

# 快堆及其在我国核能发展中的地位

常 甲 辰

(科技政策与管理科学研究所)

**〔提要〕** 核电已成为常规能源的一个组成部分。我国的核电事业已迈出了重要的一步。本文从对核能开发利用的三个层次的分析入手,在介绍快堆特点及发展概况的基础上,分析了快堆的安全性和经济性,论述了发展快堆电站对我国经济发展的重要意义和快堆在核能发展中“承前启后”的战略地位。

能源与人口、资源、环境是当代人类与社会所面临的四大问题。能源问题,不仅影响着人类社会的经济发展,而且是人类赖以生存的条件。从目前应用情况来看,石油、煤炭、天然气和水力发电是人们获取能源的主要途径,核电也已发展成为常规能源的一个组成部分。而那些可再生能源(如太阳能、风能、海洋能、生物能等),由于技术和经济因素的制约,还难于发挥作用。

在我国,煤炭在能源的生产和消费中都占 70% 以上,石油占 20%,天然气和水电所占比重不到 9%。但是,作为主要能源的煤炭和石油,除了其加工和运输面临的困难外,挖一点就会少一点。从为子孙后代考虑的角度出发,我们必须重视能源的节约和提高能源的开发利用水平。另外,我国能源资源的分布很不均匀,煤炭的 2/3 集中于华北,水力资源的 68% 在西南,石油探明储量的 85% 分布在长江以北的东部地区,而人口、经济相对密集和发达的东部沿海地区,能源资源只占 10%。基于这样的国情,按照周总理关于发展核电的指示,通过对我国核工业基础进行分析,借鉴国外核电发展经验,以压水堆(属于热中子堆)为主要堆型的核电站建设已在我国开展了起来。1991 年 12 月 15 日,秦山核电站的并网发电,宣告了中国大陆“有核无能”历史的结束。我们清楚,核能的开发利用,可分为三个层次: 一是对铀-235 的利用,二是对铀-238 和钍-232 的利用,三是实现受控核聚变(氘、氚聚变)。就这三个层次的工作来讲,核聚变能的应用目前还处于科学可行性的实验验证阶段,要建造电站还是相当遥远的事;现在各国发展的核电站大都处于第一个层次,对铀资源的利用率不超过 1%,单发展这种电站,核电的发展规模,最终要受到铀资源大量消耗的制约;而在第二个层次的工作中,发展第二代核电站——快中子增殖堆电站,一些国家(如美国、英国、法国等)已做了多年的工作,取得了很多经验,并展示出其良好的应用前景。

## 快堆及其发展概况

人类进入核能时代,是自 1942 年 12 月 2 日,旅美意大利籍科学家恩里科·费米领导建成世界上第一座核反应堆 CP-1 开始的。核反应堆,实际上就是一种能使原子核裂变的链式反应有控制地持续运行,实现从原子核中取得能量的装置。快堆,是快中子增殖反应堆的简称,被认为是一种理想的反应堆,甚至被一些人看作是一切动力反应堆的归宿。快堆有两个显著特点:一是利用快中子(能量大于几十千电子伏)轰击核燃料来维持裂变反应,用液态钠做冷却剂,而

不需要慢化剂；二是新产生的核燃料比“烧”掉的多。它的基本原理是：核燃料钚-239 裂变产生高能中子，增殖材料（铀-238 或含铀-235 小于 0.25% 的贫铀）中的铀-238 在快中子轰击下，除有小部分发生裂变外，大部分铀-238 在吸收一个中子后，经过两次  $\beta$  衰变又变成了钚-239。这样，快堆中每消耗掉一个钚-239 原子核，可产生出一个以上的新的裂变原子核。所以，快堆的增殖比大于 1（一般在 1.1 到 1.4 之间），从而实现燃料的增殖。

