备、减少材料、缩短建造周期、加深燃耗、提高负荷因子等有效途径可以改善快堆的经济性。

在过去30多年中,法、苏、英、联邦德国等国在改善快堆经济性能上取得了很大进展,使快堆的建造投资有了大幅度下降。

现在,苏联BN-600快堆的建造费用比相同规模的压水堆高30~50%。法国的超凤凰-1号快堆的建造费用比本国的压水堆贵1倍。超凤凰-1号快堆的发电成本为45~50生丁/千瓦小时(生丁为法国货币单位,100生丁等于1法郎)。而法国的压水堆发电成本为23~24生丁/千瓦小时,煤电站的发电成本为35生丁/千瓦小时,油电站的发电成本为60生丁/千瓦小时。快堆的发电成本比压水堆贵1倍,而比油电便宜。意大利的油电比例较大,发电成本平均为50生丁/千瓦小时。因此,超凤凰-1号快堆电站向意大利供电,还是受欢迎的。超凤凰-2号快堆有可能通过简化设备、节省材料(例如核蒸汽供应系统节省金属材料45%)等措施,使建造费用降到只比同规模压水堆贵15~20%,而最后的发电成本则可与压水堆相竞争。法国的压水堆电站造价在世界上是最低的,如果超凤凰-2号快堆能实现预期目标,则可使快堆在全世界取得经济上的竞争力。

二、国外发展快堆的经验

(一) 跳过预研阶段,加快建堆步伐

发展快堆较早的国家,因缺乏国外可资借鉴的经验,一般从预研开始,经实验堆、原型堆、商业验证堆的实践,最后实现大型商业快堆的推广。美、苏、英、法等国基本上走的是这条道路,它们建造的实验装置和反应堆较多,费时、费工、也费钱。

后起发展快堆的国家都因有国外的经验作借鉴,采取简化步骤的办法,一开始就着手建造实验堆,跳过预研阶段,如联邦德国、日本、意大利和印度均选择了这条途径。实践证明,这是一条捷径,可加速快堆建设进程。

(二) 执行正确的技术原则

世界各国多年的实践证明,制订正确的技术原则,可以少走弯路,加速快堆发展步伐。发展快

堆较早的美、英等国开始选用金属铀做燃料,钠钾合金做冷却剂,结果走了弯路,后来又回到混合氧化物燃料和钠冷上来。法国虽然起步较晚,但一开始就选择混合氧化物燃料和钠冷的技术原则,结果加速了快堆发展步伐。

快堆的堆内结构分池式和回路式两种。池式结构是将钠泵和中间热交换器安置在反应堆容器内;回路式结构的钠泵和中间热交换器在堆容器外,靠回路管道来连接。

英国比较了法、美、英和联邦德国的6座快堆后认为,选用池式快堆在经济上比回路式有更明显的优越性。因为回路式快堆建造周期长,造价高。

(三) 制订加快发展步伐的长远措施

1. 政府重视,全面规划

几乎所有发展快堆的国家都有长远规划和近期计划。长期以来,各国在快堆的发展研究上投

入了大量人力、物力和财力。美国已花费了几十亿美元,法国和苏联投入的研究和发展费用更多。

几乎所有工业国(除美国外)都把快堆摆在受控核聚变研究的前头加以考虑。

2. 建立快堆研究中心和工业基地

一些国家在原子能机构中专设管理快堆发展部门,并建立单独的试验研究基地。法国原子能委员会下属的反应堆研究发展部设有快堆管理机构,日本还专门设快堆局来统管。

各国都有快堆研究中心。例如:英国的唐瑞研究中心、法国的卡达拉希核研究中心、日本的大洗、联邦德国的卡尔斯鲁等。

3. 重视国际合作

现在,国际合作建快堆已成为普遍的现象。几个国家合建快堆,共享成果和经验,这样不但节

省投资,而且取各国技术之长,可以加速快堆的成熟过程。

英国的唐瑞快堆和法国的狂想曲快堆,都为别国承担实验任务。联邦德国与比利时、荷兰、卢森堡合建SNR-300原型快堆,而法国则与联邦德国、意大利、比利时和荷兰等国合建超凤凰-1号快堆。

4. 研究部门与工业部门紧密合作

发展快堆必须有工业基础,国外从建造实验快堆开始就有工业部门参与,这样可以及早形成快堆部件和设备加工体系,为快堆的成熟创造条件。

各国均在谋求本国形成快堆工业集团,以增强在国际上的竞争能力。日本、法国都有快堆工业集团,联邦德国、比利时和荷兰则联成-气,增强对外竞争能力。

三、发展我国快堆的建议

(一) 确立快堆的应有地位

热堆 快堆 聚变堆是核能发展的三个阶段,在掌握核聚变堆技术,实现核聚变商用之前,必须发展快堆。只有发展快堆,我国核能的发展才有后劲,因此应当确立快堆在我国长远能源供应中的战略地位,从人力、财力和物力等方面给以保证,使快堆研究发展工作走上正轨。

(二) 建立基地,壮大研究队伍

我国早在1965年就开始研究快堆,到60年代末已具备开展快堆基础研究的条件,形成了一支拥有上百人队伍的快堆科研设计力量。

当前,应当特别重视快堆技术队伍的配备,要尽快整顿配齐各门专业人才,重视新生力量的培养,壮大快堆研究队伍。

(三) 应建设我国自己的实验快堆

国外经验证明,要真正攻克快堆的技术难关,训练队伍,就必须通过建设实验快堆的实践来达到。为了尽快掌握快堆技术,我国应立刻着手建设自己的实验快堆。实验快堆技术难度大,复杂性高,应当将其列为国家重点建设项目,分阶段安排好各项研制和施工任务。

(四) 重大技术原则应及早决策

根据国外经验,我国的实验快堆以选择钠冷池式混合氧化物燃料方案为好。一是钠冷研究工作有基础。二是池式比回路式在技术上的难度要小。三是池式实验快堆向大型池式快堆过渡时有一定的继承性。另外,从长远看,池式在经济上比回路式更有竞争力。

混合氧化物燃料在国外已有丰富的制造和运行经验可资借鉴,它的性能稳定已明朗化,国内又有氧化物燃料的生产经验可取。因此,选择以上技术原则,可以缩短实验快堆的建设周期,节省资金,成功把握较大。当然,对于合金型燃料和碳化物燃料也要进行跟踪研究,以把握转型的合适时机。