

## 美国核电复兴引发的思考

曾文星

(中国广东核电集团公司, 广东深圳, 518031)

### 1 背景

美国是自上世纪50年代继前苏联之后将军用核技术转用于核能发电的。经过60、70年代的鼎盛发展期,到80年代后半叶基本上再没有新的核电站兴建。核电工业逐步衰落,人才流失,而核电工业通过技术转让,在欧洲的法、德和亚洲的日、韩生根发芽。尽管自80年代后半叶起,美国核电界在核能研究所(NEI)、电力研究所(EPRI)等共同组织下,花了近20年时间,按照用户要求文件(URD)于90年代末先后开发出所谓第三代先进堆,包括ABWR、APWR、System 80+及AP-600,实现了更安全、更先进的目标,但这第三代竟然未能在美国站住脚跟,只能在日本(ABWR)和韩国(System 80+)少量开花结果。

1995年美国推进电力改革,人们担心美国已建核电厂将在市场竞争中逐步消亡,并预测美国核电新建项目遥遥无期。没想到的是,新世纪开始不久,在布什上台后,自2001年初就陆续传出美国核电复兴的消息。随着美国政府2001年5月能源政策的公布,切尼副总统代表美国政府公开宣布了扶持核能的方针。美国能源部(DOE)正式推进第四代核电的开发,核管会(NRC)表示全力支持老核电厂的延寿和升级改造,并打算全面补充人力,修订法规,以迎接新核电厂兴建的申请;西屋公司为赶时间,不惜采取挖潜的办法,将刚开发出的AP-600提高功率改为AP-1000来抢占市场;各美国业主也放弃了80年代共同约定的URD的理想要求,从市场竞争出发,准备接受AP-1000;甚至美国主要大学也开始考虑加强核工程物理系,以培养核工业人才。在美国总统大选时(2000年)反核在美国仍然是历届总统候选人的口头禅,并作为竞选纲领的主要口号之一,而“核安全”、“核废物”、“核不扩散”都曾是西方主流媒体反对核电的似乎不可逾越的三大因素,但曾几何时,相隔仅半年多,美国举国上下,上至总统、议员,下至普通大众,都接受发展核能作为国策,连反核最凶的主流媒体也是一片赞美之声。鉴于美国在世界核电工业的领导地位,其政策上的变化,势必对世界核电工业发展产生深远的影响,这一现象不能不引起我们的思考。

当前世界核电发展的形势,有的同志概括为:“沉默观望的欧洲,雄心勃勃的俄国,正在复兴的美国,大有希望的亚洲”。搞清楚美国对核电政策转变和推进核电复兴的来龙去脉,肯定对我国未来核电工业政策、方针的制定大有裨益。衷心企盼亚洲核电新兴的希望最终能落实在中国。

### 2 美国核电复兴的主要因素

为什么美国核电能得到复兴呢?

#### 2.1 民意支持

在经济发达国家,出于对“核爆炸”、“核安全”的疑虑,加上主流媒体的恶意渲染,自三哩岛和切尔诺贝利事故之后,不少工业发达国家的民意对发展核电转为审慎的态度。再加上政党的利用,不少国家将不发展核电定为国策,民意咨询也成为发达国家审批核电站兴建的主要程序,且往往成为核电建设立项的主要障碍。

但自2001年元月起美国的民意测验发生了“质”的变化,赞成正在运营核电厂延寿的达到81%,甚至赞成新建核电站的也首次超过半数达到51%(3月份达到66%),为美国能源政策的转向奠定了良好基础。

#### 2.2 核电厂运行性能指标大大提高,核电成本再次低于煤电

综 述  
核 电 设 计  
工 程 管 理  
工 程 建 造  
运 行 维 护  
核 安 全  
核 电 前 期  
核 电 论 坛  
核 电 经 济  
核 电 国 产 化  
核 电 质 量 保 证  
核 电 信 息

美国正在运行的103台核电机组在1990年前一直在低可用率下运行,平均可用率从未超过65%,加上NRC的监管层层加码,造成建造和运行的费用不断提高,上世纪80年代的煤电电价一直下降,低于核电,加上天然气价格低廉,燃气轮机联合循环机组的高效率,到90年代初美国酝酿实行电力改革、走向市场竞争时,绝大部分人都不看好核电,认为核电会在1995年开始的电力市场竞争中走向衰落,可能只有少数运行业绩、性能好的核电厂可以幸存下来。

