

重庆市建设高温气冷堆型核电站的可行性论证

刘健飞

(中国核工业建峰化工总厂, 重庆, 408601)

中国核工业建峰化工总厂是重庆市的特大型企业, 曾在1984年军转民时期争取在重庆市(当时的四川涪陵白涛镇)建设核电站项目, 由于政策、产业组织能力、资金、堆型和单堆功率技术选择等问题, 未获国家批准。时至今日, 重庆自成立直辖市以来, 经济高速发展, 电力需求急剧增长, 电源建设迫在眉睫, 重庆市政府积极争取大型电源建设。在加强水电、火电规划建设的同时, 核电站建设也提到了议事日程上来。目前, 重庆市政府、中国电力投资公司、清华大学、华东电力设计院, 已初步确定在我厂厂址建设核电站, 该核电站的前期准备工作交由我厂来完成。笔者是工作组成员之一, 以下从几个方面对该核电站工程的必要性、可行性进行论证。

1 重庆市供电形势分析

重庆自成立直辖市以后, 经济高速增长, 2002年全市预计完成国内生产总值1970亿元, 比上年增长10.4%, 高于预期1.9个百分点, 全市电力电量消费比上年同期增长10%左右。2002年统调系统夏季高峰负荷高达374万kW, 比上年同期的341万kW增长了9.6%; 最大日发购电量7514万kWh, 比上年同期6742万kWh增长了11.5%; 全年最大峰谷差达到158万kW, 比上年的最大峰谷差139万kW增大了13.6%。

随着重庆市经济的增长, 预计2003年后电力短缺情况将会逐年加重。为保证全市经济发展用电的需要, 重庆市政府积极进行电源建设, 从1999年起, 重庆市就陆续开工建设江口电站、白鹤电厂二期工程两个大型电源项目, 以及藤子沟、鱼剑口等一批中型水电站。重庆市2003—2004年在建电源项目见表1。

重庆市年用电量按年增长9%预测和分析, 以上电源项目陆续建成发电, 虽然可缓解近期电力短缺矛盾, 但缺口依然较大。

表1 重庆市2003—2004年在建电源项目

项目名称	装机容量(万kW)	投产年份	备注
江口水电站	3×10	2003年	2003年全市新增装机32万kW
大溪河水电站	2	2003年	
白鹤电厂二期	30	2004年	2004年全市新增装机容量46.2万kW
藤子沟水电站	2×3.3	2004年	
鱼剑口水电站	2×3	2004年	
梯子洞水电站	3.6	2004年	

从一定意义上说, 电力供求状况是经济发展运行的晴雨表。重庆市电力短缺问题是经济快速增长带来的问题, 是前进中的问题。抓紧推进特大型电源的规划建设, 促进重庆市电力建设上新台阶, 使之成为带动经济快速发展的一个动力。

2 重庆市未来十年规划建设电源项目情况分析

重庆市第二次党代会明确了“分三步走”的战略目标: 到2020年把重庆市建设成为长江上游经济中心。这一目标的前十年, 即从现在起到2010年, 重庆市要构建起长江上游经济中心的基本框架, 必须尽

综述
核电设计
工程管理
工程建设
运行维护
安全
核电前期
核电论坛
核电经济
核电国产化
核电质量
核电信息

快建立起安全可靠的能源供给保障体系。

目前，重庆市电力生产和消费水平都落后于全国水平，人均拥有电力装机容量为0.13 kW，仅相当于全国平均水平0.25 kW的1/2，年人均消费电量700 kWh，仅相当于全国年人均消费电量1100 kWh的3/5。到2010年全市人均电力装机和电量消费要达到或接近全国平均水平，每年电力消费增长率保持在8.5%~9%，与全市GDP增长水平大体同步，实现电力生产能力和电量消费水平翻一番。预计2010年，全市发电装机总容量将跃上1000万kW以上的新台阶。

为构建安全可靠的能源保障系统，重庆市规划在2003—2010年期间建设一批重大电源项目，建设总规模近1000万kW，总投资643亿元，确保在2010年前建成发电装机容量达到600万kW。届时，全市发电装机总容量达到1000万kW。重庆市规划在2003—2010年期间建设的重大电源项目见表2。

