

我国重点发展的先进堆型 ——快中子增殖堆

Stress Should Be put on Developing the Fast-Breeder Reactor

王 洲

(清华大学教授)

我国核电在起步阶段选定了压水堆作为第一代核电站堆型。但是压水堆的铀资源利用率低(不超过1.5%),要消耗大量天然铀资源。因此,作为第二代核电站堆型的快中子增殖堆(快堆)便提到日程上来,目的是为在下世纪初铀资源短缺时接替退役的压水堆,使天然铀中98.5%未能燃烧的部分,得到充分利用。

快堆的特点和增殖作用

快中子增殖堆和压水堆(热中子堆)的区别主要在于堆芯核反应的物理行为及反应堆所用的冷却剂不同。快堆需要较高浓度(约20%)的燃料($\text{Pu}239$),而压水堆燃料($\text{U}235$)的浓度仅3%左右。快堆用钠作为冷却剂,由于钠对中子慢化能力低,因此由裂变发出的中子依然保持快中子(速度 ≈ 5000 公里/秒)行为,中子能量高。压水堆则用水作为冷却剂,而水对中子慢化能力强,因此由裂变发出的中子被慢化为热中子(速度 ≈ 2 公里/秒),中子能量低。最令人瞩目的是,快中子引起核裂变发生的中子数目比热中子引起裂变的要多。一部分中子被 $\text{U}238$ 俘获转换为钚($\text{Pu}239$),而且所产生的钚比所消耗的要多,这就是快堆的“增殖”作用。快堆堆芯功率密度要比压水堆高4倍左右。因此,快堆除了增殖而提高天然铀的使用率之外,还具备体积小、功率大、温度高的特点。

快堆和热堆铀资源利用率的比较

为了解压水堆(热堆)的局限性,可用图1和图2进行比较对照。

图1表示在压水堆中铀燃料裂变时所产生的能量及其循环过程。天然铀(含0.7% $\text{U}235$)不能

直接作为燃料,它必须经过浓缩铀工厂浓缩为低浓铀(含3% $\text{U}235$)才能作为燃料。一个1000兆瓦的压水堆电站,第一炉装料约为90吨低浓铀。每年要换料1/3(即30吨低浓铀),相当于每年需要200吨天然铀。这200吨天然铀转换为30吨低浓铀,分离出170吨尾料(称为贫铀,含0.3% $\text{U}235$),每年发电60亿千瓦时。所卸的料经过后处理得到29吨衰铀(其中含0.8% $\text{U}235$),产钚0.2吨,排出0.8吨裂变产物(废料)。这29吨衰铀可再浓缩循环使用。至于产生的钚可贮存起来作为快堆的第一次装料。虽然这些钚也可以在压水堆中循环使用,但是其使用率增加有限。按照上述0.8% $\text{U}235$ 的优化估计,压水堆天然铀使用率不超过1.5%,剩下98.5%的贫铀没有得到利用,但是这些贫铀可以在快堆中使用。

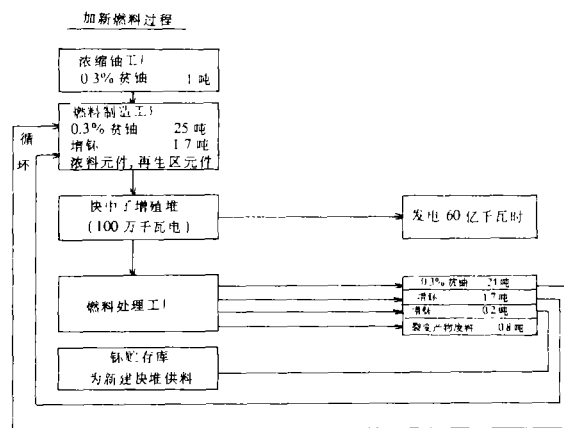


图1 压水堆燃料循环

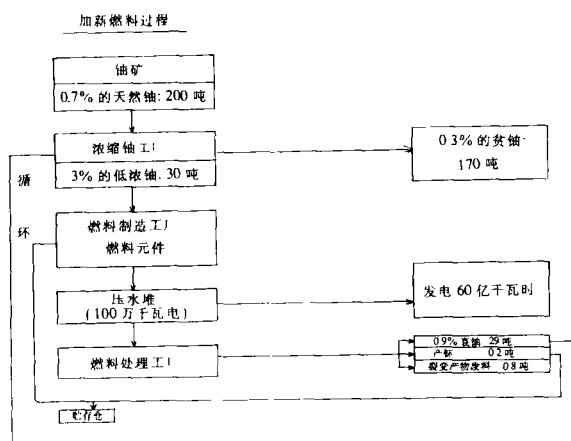


图2 快堆燃料循环

图2表示快堆的燃料周期。一个1000兆瓦的快中子堆电站，每年装新料1.7吨钚及25吨贫铀，发电60亿千瓦时。所卸的料经过后处理回收24吨贫铀，1.9吨钚（其中1.7吨作为循环供料，0.2吨作为新建快堆第一次装料备用），排掉0.8吨裂变产物。因此，实际上快堆每年只需要1吨左右的贫铀以补偿所消耗的燃料。