但事实与大家的预测相反,美国运行的核电厂自1990年开始各项指标得到了提升,尤其在1997年后得到大幅的提升:(1)平均可用率从1990年的64%提升到2001年的90.1%;(2)总发电量从1990年的5720亿kWh升到2000年的7550亿kWh(相当于增加22台百万千瓦核电机组的发电量);(3)核电生产成本(O&M加上燃料和废物处理费)从1990年的3美分/kWh降到1999年的1.83美分/kWh,使核电成本价再次低于煤电。更为重要的是,安全指标也得到显著提高,每座核电机组的非计划停堆平均值从1.2降到0。这一切,大大提高了核电在电力市场中的竞争力。目前,核电自然而然地成为美国各州带基荷运行的主力能源。

## 2.3 美国核管会监管方式的转变

美国核管会是以“关、卡、压”而闻名的。

在基建方面,自上世纪70年代起,NRC对核电项目的监管不断加码,对QA和QC的要求加倍再加倍,使核电站建设工期从原来的4-5年逐步延长到10-12年,从某种意义上讲,是这种不恰当的监管方式扼杀了美国的核电工业,加上其它因素,使美国核电工业自80年代中期起逐步走向衰落。

在运行、维修监管方面也是如此,由于监管项目繁多,有些与核安全不相关的也要管,且审批程序繁琐,时间又拖得长,导致核电厂很难预见何时才能得到运行许可,造成很多所谓的“监管停运”(Regulatory outages),这也是80、90年代相当一段时间内美国核电站可用率不高的原因之一。

自90年代以后,核管会吸取了教训,在核监管方式上作了重大改进。

### 2.3.1 基建方面

自90年代起配合着第三代先进核电站的研发,为了减少业主对核监管的担忧,推出了许可证一次审批法。即NRC直接参与第三代先进核电站的研发过程(包括研究、设计、科研验证),在研发、初步设计过程中平行进行核安全的评审,一旦合格就颁发设计许可证,业主可以据此进行开工兴建,在建设期间,不必像目前的程序那样,再向监管会提交初步安全分析报告和最终安全分析报告。

最近美国核管会为了贯彻美政府支持核能的政策,进一步改进了基建核安全评审程序,即同意对业主提供的新厂址提前预审,并在正式开工前授予核电站厂址许可证,除继续执行相应新核电站设计的预审并在开工前预授设计许可证外,还对业主如何项目综合运营(combined operation)提前审查。其目的在于,让新建核电站的业主在正式开工之前已获得NRC颁发的所有许可证(即Design certification、Utility early site permit、Utility combined operation license),确认在基建期再没有什么许可证审批的问题。在核电站基建过程中NRC要做的,只剩下对建设全过程实行监督,按照已批准的许可证条件进行实施,并在核电站投产前进行最后验证,一旦调试结果完全达到设计要求,就发放运行许可证。

美国NRC基建审批程序的改变,大大降低了核电站业主在建设期的风险,也提高了投资者对新核电站投资的信心。

### 2.3.2 运行方面

近5年来,美国在老电厂运行、维修和技改方面取得了骄人的成绩。除技术进步、管理加强外,新的安全管理理念的引入和监管方式发生了质的变化,也是一个重要的原因。

1993年起,NRC发表政策声明,引入PSA(Probability Safety Assessment)作为风险监管工具;1995年,NRC对PSA的广泛应用发表了最终政策声明;1998年NRC正式颁布了风险指引型(Risk informed)安全管理导则,在以PSA评估风险的基础上大大缩小了原有的核安全监管的范围,减少了不少不必要的繁琐手续和限制,将精力集中在真正核安全风险的关键点上。尤其对“黑白不是太分明”的灰色领域,过去,NRC由于缺乏手段难以诊断,往往就亮“红灯”,现在有了公认的PSA作为评断工具,就可作出明确的决断,从而给核电厂的连续安全运行和维修提供了一个行之有效的评判方法,开了绿灯。