表2 重庆市2003—2010年期间陆续建设的大中型电源项目

项目名称	重庆发电厂东厂扩建工程	瓦珞璜电厂三期工程	合川草街航电枢纽工程	彭水电站	双槐电厂一期工程	石堤电站	任河梯级水电站	浩口水电站	綦江盘龙抽水蓄能电站	合川双槐电厂二期工程	合计总装机容量	规划总装机容量	总装机容量缺口
装机容量(万kW)	1×30	2×60	50	5×28	2×30	40	17.3	30	120	180	787.3	1000	212.7

从上表明显可以看出，2010年要达到1000万kW的规划建设装机容量，仍然有至少200万kW的缺口，若考虑到对用电增长趋势估计不足等因素，这个容量缺口将会更大。

3 重庆市电源结构及资源状况

重庆市的电源结构主要是煤电、水电、省外购电。

截止2001年底，重庆市共探明煤炭资源储量29.9亿t，保有储量22.9亿t，全市煤矿现有生产能力在2000万t左右。

重庆市煤炭尽管有一定储量，但是品质不高，主要是高硫、高中灰粉煤。根据国家环保政策，含硫量3%以上的煤炭资源不能开采。而重庆市绝大多数煤炭的含硫量都在3%以上，因此，煤炭资源的开发利用受到限制。从长远发展而言，重庆市大型火电厂的用煤必须依靠省外调煤加以保证。因此，大型火电厂的建设会带来加大铁路运输负荷的新问题。

重庆市境内水力资源丰富，流域面积在100 km²以上的河流122条，水能理论蕴藏总量为2300万kW，可开发水能资源710万kW。2010年前水电开发重点放在乌江、嘉陵江、酉水、芙蓉江等江河流域。水电的主要问题是当年12月到次年一季度高峰负荷期间的枯水季节，发电量反而减少，高峰负荷缺口大的矛盾不易解决，会出现大面积拉闸限电的严重局面，这给煤电造成了巨大压力。

4 重庆市未来电网建设情况分析

为保证重庆市电网供电可靠性，使规划建设的电源项目投产后能够供得出、用得上，2003—2010年期间将完成渝东南、渝东北220 kV输变电工程；结合彭水电站、珞璜电厂三期工程及双槐电厂等重大电源项目实施时序，配套建设500 kV送出工程，构建起全市500 kV输电环网，建设重庆—三峡二回500 kV输电工程，提高电力供给保障程度。

5 重庆市发展电力的措施和政策分析

重庆本地电力消费市场容量大，是典型的受端网络，不属于“西电东送”电源开发省市，国家各大型发电集团及投资公司均看好重庆，重庆市电源建设实行开放政策，积极引入实力较强的投资者到重庆参与电源建设。

6 重庆市核电站建设的战略选择分析

重庆市有建核电站的市场需求和条件；可弥补重庆电源规划建设总容量的缺口；可改善和优化重庆市电源结构；可缓解煤电燃料的交通运输压力以及煤电的运行压力，提高电源运行备用率；可缓解水电在枯水季节减少发电量的矛盾；有非常良好的环境效益；可充分利用重庆市原核工业企业现有基础资源。

那么重庆核电站建设如何进行战略选择呢？是进口战略还是国产化战略？继而选择何种堆型？选择多大单机功率规模呢？

从核电的经济性来讲，核电要参与商业竞争，逐步由政策性产业向纯商业性产业的可持续性方向发展，就必须大幅度降低核电的单位投资，核电装备就必然要选择国产化战略。

国产化战略就是核电技术和装备国产化战略，国产化要以自主设计和自主采购为核心，坚持自主运行，带动设备制造的自主化。首先应该立足已有的基础，尽快实现一种堆型的技术研究开发和系统设计自主化，并在此基础上实现创新。在确保安全的前提下，要避免导致多堆型、多路径、万国牌的某些技术偏好，坚持以经济效益为判据，以最少的新增投入实现设计自主化。