当然，每吨钚的产生总是来自每吨贫铀的消耗。

根据前面所述，很容易理解快中子增殖堆的重要意义。快堆利用天然铀所产生的能量约比压水堆的大98.5/1.5 $\approx$ 65倍。另一方面，压水堆产生的蒸汽温度及压力低（285 $^{\circ}$ C、70巴），热效率仅32%。快堆产生的蒸汽温度、压力高（490 $^{\circ}$ C、180巴），热效率可达45%。因此，快堆用等量天然铀所发出的电量约为压水堆的100倍。这是一个无法比拟的优势。

快堆的安全问题

快堆发展至今已积累了200多堆年的运行经验，从未发生过严重事故。法国的凤凰(phenix)快堆电站(250兆瓦)及俄罗斯的BN600电站(600兆瓦)，都以很高的负荷因子(61 $\sim$ 65%)分别运行了18年和12年。这是因为快堆本身具备很好的固有安全性。

安全性包括温度反应系数及自然对流冷却两方面。从安全角度看，堆芯局部燃料熔化是允许的，但是当整个堆芯温度上升时，由于负反应性作用，反应堆便自身停熄。此外，我国的试验堆采用池式结构，整个第一回路的部件都放在一个大钠池中，没有失钠的可能性。在断电停泵事故发生时，堆芯的衰变热可靠池中的自然对流排热。这种

不受人干预而自动停堆及冷却的自稳性保证了快堆的安全。

快堆利用钠作为冷却剂，虽然在高温550 $^{\circ}$ C下运行，但是离开其沸点892 $^{\circ}$ C还很远；压力低（0.03兆帕），是一个不加压的回路系统（压水堆则加压至15兆帕）。这都是快堆在安全方面的有利条件。但是快堆也有它的弊端，那就是蒸汽发生器中会因水泄漏而发生钠水反应的事故。为预防和阻止钠水反应事故，快堆比压水堆增加了一个中间回路，把水回路和一回路的钠隔开，这样即使有水泄漏也不会波及反应堆。中间回路装有很敏感的测漏及保护系统，有钠水反应时，自动停堆、泄压。必要时还自动排钠，蒸汽发生器因而得到保护。蒸汽发生器出现泄漏是经常的事，由于有了上述措施，问题便解决了。这就说明为什么俄罗斯和法国的蒸汽发生器虽出现过钠水反应事故，但从来没有造成严重后果。

快堆是一种干净堆型，其周围环境可以保持很清洁，因为快堆运行所排出的放射废物量非常小。运行期间，工作人员所受的辐射剂量不及压水堆的1/100。平均总剂量在7 $\sim$ 20人雷姆/年之间。这是世界各国快堆运行的经验。

快堆的经济性问题

目前世界上已建的快堆电站（如法国的超凤凰1200兆瓦电站），尚处于商用化的初期阶段，其发电成本约为压水堆的二倍（相当于煤电价格）。这是因为目前天然铀的价格还低。另一方面是因为其设计尚未标准化，制造尚未批量化。

快堆燃料费用低的优势将随着天然铀资源的日益短缺而发挥出来，当铀价上涨到目前水平的2.6倍以上时，批量建造的快堆电站即能和压水堆电站相竞争。为着提早（2000年以后）把大型快堆引进核电市场，欧洲快堆电力集团正在超凤凰电站经验的基础上，力图改进以降低造价，把批量建造的发电成本降到压水堆的1.15倍。这个合作的短期目标是在工业钚使用方面发挥快堆和压水堆的竞争能力，长期目标才是发挥快堆的增殖优势。

快堆在我国能源计划中短期及长期的作用

我国长期电力不足，按地区的需要，在缺乏水、煤而运输不方便的地方发展小型快堆（150 $\sim$ 300兆瓦电）是有重要意义的。因此在我国核能发展规划中，必须提早对压水堆燃料后处理方面有适当的安排，为快堆提供首炉燃料，以保证快堆接替压水堆的匹配方案。

（下转第52页）

(2) 因地质构造复杂和勘探精确度的限制, 在低概率水平上并不排除国内原油采掘出现短时的超常增长, 保持一定的闲置能力要比临时投资兴建新装置来得及时;