这几年来的实践证明,PSA确为核电站减少不必要停运、大大缩短大修时间创造了条件,且通过PSA分析,找出原电站设计裕量,为老电厂通过技改进一步提高功率打下基础。更重要的是,促使美国的核安全文化从确认安全管理和遵守规则监管方式的第一阶段走向风险指引的安全管理和注重业绩监管方式的第二阶段。

美国核管会的政策及监管方式的改变使核电工业大大受惠，促进了新技术的采用和电价成本的下降，也有利于新核电站的建设，大大增强了投资者的信心。

## 2.4 核电企业兼并逐步兴起，管理水平不断提高

美国原一百多台核电机组分属于几十家小业主，由于种种原因，直至1990年平均可用因子仍在70%以下。在上世纪90年代中期美国开始实行竞价上网时，迫于市场竞争的压力，不少经营不善的小业主愿意售出其核电厂，而部分经营得好、有战略眼光的核电企业，从市场竞争规模经营出发，也愿意实行兼并。在市场竞争条件下，核电企业两极分化严重，在竞争过程中好的更好，差的更差，使兼并逐步持续发展，当然也有极少数业绩及设备状态太差的，也逐步被淘汰出局。1989年，共有54家公司运营112台机组；1995年，46家运营108台机组；2001年，24家运营103台机组。

行内人士预测，由于运营好的与差的公司的电价成本仍相差约一倍，利润空间仍大大存在，在竞争中，这种兼并行动仍会继续，在不远的将来，核电运营公司可能会减到10家左右。

美国运营中的核电厂之所以业绩相差很悬殊，关键在于管理。如Domi ni on公司，只经营4台机组，自70年代末期投产以来，4台机组都一直名列前茅。1997年Domi ni on公司兼并了3台业绩很差的机组，只对高层管理人员进行改组，原有工人、技术人员都不动，仅将一套成功的管理办法贯彻实施，在两年时间内3台被兼并的机组都实现了飞跃，可用率从70%多提到90%以上。又如，Exel on公司是目前兼并其它公司最多、并成为全美核电机组最多的公司（共17台核电机组），经过3年改造，17台机组均进入美国前25名的先进行列。2001年，17台机组平均：

- 大修工期：20天；
- 生产成本电价：1.2美分/kWh（包括运行维护和燃料成本）；
- 平均可用率：94.4%。

目前Exel on公司正准备一项雄心勃勃、成为世界级核电运营者的计划，以便到2004年时：

- 平均可用率：从94.4%提高到96.1%；
- 全成本电价：从2.15美分/kWh降到2.0美分/kWh以下。

可以说，这些管理好、有战略眼光的核电运营公司在这次兼并中尝到了甜头，这是由于在兼并后实施了以下措施：规模经营，群堆管理包括采用捆绑式的一揽子备品备件、维修服务、燃料供应等招标，更有条件与各供应商讨价还价，降低运行成本；留用和选拔优秀人员到重要岗位，裁减一般人员，提高工效；在堆群中广泛推行最先进的技术和管理；更专业化的经营，不断挖潜创新，提高核电效益。从而达到了安全、经济、高效的目标，这也为美国核电的进一步发展奠定了坚定的工业基础。目前，这些经营良好的核电运营公司正在向以下四个方面进一步拓展：

### （1）老厂延寿

- 从40年延长到60年；
- 至2000年已批准5家，预计2003年扩展到16家，美国现有103台机组，估计申请延寿的将在90%以上；
- 经济效益巨大。一般延寿所需花费为：可行性论证、答辩的费用大约2000万美元，加上设备、系统的改造（如I&C等），平均费用在2-3亿美元，但可以延长20年的使用期，还提高了功率，比新建任何电厂的经济效益好得多；
- 在竞争的市场环境下，只要核电厂没有重大缺陷，绝大部分业主都会提出申请，NRC也支持，这个进程将在2010年前加速进行。

### （2）进一步提高可用率，缩短大修工期

1997年以来，美国核电机组大修工期从平均65天降到39天；西屋公司曾将类似大亚湾的机组标准大修工期从26天降到19天；但目前Exel on公司最好的机组大修工期仅为15天，他们认为还可以低，并争取2004年达到堆群平均15天。