从国家对21世纪初的10-20年内核电发展远景规划看，国家将高度重视核电建设，扩大核电建设规模，增大核电在装机容量中的比重。同时指出，加快开发核电建设，最关键的问题是加快核电设备的国产化，否则其造价过高将严重影响我国核电的发展。也特别提出，抢占核电技术发展的制高点，积极实施产、学、研相结合，将高温气冷堆技术转化为生产力，在2005年前建成工业性示范堆，力争2010年前即有小批量投入，2020年即有大批量投入。

基于上述各种核电建设的有利因素，无疑为重庆市核电站建设提供了一个良好的机遇。

2003年6月，重庆市政府、国家电力投资公司、中国电力工程顾问集团公司、清华大学、华东电力设计院几家单位经过磋商，最终达成共识，决定共同向国家申请，争取在重庆市建设高温气冷堆型核电站工程。并将单机功率初定为16万kW，总规模为10座单机核电站，即 10×16 万kW（160万kW）。

7 高温气冷堆型的可靠性分析

反应堆通俗地讲就是“原子锅炉”，它是通过控制核燃料的反应来利用原子能的装置。通常，反应堆的核燃料是铀235，在中子的作用下能够产生核裂变。一个铀235原子核吸收一个中子后，会分裂成两个较轻的原子核，以热的形式释放出能量，并产生两个或者三个新的中子。在一定的条件下，新产生的中子会引发其它的铀235原子核裂变，这种反应延续下去，就是“链式裂变反应”。要形成“链式裂变反应”，不仅铀235要达到一定数量，还必须用慢化剂把高能的中子减慢为“热”中子，控制反应堆中核燃料的反应使核能缓慢释放，并用载热剂从反应堆中导出热量，就能利用核能发电。

作为一种先进的堆型，高温气冷堆将在未来的核电站中扮演重要角色。就其安全性来说，国际上提出了“第四代先进核能系统”的概念：要求具有良好固有安全性，在事故状态下不会对公众造成公害，并且建设周期短，在经济上能够与其他发电方式相竞争。目前国际上的一致看法是，高温气冷堆是能够满足“第四代先进核能系统”要求的装置。

我国于70年代中期开始研制高温气冷堆技术。该种类型反应堆的研制存在着很大的技术风险，主要瓶颈在于堆体对材料的力学强度和堆内反应控制要求特别高，特别是堆内反应温度的掌握和控制技术难于突破。在材料力学有了很大发展之后，高温气冷堆研制取得了技术性突破，并且困扰多年的堆内温度控制问题也基本得到解决。1997年底第一台高温气冷堆样堆在四川研制成功，并成功进行了试运行。

高温气冷堆技术主要研究单位是清华大学核能技术设计研究院。1986年国家863计划启动后，高温气冷堆被列为能源领域的一个研究专题，在国内有关单位的协作下，完成了一系列重大的技术创新，既确保安全可靠，又简化了系统，达到了世界领先的水平。

高温气冷堆的研发、设计和建造中取得了如下系列创新技术成果：

(1) 研制成功了达到国际先进水平的包覆颗粒球形燃料元件制造技术。这种关键技术又包括以下多种先进工艺技术成果：能批量生产出核能纯天然鳞片石墨粉和酚醛树脂；开发了溶胶-凝胶新工艺，可批量生产直径0.5 mm的UO₂核芯，具有尺寸分布均匀、密度高、球形度好等优点；在锥形流化床中，用化学气相沉积法沉积热解碳和碳化硅的机理和工艺参数及性能的规律，批量生产包覆燃料颗粒，热解碳化硅的尺寸、密度和各向异性能按要求控制；用橡胶模冷堆等压方式制造高温气冷堆球形燃料元件的工艺，批量生产的球形燃料元件冷态性能达到国际上模块堆的设计要求；发展了三十多项燃料元件性能测试方法，研制了多项测试器，其微小物体（几十至百微米）尺寸、密度等性能精确测量仪器系统填补了国内