国际上发展核能的国家，几乎都重视发展快堆。1946 年，美国建成了世界上第一座快中子反应堆克里门丁，验证了快堆的可控性。1951 年，美国又建成了世界上第一座发电的实验快增殖堆——EBR-I，从实验上验证了快堆的增殖可能性。在本世纪 40 年代后期到 50 年代前期，人们了解到可利用的铀资源十分有限，要发展核能就必须想办法将占天然铀资源 99.3% 的铀-238 利用起来。当时，美国、苏联、英国等技术先进的国家，都大力开展了快堆的研究工作。到 60 年代初，美国建成 5 座实验快堆，苏联建成 2 座，英国建成 1 座。从 60 年代初到 70 年代初，主要资本主义国家经济高速发展，电力的年增长率达 7%。这种高需求，引起人们对化石燃料过早耗尽的担心，导致了热堆电站（主要是轻水堆电站）迅速成熟并大规模地进入商用，继而又产生了铀资源的供应问题。当时，不少国家和国际组织都预测认为：在本世纪末将会出现铀资源的严重短缺，只有尽早引入快堆才能解决这个问题。有鉴于此，除美国、苏联、英国外，法国、西德、日本也都投入大量人力物力进行快堆的研究开发工作。到 70 年代初，建成了一批电功率在 25 万千瓦到 35 万千瓦之间的原型快堆电站，与此同时，还开始设计建造电功率在 100 万千瓦规模的商用示范快堆电站。但从 1973 年起到目前，由于主要发达国家经济发展速度下降，加上采用节能措施，电力需求大大降低。快堆的商用化进程大大推迟了。即使这样，至今世界上建成的约 20 座快堆中，仍有十余座在运行，还有若干座在建造中，这些已建成的快堆从几百千瓦到 120 万千瓦不等，沿着实验快堆、原型快堆、商用示范堆的路线发展。

我国的快堆技术开发工作开始于 60 年代中后期。当时，在已故学部委员戴传曾研究员的领导下，集中一定的人力、物力开展了快堆中子物理、热工水力、钠技术和快堆材料等方面的基础研究，建成了 10 多座小型钠回路和试验装置，其中包括周总理、李富春副总理批准调用 50 公斤铀-235 建的快中子零功率装置。1988 年，快堆作为先进核反应堆，其技术开发工作列入我国“863”高技术发展计划后，又开展了快堆设计研究、钠技术、快堆燃料和材料及快堆安全研究。快堆研究中心已在中国原子能科学研究院建成，并将在 2000 年前后建成一座电功率约为 2 万千瓦的实验快堆。

### 快堆的安全特性

发展核电，安全性是第一位的。快堆的安全特性（相对于热堆电站）又怎样呢？在国外，钠冷快堆已处于商用化的前夜。高功率的钠冷快堆，象英国的 PFR、法国的 Phenix、前苏联的 BH-600 等原型快堆和世界上第一座大型快堆电站 SPX-1，在结构上都采用池式结构，其特征就是反应堆、主泵和中间热交换器及一回路其它设备都集中在一次容器内（称为钠池）。采用这种池式结构，使得快堆具有固有安全性：（1）快堆用液态金属钠作冷却剂，有很好的热工性能，在低压下可以获得高温，快堆钠的工作温度，即堆芯出口温度在 530℃ 左右，远低于钠的沸点（886℃），留有 300 多度的沸腾余量；（2）一回路、堆芯钠池的工作压力在 1.5 巴以下，基本上处于高温常压状态，即使冷却剂钠泄漏，也不存在一般热动力堆的失压问题；（3）钠池外有

一保护池,保证了即使在堆容器泄漏的情况下,钠位也在堆芯以上,所以快堆堆芯没有失钠的可能,同时也实现了对放射性产物外泄的控制;(4)由于钠池内有大量的钠,热容大,温升速率慢,会大大缓和各种瞬态变化对部件的热冲击;(5)钠具有很好的导热性,500℃时的热导率为 53.3 千卡/米·小时·度,是 300℃ 饱和水的 100 倍左右,快堆钠池中又有大量的钠,因而具有良好的自然对流能力,保证了即使在冷却系统全部失效的情况下,可以实现衰变热的自动排放,使堆芯适当冷却而不致熔化;(6)经过精心设计,快堆堆芯可布置成非反应性最佳结构,获得很强的负温度系数和负功率系数,具有本征的自停堆能力,使得在各种初级条件下,反应堆依靠反应性反馈使之处于次临界状态,这已在美国的实验快堆 EBR-II 和法国的超凤凰 120 万千瓦快堆电站中得到证实。基于这些安全特性,快堆可以在失流、失热阱(分别相当于切尔诺贝利事故和三哩岛事故的起因)或在功率瞬变情况下,不需要任何控制棒或安全棒动作,也能仅靠自身的负反馈系数自动停堆,而且钠不会沸腾,元件不会损坏。快堆的安全性要优于现在的热中子堆。另外,为保证快堆安全运行,工程人员还从受强辐射和高温钠的作用等方面考虑,对快堆结构材料进行认真的选择和考验。

在整体安全设计上,快堆可以继承第一代核动力堆的行之有效的工程实践经验,包括纵深防御、多道屏障等基本原则。同时,充分利用固有安全性原理,在安全措施上有所发展,提高核电生产对社会、环境和工作人员的安全度。