大修工期的缩短主要归功于业主与承包商间公开坦诚的合作，实现了更精确计划的制定，管理方法更先进、更有效等，而公司兼并起了重要作用。

### (3) 继续挖潜，提高电厂出力

过去10年，美国103台机组共挖潜增加出力（包括提高可用率），等于新建22台百万千瓦级核电机组，预计今后若全部机组进行类似的挖潜还可增加800~1000万kW的出力。

Exelon已定下计划到2004年，在17台机组中再挖潜110万kW，并对每台机组作了分析，制定了相应的挖潜计划。

这种挖潜增加的功率，无论是从基建成本和运行生产成本来看，都低于新建的联合循环电厂和燃煤电厂的成本，因此受到广泛的欢迎。

### (4) 对I&C进行数字化改造

这是由于原来的模拟量和继电器为基础的I&C系统经过多年运行之后，已暴露出大量的数据漂移（不稳定）、备件供应难、维修量大等严重问题，甚至影响到核电厂的安全可靠运行。而新一代数字化的I&C已成熟，有必要、也有可能进行改造。当前的问题在于如何在维持电厂运行的条件下，仅利用大修时间对电厂进行有计划、有步骤的单系统改造，这样整个改造周期可能要跨八个年头，给运营者带来很多不便和一定的风险。但由于I&C数字化改造的确给核电厂的运行带来很多好处，加上西门子的I&C部门在常规电厂改造中已积累了丰富的经验，并拿出一系列的对策和承诺，大大减轻了运营者的风险，因此，核电厂的I&C数字化改造已在美国兴起，并将会兴旺起来。西屋公司已看到此商机，因此正在急起直追，最近取得瑞典Ringshals电厂的全面改造合约，拟2004年搞完，以取得全面经验，与西门子进行竞争。

## 2.5 美国政府大力支持核电，并列为国策

美国自上世纪70年代核电高峰期后，尤其是出了三哩岛事件之后，核电一直成为有争议的话题，无论民意、政党和主流媒体都逐步走向反对核电，直至2000年布什与戈尔竞选时，反核仍是他们共同的纲领。但到2001年5月，副总统切尼领导的能源政策小组正式公布新一届政府的能源政策时，却将核电作为“美国能源多元结构中有前途的一部分”，第一次提议“将核电作为一种重要的、长期的解决能源的途径”，并将支持核电正式列入美国的能源政策。“9·11”事件发生之后，尽管反核人士提出了核电站防恐及其后果问题，美国政府表示，除要求加强防卫措施外，发展核电政策不变。

布什政府除支持老核电厂延寿、挖潜、开展下一代（第四代）核电研究并责成NRC为新建核电厂开绿灯、创条件外，最近美国国会不顾内华达州州长及部分民众的反对，表决通过了能源部在该州尤卡山建立乏燃料中间贮存库的报告；议会也正式批准能源部的发展核能预算计划，并给NRC、DOE的核电新项目开发及后处理科研项目以经费支持。

对布什政府这个180度的大转变，一般的评论认为主要基于以下原因：

(1) 从核电本身来看，近年来核电厂的性能及电价的可竞争性大大提高，核电的确可以成为一种经济的、环保的、有发展前途的能源。

(2) 从美国的能源供应安全来看，尽管美国一次能源资源不少，但石油和天然气价格受中东形势的影响，价格不稳定，近年有上升趋势。在“反恐”及美国处于反恐战争状态下，要确保能源供应安全，需考虑减少对外部，尤其是中东石油的依赖。

(3) 从环境影响来看，克林顿政府已答应签署“CO<sub>2</sub>减排”、“防止世界气候变暖”的国际公约，但布什政府由于内部的困难而拒签了，因而受到国际舆论的谴责。美国是世界CO<sub>2</sub>排放量最大的国家，随着能源需求的增长，如何应对环境的需求也是一个重要因素。

当然，美国地区性的电力短缺、天然气价格上涨和电力市场上价格高升等也是促使布什政府调整看法的近因。

据NEI制订的Vision 2020计划，按1.8%左右的电力需求年增长率考虑，美国到2020年共需新建4亿kW装机才能取代退役机组，并适应新的经济增长需求。其中，需要新建约5000万kW的核电新机组才可能维持不排放CO<sub>2</sub>的机组占总装机的30%左右，即保持现有水平（远未达到国际公约要求的比1995年总排量减排CO<sub>2</sub> 5%的要求，其实总排量是增加了）。