(3) 国际原油市场波动总会出现有利于加工进口油的油价, 只有握有闲置能力才可能抓住类似的机会。

一般认为, 生产能力的有效闲置一般出现在那些关联性强, 具有潜在发展能力的产业, 这些产业的超比例发展将有利于实现结构长期动态平衡。这也是基础产业要超前发展、主导产业要重点发展的原因。能力闲置对产业结构聚合质量可靠性的效用随闲置程度而变化。随着闲置度(=闲置量/加工量)的增大, 其总效用亦增大, 但存在一个极限, 即闲置度临界点, 超过临界点后, 闲置能力的增加不再提高总效用, 实际上已成为无效闲置。在具体实践中, 闲置能力的最优选择不会在临界点上, 因为理想的目标是由效用与成本共同决定的。随着闲置能力的增大, 闲置成本也随之增大, 当边际闲置成本等于其边际效用时, 总效用与总成本之差达最大值, 此时的闲置规模即为最佳闲置规模。

3. 从国际比较看中国石油加工能力最佳闲置度的范围。

世界各国石油加工能力闲置状况参差不齐, 悬殊很大。据统计, 意大利能力闲置度历年平均高达0.91, 日本、法国均为0.55, 而处于发展中国家的加勒比海各国也有较多的闲置能力, 闲置度为0.50。我国与欧佩克成员国最低, 历年平均同为0.20。从发展趋势看, 各国80年代后期的能力闲置水平较前期有不同程度的降低, 尤其是西欧各国降低幅度较大。我国能力闲置度也显著降低, 从1979年的0.34降为1989年的0.10。但1990年又反弹至0.20。

笔者认为, 作为产油国尤其是石油净出口国, 能力闲置度应处于低水平, 发展中国家也应保持较低的闲置能力, 但0.10已是最低限度, 低于该水平意味着基本上放弃机动能力。(当然, 短期内低于此数是可行的, 并且从经营的角度讲贴近于0最好, 无闲置成本。)根据西欧大幅度调整生产能力的经验看, 闲置度超过0.50显然是不经济的, 或者说已达到相对闲置的极限值。因此, 我国能力闲置度的最合适的水平应在0.10至0.25之间。

四、相对各个决策层级的政策建议

针对能力闲置的形成原因, 石油加工企业的努力方向是: 优先生产资源、加强瓶颈环节的技术改造和追加投资、减少生产制约型闲置; 加强市场

导向, 促进产品升级换代, 避免市场制约型能力闲置; 继续采用高效催化剂、添加剂, 进一步降低投入消耗, 提高高附加值产品的产出比率, 走以内含扩大再生产为主的道路; 积极开拓国际市场, 引进先进技术, 大幅度提高利用国际资源的企业实力。

石油加工行业在自我约束, 将闲置生产能力控制在最适规模水平的前提下, 要充分运用竞争机制, 以闲置能力刺激运行能力提高效率。在原油分配上逐步放弃“地区均衡”与“加工能力均衡”的模式, 以经济效益和投入消耗为标准决定原料供应顺序; 配合国家经济政策, 运用经济与行政手段, 双管齐下, 限制小石油加工装置与企业的发展; 创造条件加强国际石油市场的宏观预测能力, 在进出口贸易与国际融资、投资管理方式上要采用适当分权的原则, 使大中型企业拥有充分的自主权, 在国际经济活动中遵循国际惯例, 改革不适应国际竞争形势的运行机制和操作方法, 以利于强化对国际市场波动的反应能力。

我国是世界上少有的几个以煤炭为主要能源的国家之一, 大量生产与使用煤炭使交通运输、环境保护面临越来越大的压力。因此, 优化能源结构的一个方向是适当提高石油生产与消费的比重。所以, 国家应继续向石油产业倾斜投资并加快发育金融市场, 吸引社会资金流入。国家对石油加工业有三种政策选择, 一是先予后取, 以扶持为主, 包括加大投资比例, 降低税赋等, 此为上策; 二是在财政困难的前提下, 维持现有优惠政策, 而企业发展靠其自行解决, 此为中策; 三是“杀鸡取卵”, 以石油加工业的萎缩为代价补贴其它新兴行业或亏损部门, 此为下策。事实表明, 在经济发展的某一时期, 选择一类或一种工业实施非均衡战略, 能够比均衡模式更快地达到预期目标。石油化工业具备很强的前后向联系作用, 在非均衡发展战略中应处于超前发展的地位。

(责任编辑 蔡今)

(上接第48页)

根据863计划, 在2000年, 我国将建成第一座试验快堆。在设计的技术选择方面, 除考虑充分发挥试验堆的研究作用之外, 还必须瞄准未来原型堆在固有安全性和经济性方面的发展趋向。沿着已定的核电八五计划、十年规划前进, 在2000~2015年之间, 为解决一部分工业用电和用热的需要利用快堆体积小、功率大、蒸汽质量高(490°C, 180巴)的特点, 分期把一批小型快堆投入国内市场, 这不但是可行的, 也是必要的。

(责任编辑 刘先曙)