为达到预期安全目标,保证反应堆在各类事故下的万无一失,快堆设计中还采取必要的设计特征和工程安全手段:(1)采用三种不同停堆系统,其一为固有的负功率反馈,其二为能动的控制棒停堆系统,其三为人工安全停堆系统。(2)采用钠-钠-水及蒸汽三回路排热系统,比一般反应堆多出一条二回路,避免万一蒸汽发生器中发生剧烈的钠-水反应时不致危及堆芯。这方面,经过发展快堆的国家 30 来年的努力,在预防、早期诊断和防止蔓延方面已有可行的措施。(3)为确保放射性物质滞留能力,初期要适当降低燃料元件的线功率密度,主池内装适量钠(如 300 吨),并设保护池和覆盖气体,采用封闭型燃料操作方式,设置坚固的安全壳。

### 快堆电站的经济性

开发快堆技术的最终目的是提供安全可靠并能与商用发电系统作经济竞争的快堆电站。目前,尽管快堆电站技术已经成熟,但由于国际核电市场的萧条和快堆造价昂贵,使它还不能进入商用阶段。据专家估计,国际核电萧条局面一直会持续到本世纪末或下世纪初。随着大量压水堆的退役和对能源需求的增加,迟早会出现一个核电发展的新时期。到那时,快堆电站能否一展雄姿,跻身世界核电市场,关键在于它是否具有良好的经济性。

快堆的经济性与安全性是密切相关的。就其本身固有安全性而言,它的建造安全措施可以降低,但为了保险,又要求加强安全措施。所以,如何用合适的方法,达到既能保证快堆电站的安全,又具有好的经济性,是快堆电站走向商用的关键所在。

大型商用快堆示范电站法国的超凤凰-1 电站的直接建造成本几乎是同等规模压水堆电站的两倍。这样的造价在经济上是无竞争力的。因此,欧洲的英、法、德、意等国联合起来,集中力量对超凤凰电站进行剖析和研究,以期新设计的欧洲快堆电站在经济上可与压水堆电站抗衡。

研究发现,在超凤凰电站设计初期,对快堆固有安全性缺乏足够的认识,增设了一些不必



要的安全设施。根据快堆运行经验和事故状态下的实验,经欧洲各国设计人员和安全机构双方同意,现在已将假想堆芯解体事故从设计事故规范中取消。这样,安全设施部分的成本会明显下降。另一降低成本的途径,是将停堆后的余热直接由主钠池通过非能动余热排出系统排入大气。这样,二、三回路的安全等级也可以降低,建造费用随之下降。此外,根据超凤凰电站的设计经验,整个钠池可以简化,结构和部件的尺寸与体积均可缩小,二、三回路的布置也有潜力可挖。通过设计人员的努力,未来快堆电站的金属耗量可比超凤凰电站下降 45%。

根据前些年法国 NOVATOME 介绍,欧洲联合快堆 EFR 于下世纪初 2005—2010 年系列生产,代替法国退役的压水堆时,它的发电成本只比法国最先进的压水堆的发电成本高 3%。而据国际供电联盟八国(西班牙、德国、英国、法国、比利时、意大利、荷兰、日本)的统计平均,煤电较核电的发电成本高 39%,幅度在 24—79% 之间。

在美国,降低核电站基建成本的主要办法是引入模块电站概念。模块电站在规模经济效益方面会有所下降,但由于其具有下列特点又使得经济效益显著增加:(1)工厂的加工比例提高,可以采用专用设备和稳定生产工艺加工标准化部件;(2)现场劳动量和材料以及相关的间接费用均将减少;(3)与安全相关的设备与设施可以简化;(4)建造周期明显缩短;(5)获得许可证的示范阶段成本可以降低。这样,电站由模块组合,基建成本大大下降。

美国通用电气公司 80 年代中期做了一个 120 万千瓦的模块电站设计,其直接建造成本为 955 美元/千瓦电(本段以下略去单位),而压水堆电站的为 1012,这主要是因为模块快堆电站的现场劳动成本为 120,而压水堆电站为 459。就间接建造成本而言,模块快堆电站为 154,而大型压水堆电站为 871。所以,模块快堆电站基建成本为 1109,要比大型压水堆电站的基建成本 1883 低好多。