空白，达到国际先进水平。

(2) 在国内首次开发和研制成功关键氦气技术设备，掌握了高难度的氦气技术。

(3) 发明了脉冲气动式单列化排出球形燃料元件装置，解决了连续装卸核燃料的一系列关键技术。

(4) 研制了全数字化仪表控制系统和反应堆保护系统，并在我国核反应堆中首次采用。

高温气冷试验堆在国家核安全局专家现场监督下已完成了控制棒系统、主氦风机、余热载出系统、氦气净化系统等28项重要试验，对各系统的安全性和运行可靠性进行了严格的考验，全面验证了设计的合理性和设计系统功率。在此基础上，国家核安全局对该反应堆进行了提升功率前的检查，成功实现了功率提升。这一成功为我国用产业化方式建造更大功率的同类型核电站打下良好基础。

与一般的反应堆不同，清华大学核研院研发设计的高温气冷堆是一种新型的反应堆，不仅保证了先进性和安全性，经济效益也很突出。

首先，高温气冷堆具有固有的安全性。它的反应控制和压力调节简单，系统安全大为简化。即使失去冷却，全陶瓷燃料元件也会逐渐降温，任何时候都不会发生烧毁的事故。由于它具有极高的安全性，因此可以建在人口稠密的大城市附近，从这一点来讲，在重庆市建设高温气冷堆型核电站是安全的、可靠的。

其次，高温气冷堆有很好的经济性。我国大亚湾核电站每千瓦造价在1700-2000美元左右，而相同功率的高温气冷堆每千瓦造价在1000-1500美元之间。高温气冷堆是按照模块化概念和准则设计建造的，避免了施工现场的大量焊接和检验工作，建造周期仅为2-3年，还可以连续装卸燃料，发电效率从压水堆的35%左右提高到45%左右。与火电相比，核燃料价格相对也较低，仅占发电成本的20%左右，而火电燃料价格占发电成本的80%。

而从燃料运输角度来看，核电的优势更为突出。一座100万kW的燃煤电厂，每年消耗300万t原煤。平均每天要卸一艘万吨轮或是120节的运煤车皮。而同等容量的核电厂，每年只需要补充约30 t核燃料，其运输费用是微不足道的。

现在世界上大部分反应堆用的是金属管棒状燃料元件，载热剂是水，不耐高温。即使是压水堆，最高工艺温度也只能达到328℃。而高温气冷堆的载热剂是氦气，用石墨作为慢化剂和结构材料，通过高科技工艺制造球形包覆燃料元件。它的堆芯温度可达1600℃，氦气出口工艺温度高达950℃，这是其它任何类型反应堆都达不到的。

以下将高温气冷堆与压水堆作一对比。

表3 两种堆型的比较

	压水堆	高温气冷堆
核燃料	铀235	铀235
慢化剂	水	石墨
载热剂（冷却剂）	水	氦气
工艺热出口温度	328℃	950℃
燃料元件形式	金属管棒状元件	全陶瓷球形包覆元件
反应性控制	控制棒，硼浓度调节可燃毒物	控制棒
压力调节	稳压器	氦气的吞吐
余热排出	能动	非能动
应急给水系统	有	无
安全注入系统	有	无
应急柴油机	安全级	非安全级
安全壳	气密性、双层壳、喷淋堆容捕集、	不承全压、无气密性要求的包容体

表4 两种堆型核电站的比较

	压水堆核电站	高温气冷堆核电站

核电站建设周期 (同等规模)	6年	2年
发电效率	35%	45%
比投资	2000美元/kW	1500美元/kW
规模	单机大容量	单机小容量, 模块化

以国际原子能机构为代表的世界核电界认为, 到2010年左右, 高温气冷堆将无可争议地成为经济上有竞争力、中等容量生产核电的最好的能源技术。

8 结论

从上述几方面论述并结合国家核电发展布局的总体思路, 可以得出结论: 目前, 在内陆省份重庆市建核电站的市场条件、技术条件、安全保障已经不是问题, 在长江上游未来的经济中心--重庆市建设核电站是必要的、安全的和可行的。