综上所述，美国核电复兴是实实在在的，是深思熟虑的，是得到美国上上下下的支持的。预计在运电厂的延寿，并在运行业绩上再创新绩，将在2010年前完成。但新建核电站问题，由于现有机组（包括

第三代的NRC已发许可证的机组)还贷款的电价仍缺乏竞争力(第三代“A”字头的机组,因为要达到URD要求,其电价均达到4.3美分/kWh左右,而市场与煤、气电的竞争价格,目前仅为3-3.5美分/kWh),因此美国业主们迟迟未下决心建造。为此,美国能源部已正式启动第四代核电的研制,除要求更安全、核废物处置更严格外,第一位的要求,也是成败的关键,是要更经济,要有市场竞争力(一般认为包括还贷期的全成本电价,必须在3美分/kWh以下)。但目前仅是方案阶段,预计要20年以上才能工业应用。为适应这近20多年的过渡期要求(最少有4000-5000万kW的市场),美国各承包商已开始新一轮的竞争。目前NRC为了适应此新形势也一再明确:“URD要求反映了业主对下一代核电的一种良好的愿望”;“但NRC无意将URD要求列入法规”;“对新建核电项目审查基本上仍按现行法规10CFR Part52进行”。当前已正式向NRC提出申请、NRC已准备开始审查设计许可证的共有6种新堆型,它们是:西屋公司的AP-1000和IRIS,南非的球床模块反应堆(PBMR),GE公司的SBWR和加拿大的ACR-700。这些公司推出的堆型为适应市场要求,均将单位基础造价定位在1000-1200美元/kW左右,且争取在2010-2012年间开始建成第一台,2013-2015年左右大批量生产供应。以西屋公司的AP-1000为例,将大批量制造的基础价(首批8台后的价格)定位在1000美元/kW左右(AP-1000前8台平均基础价为1100美元/kW,而第九台起可降价到1000美元/kW左右),以争取市场。按西屋公司的预测,在2004年底可以取得AP-1000的设计许可证。已有三家公司正申请厂址的预审,若抓紧综合运营执照(Combined operation license)申请,可望于2005年开工,2010年前建成。西屋公司现正与多家业主洽商,共同出资兴建头8台机组,并分摊研发费用,若此计划顺利执行,则美国新的核电站兴建热潮将从2010年开始。而等到第四代先进机组在2020-2025年研制成功时,由于上世纪70年代的第二代核电机组将在2030前后退役,需大批取代,因此,可预测2030年后将是美国新一代核电建设的新高潮。随着第四代核电机组的成熟,世界将迎来新一轮核电建设的高潮。

### 3 美国核电复兴引发的思考

#### 3.1 既安全又经济,是发展核电的前提

美国核电的复兴是真实的,也是有基础的,它的基础就在于核电实现了既安全又经济的运行。

安全方面。经过几十年来全世界超过一万个堆年的运行,就西方标准机组而言,仅出现过三哩岛一次堆芯熔化的人因事故(前苏联切尔诺贝利是石墨水冷堆,事故时石墨燃烧,又没有安全壳,才造成如此灾难性事故,不符合目前世界水堆的安全标准,是一个例外)。由于有安全壳,事故影响范围很小,再加上近20年来不间断的核安全技术改进,强化了管理,提高了核安全文化意识,各种人因事故及设备故障已大大减少。因此,核电站的安全虽随着技术的发展仍将不断提升,但国际上行业内公认在目前已有的标准、规范、技术及管理条件下,从已达到的运行业绩看来,核安全问题已不是行内专业人士主要关注的问题。

经济方面。美国这近10年来,特别是近5年来在运营电站方面已取得的新进展,关键在于核电竞争力上的突破,平均成本电价从1990年的3美分/kWh降到1999年的1.83美分/kWh。不仅如此,核电的经济优势还可向两个方向拓展:(1)若与先进的前25名电站(平均电价仅1.27美分/kWh)比,尚有很大的潜力;(2)只要投入200-300美元/kW,可以延寿20年,由于折旧已完,且退役等费用也已提完,电价还可以进一步下降。这一切,都充分展示了核电不仅是安全可靠的能源,而且是有经济竞争力的能源,彻底改变了10年前人们对核电的种种看法和责难。