核电的发电成本由三项构成,除基建折转费用外,还有运行维修费和燃料循环费。

由于液态钠基本上无腐蚀行为,而且钠池和二回路是低压系统,维修要求低,放射性废物处理量也少,所以,快堆电站的运行费要比压水堆电站低。

关于燃料循环费用,主要涉及燃料元件在堆内的燃耗。要使快堆电站具有良好的经济性,就要求燃料元件的燃耗越高越好。为提高燃耗深度,就必须用高密度中子对核燃料进行辐照。这就要求包壳材料也要有相应的抗辐照能力。现在,快堆的包壳材料多用抗辐照肿胀性能优良的铁素体/马氏体合金。许多国家的快堆电站的燃耗深度已达到 10 万兆瓦日/吨(本段以下略去单位)以上,其中法国的 Phenix 和英国的 PFR 在接近商用条件下已超过 13 万。经验表明,混合氧化物燃料燃耗有达到 20 万的潜力。在美国,新型金属燃料(铀-钚-锆合金)元件及相应的先进高温冶金后处理工艺已取得突破性进展,具备了实用化的可能性,元件燃耗也达 18.5 万。这些,对降低燃料循环费非常有利。现在,美国正在发展高温冶金工艺的后处理技术,并与反应堆一起构成一体化快堆(IFR)电站。按当今的天然铀价和低增殖比考虑,预计其燃料循环成本为 0.55 美分/千瓦小时,低于压水堆的 0.75 美分/千瓦小时。

如果再考虑到快堆的增殖性能,可以说,快堆商用电站的经济性是好的,前景是乐观的。但要真正实现也还要做艰苦的努力。

### 快堆在我国核能发展中的地位

从世界范围讲,核电自 60 年代开始进入商用阶段,到 70 年代即已进入商用推广阶段。到

1992 年底,全世界运行着的核电站有 412 座,总装机容量达 3.24 亿千瓦,在全世界电力中的比例达 17% 以上。据各方面综合预测,到本世纪末,全世界的核电站将超过 500 座,装机容量在 4 亿千瓦以上。

但是,迄今为止已发展成熟并商用推广的核电站都是热中子堆电站,它的铀资源利用率很低( $<1\%$ ),要消耗大量的天然铀资源。就目前情况看,世界上经济可采的铀资源仅为 250 万吨,约可供已建核电站运行 60 年左右。单纯发展热堆电站,核电的规模最终要受到能否获得足够的廉价天然铀资源的限制。这是世界各国在制定本国核电发展规划时所遇到的共同问题。对那些铀资源不丰富的国家和地区,问题更为突出。我国也不例外。据有关部门提供的资料,我国已探明的铀资源的经济贮存量为 75000 吨,可供 1500 万千瓦的压水堆电站运行 30 年。今后经过努力,虽然还可以发现一些,但要保证 3000 万千瓦压水堆电站 30 年寿期的需求(约 150000 吨)已不是件容易的事。按照我国核电发展规划,到本世纪末核电装机容量为 600—650 万千瓦,到 2015 年达到 3000 万千瓦,分别相当于当时总发电能力的 2.5% 和 7%。而且,由于受铀-235 资源短缺的制约,2015 年后难以新建压水堆电站。核电规模如此之小,发展核电也就失去了意义。

为使核电持续稳定地发展,随着热堆核电站的发展,就必然要求发展快堆核电站。一方面,快堆需要钚-239 做初装燃料,而钚-239 在自然界中不存在,要靠热堆生产出来。因此,快堆必须在热堆电站发展的基础上才能发展,否则就成为无米之炊。另一方面,随着热堆电站的发展,会有大量的工业钚和贫铀积累下来,利用这些工业钚和贫铀,发展快堆是很自然的结果。在热堆电站发展到一定规模之后及时地引入快堆电站可使核电的发展具有强大的后劲。

快堆可充分利用核资源,实现裂变燃料的增殖,将铀资源的利用率提高到 60—70%。1 吨天然铀在热堆中使用时,如果不经过燃料循环(即一次性通过),则只有约 5 公斤的铀真正裂变放出能量,相当于 13000 吨标准煤,即使将转换出来的钚再返回堆中做燃料,也只相当于 17000 吨标准煤。在快堆中使用时,由于快堆能充分利用占铀资源 99.3% 的铀-238,1 吨铀则相当于 140 万吨标准煤,是热堆中的 80—100 倍。而且,由于燃料利用率的提高,使得那些目前不具开采价值、品位甚低的铀矿也具有了开采价值,世界上可采铀资源将提高 1000 倍。所以,发展快堆可使铀资源提供的裂变核能比单发展热堆电站高数万倍,也能为人类提供廉价的电力。

快堆可有效地利用工业钚。压水堆电站生产的钚,含钚-240 较多,称为工业钚。它可以在压水堆中再循环使用,也可以在快堆中使用。从充分利用核燃料角度看,在压水堆中再循环,一个钚原子核相当于 0.7—0.8 个铀-235 核,而在快堆中,一个钚原子核则相当于 1.3—1.4 个铀-235 核。工业钚在快堆中使用要比在压水堆中循环使用有效许多。一座 100 万千瓦的压水堆电站每年可生产出工业钚 160—200 公斤。6 座 100 万千瓦的压水堆电站运行 5 年左右即可提供一座 100 万千瓦的快堆电站初装用燃料(包括堆内装料和堆外循环占用料)。而且,快堆投入运行后,它本身又可以增殖钚供其它新建快堆使用。