以美国弗吉尼亚州由Domi nion公司运营的North Anna-2机组为例,它的堆热功率为2893 MWt,西屋压水堆,三环路,1980年投运,在世界2000年前50台可用率最高的机组中排名第二(毛可用率101.20%),总发电量为84.17亿kWh(亦可折算为:电功率1000 MWe,可用率:96.1%)。更有意思的是,据西屋公司介绍,此堆在美国西屋公司向法国转让技术时作为法国Gravelines电站的参考电站,而大亚湾核电站的参考电站正是Gravelines电站,因此North Anna也可视为大亚湾核电站的参考电站。与North Anna相比,我们不难看出,同属第二代改进型的大亚湾核电站,无论在安全上和经济上都还有不少潜力可以进一步挖掘出来。

在新堆研发方面,美国已改变了20年前的老思路,即过于强调追求安全性、先进性。据URD的理想概念开发出来的第三代先进堆,由于经济上缺乏竞争力,在美国没有一个业主愿意选用,等于被市场摒弃掉了。而由美国能源部主持开发的第四代堆,已将目标定位在“既经济又安全”上,由DOE主持的研讨会经认真研究,对第四代核电建设的目标定位为:“设计一种或多种核能系统,在电价具有竞争力的同时,还令人满意地解决了核能安全、废物、核扩散以及所在国家的公众接受性等问题,能取得执照并建造运行”。笔者认为,美国这种新思路是对的,在电力管制解除的市场竞争环境下,“没有安全性,没有核电”,“没有经济性,也没有核电”。因此美国工业界和政府相信,按照新的理念开发出的第四代,应同时能满足这两方面的要求,而其开发中最主要的难点,不在于安全性上,而在于能与燃气轮机联合循环机组的电价相比,投产的前几年就可以赢利,投资风险减到最小,使投资者有信心投资。目前,美国的DOE、NEI、EPRI、业主联盟、供应商、各大学院校正一起联手组织方案研究和专题攻关。最近,在美国主导下的GIF(第四代核能开发国际论坛)的10个成员国已初选了6种堆型为第四代核能开发重点项目,其中有三个是快堆(气冷、铅冷、钠冷),一个是熔盐堆,一个是非常高温堆,一个是超临界水堆,它们在工艺上和参数上都较传统堆型作了重大的突破,以达到既安全、又经济,又可消除公众担忧的多方面问题。但从科研到批量定型生产,一般都要20多年的时间,加上美国要求能在2030年第二代核电厂大批退役之前投入应用即可。因此,可以预期,比第二代核电站更安全、更经济的第四代原型核电站是有

可能在2025年左右建成投运、并在2030年左右达到工业推广的。

纵观美国核电复兴的进程，可以归结到一点，即：没有经济性，就没有市场，就不可能有核电的发展。美国正在运行的第二代核电机组由于在安全可靠运行的前提下采取了多项措施，将潜能全部挖掘出来，经济性上得到突破，电价再次低于煤电，才有延寿、提功率、I&C改造等发展高潮的到来。而花了20年时间，用了几十亿美元开发的第三代核电机组，尽管安全性很高（堆芯熔化概率为10<sup>-7</sup>/堆年），技术很先进，但由于太贵了，竟然被市场摒弃掉。同样的原因，美国第四代核电的开发目标就定在“更经济”、“更安全”上。美国核电发展走过的兴-衰-复兴的过程，及在市场经济条件下得出的新结论，应引起我们的特别关注。

### 3.2 世界核电发展的趋势及机遇

通过这段时间的调查看来，尽管美国核电自上世纪80年代中开始停建了近20年，但在技术、运营和开发上，美国核电仍是在世界上领先和引导潮流的。因此核电在美国的复兴必然引起世界性的反响。近几个月来，芬兰议会经过多年争议已批准兴建第五台核电机组；意大利政府表示要重新考虑被全民表决否定了的核电政策；曾决定限期关闭核电站的瑞典政府也表示同意核电站延寿；而法、日、韩、西等国均已与美国有关单位签订协议，就新一代机组（包括AP-1000）的设计和研制进行合作；俄国和南非都正在加紧研发新一代的核电机组。可以预见，世界各国将重新评估核电站的安全性和经济性，并给予核电在能源结构中新的定位。2010年前，随着美国老核电厂延寿、技术改造、增加出力等高潮的出现，世界各国也必将仿效，兴起相应高潮；在2025—2030年左右，当美国建成更安全更经济的第四代核电机组并进行工业推广时，各国也将根据国情作出相应的反应，可以预见，2030年后，新的一次兴建核电的高潮将会在世界范围内形成。

当前，由于美国市场在2020年有新建4000万kW核电的庞大市场，各国供应商都在考虑，以最快速度推出满足现行安全规范标准且又经济可行的过渡型机组来抢占市场，填补2025—2030年第四代核电出台并成熟前的近20多年的空白。以美国为例，美国NRC最近已正式将南非研制的球床模块反应堆（PBMR）、GA公司研制的燃气轮机模块化氦冷反应堆、西屋公司的AP-1000非能动型反应堆、西屋公司的IRIS反应堆、GE的先进沸水堆以及加拿大的改进型轻水冷却重水慢化的ACR-700等6种堆型正式列入其先进堆的研究审批名单。西屋公司正与几个美国电力公司研究建设第一批8台AP-1000的计划，准备2005年开始建设。2010年前建成第一台，2014年建成第一批共8台AP-1000。按此计划，预计这一批先进堆（有人称为第三代+）可能在2013—2014年左右成熟并工业规模推广，建设热潮将首先从美国兴起，预计世界各国将据国情作出不同的反应。从目前已有的信息看来，以核大国法国和德国为代表的西欧，由于工业转型滞后，经济增长缓慢，短期电力市场仍处于饱和状态，加上从经济上看，老厂改造与延寿要比新建便宜得多，所以不会优先兴建新电厂。此外法德联手开发的EPR，从技术上与经济上看，与美国“A”字头的第三代相差不多，即使法国今年下决心兴建，预计要到2010年左右才能建成，且欧洲其它国家跟随选建的几率不大。因此，德法两国在2015—2020年前不可能有大的作为，继续保持“沉默的欧洲”机会较大。在欧洲，只有英国与西班牙两个是例外，一方面这两国经济增长速度较快，有电力市场需求；另一方面，他们没有原来的核电工业的负担（英国的CO<sub>2</sub>气冷堆时代已结束，西班牙之核电工业尚未定型），因此追随美国兴建第三代+或第四代核电站的可能性较大。亚洲的日、韩两国已定型的以美国第三代机组作为国产化、标准化的系列，预计到2015—2020年前也难以再改型。纵观世界各核电强国，除美国外，其它如法、德、日、韩在2020年前均难以急速转型，按工业规模来搞第三代+或第四代新技术（搞一点科研开发是有可能的），因此给中国正在新兴的核工业产业留下了机遇。若中国核电工业把握得好，充分利用这次美国带头开始核电复兴和核技术转型发展的契机和充分利用国家已决心大规模发展中国核电产业的机遇，不失时机地看准目标，组织策划好，并实施后追赶战略，就能实现跨越式发展。

这是世界核电发展给予中国的一次良好的机遇，我们应珍惜这次良好的发展机遇。

## 4 对中国核电发展的几点意见和建议

### 4.1 将核电作为面向新世纪可持续发展能源战略的重要组成列入国策

美国的能源资源远丰富于我国，美国人对“核”也曾有过恐惧心理，且远大于我们，美国在发展核电过程中有得有失，酸甜苦辣各种滋味都已尝过，比我们更有经验，但经过近20年的徘徊，最终选择了发展核电作为能源发展的国策，即使在“9·11”恐怖事件之后亦毫不动摇，中东危机之后更显正确。这里启示应是很明显的。