快堆可充分利用贫铀。贫铀是同位素分离厂生产浓缩铀时留下的尾料,其中主要成分是铀-238。在生产 1 吨压水堆用低浓铀时,也会生产出 4 吨的贫铀。随着压水堆电站的发展,贫铀将大量积压。一座 100 万千瓦的压水堆电站,在 30 年寿期内约消耗 4200 吨天然铀(铀再循环),其中有  $5/6$  约 3500 吨变成贫铀。贫铀,在热堆中无法利用,而在快堆中则变废为宝,成为价值很高的增殖材料。一座 100 万千瓦的快堆电站在 30 年寿期内只消耗 45 吨贫铀。也就是

说,一座压水堆差不多可支持同等功率规模的快堆电站 80 座。所以,在压水堆电站发展到一定规模之后,引入快堆电站就几乎不消耗天然铀资源了。

以 15 万吨天然铀资源为限,我国核能发展规划是: 2015 年,在压水堆电站发展到 3000 万千瓦,积累了相当数量的工业铀的基础上,建成一座功率为 60、90 或 120 万千瓦的模块快堆组合电站来接替压水堆电站,并根据当时工业条件、铀的积累和能源的需求开始批量生产。到 2025 年,建成具有高增殖性能的 100—150 万千瓦的大型快堆电站,并推广应用。根据目前美国发展的合金燃料技术,燃料的倍增时间可望短到 6—7 年,核电容量可望在 10 年间翻一番。这样,到 2050 年,我国的核电容量将发展到 1.58 亿千瓦(相当于当时我国发电总量的 11%),成为我国电力生产的重要组成部分,对我国华东、华南、东北等沿海的能源短缺而经济发达地区的社会经济发展起到重要作用。2050 年以后,由于快堆燃料增殖甚快,核电容量将会继续增长。到 21 世纪的 70—80 年代,核电可望成为我国电力生产的主要组成部分。

综上所述,快堆是一种安全、可靠,并具有好的经济前景的堆型。只有发展快堆电站,才能克服铀资源的缺乏对发展核电的制约,才能保证核电发展有强大的后劲。发展快堆是人类在实现核聚变能的利用之前,必不可少的过渡阶段。而且,由于快堆的发展,我们也就有相当充裕的时间,扎扎实实地进行核聚变能的开发研究,迎接取之不尽用之不竭的核聚变能的应用时代的到来。

### 写在后面的话

任何事物都是矛盾的统一体,快堆也不例外。我们在分析快堆的优点时,也要注意它的缺点和负面效应。这主要有:(1)由于快中子引发裂变的几率比热中子小,快堆就需要有很大的初装燃料,一般需工业铀在 4—24 吨/GWe。而压水堆电站每年积累的工业铀约为 170 公斤/GWe,所以,快堆的发展速度和规模,直接受压水堆工业铀积累的限制。对发展快堆进行投资时,也就不能仅着眼于快堆本身。(2)快堆也有一些不利于安全的特点,如:瞬发中子寿命短,缓发中子份额小,堆芯燃料装量大,钠化学性质活泼,系统运行温度高,等等。(3)快堆的放射性废物中铀-239 含量大,寿命长,因而快堆核废物的处理也就比热中子堆核废物的处理更困难。(4)快堆产生的大量的铀-239,很容易用于制造原子弹。这使人们有理由担心这些铀会落入不法之徒手中,造成核武器的扩散。这又往往会与政治因素联系起来,成为快堆发展的制约因素。另外,高温、深燃耗以及数量很大的快中子的强烈轰击,使快堆内的燃料芯块和包壳碰到的问题比压水堆要更复杂。限于篇幅,本文对这些问题不展开讨论。

不正视面对的问题不是科学的态度;看到问题,萎缩不前更不是我们应有的态度。核能,尽管人们对它的争论空前激烈,但是,作为人类文明的一大进步,作为解决能源问题的重要手段,它将会不以人的意志为转移地向前发展。“生于忧患,死于安乐”。我国是发展快堆的后起国家,在工作中必须从我国的科技发展水平出发,认真吸取国外快堆设计和建造中的经验和教训,做到“趋利避害”。同时,也还要充分利用一切条件,进行有益的国际合作。这对于早日建成我国第一座快中子反应堆是大有裨益的。