反观我国，仅面对2020年“奔小康”的要求就已深感能源短缺的压力，已不得不大量依靠进口“油”和“气”。而要面对2050年的现代化目标，我们将面临美国当前所面临的一大堆问题：能源供应安全问题、环境压力问题、CO<sub>2</sub>减排问题……等等，在目前动荡的世界大环境下，将比美国当前的形势更为困难得多。我们更应“未雨绸缪”，当机立断，将发展“核电”这唯一可作为大规模工业应用的替代能源作为我国可持续发展的能源战略的重要组成列入国策，认真研究，制订出长远发展规划，付诸实施。当前国家发展与改革委员会已有一个初步的到2020年的规划设想，核电各界同行更应同心协力，献计献策，将它进一步具体化，并着手策划更长远的规划，使发展核电成为我国能源可持续发展战略中一个不可分割的重要组成部分。

## 4.2 实事求是，从现有基础起步；抓住机遇，实现跨越式发展

我国核电如何起步呢？从世界各国情况看，美国目前无论在运行还是新项目开发上都是领导世界潮流的。从美国复兴的实践来看，第二代核电机组虽技术上较落后，但安全仍达标，只要管理提升，安全、经济的潜力仍在，可以进一步挖掘；第三代虽更先进、更安全，但经济上不可取，将淘汰出局；第四代将更经济、更安全，并兼顾了方方面面的要求，但需20多年后才能开发出来并工业应用；第三代+，在现有安全法规的框架内，充分利用已有的堆型和技术作适当的修改，以提高经济竞争力，弥补第三代机组缺陷，这些堆型是第四代前的过渡堆型，但估计也要到2013—2015年左右才能成熟，并工业大规模应用。

结合我国国情，当前我国核电虽已搞了20年，但由于种种原因，目前，即使按第二代机组的技术要求尚未能建立起完整的自主的核电工业体系，仍需填补补齐、配套成龙。针对这个情况，笔者建议：①指导方针上，将安全、技术与经济的关系摆对，不去重复欧美失败的老路。“A”字头的第三代机组和欧洲EPR，已不宜再搞了，我们不能再走错步了。②面对国内的现实，还是先从第二代核电改进型的压水堆三环路百万千瓦级起步。通过4-6台机组建设，适当引进技术、管理，并大力培育核安全文化，理顺生产关系，将我国核工业体系完整地建立起来，形成一个稳固的平台。同时，平行地跟踪，并通过国际合作掌握第三代+机组的技术，争取在2015年左右建成中国第一台第三代+机组，并不失时机地通过国际合作，在2020年左右将第三代+系列化、标准化的同时，掌握第四代机组的技术，以便到2030年国际上新一轮核电建设高潮来临时，我们已准备好，一次到位跃上高端，实现中国核电产业的跨越式发展，充分利用我国工业成本低的优势与各核电强国分享世界核电市场。这个构思是现实的，可操作的。

其它的路子：如有人建议一步达到AP-1000，要这样做的话，首先，除非我们参建第一批（国家恐不同意），否则最少要等到2012年才能开始建，这十年过去了，对我国核工业的队伍和初建起来的工业基础都是不利的，恐会断档；其次，第三代+已有6种堆型在竞争，美国业主至今都未作表态，准备通过竞争来选优、压价，我们也不宜早定AP-1000；第三，第四代的6种方案刚提出来，目前也难看出眉目，若再等上8-10年，那时第四代的趋势就较清楚了，对我们下一步选第三代+的堆型及考虑第四代的过渡都会更清晰些。

至于第二代机组的经济竞争性问题，这是个很现实的问题，笔者建议：除进一步推进自主化、当地化，最大限度降低单位造价外，我们应将美国第二代机组的运行、维修的技术和管理经验学到手，将大修周期压缩到15天左右，即将可用率提高到95%。同时，还可进一步压缩运行与维修费用，从而进一步降低电价，再加上国家政策上的扶持，使电价可与沿海燃气轮机联合循环的电价或脱硫、除尘的进口煤电电价相竞争，这样第二代机组的竞争力还是可以适应市场要求的。一旦中国核工业体系建立了，再引入与世界同行联合开发更经济的第三代+及第四代技术，核电自主化的过渡困难期过去了，核电就可以放开来与各种电源进行公平竞争，那时中国核电大发展的形势一定蒸蒸日上，而中国核电离走出国门、角逐世界市场的日子也不远了。

这是我们这一代搞核电的同行们的一个梦！我们希望能在中国核电大发展的春天里圆这个梦！