

核能对我国未来减排温室气体的作用及投资评价

The Role of Nuclear Energy in Reducing GHG in the Future of China and Its Investment Evaluation

张阿玲 何建坤 徐 青

(清华大学核能技术设计研究院 北京 100084)

提要 本文通过能源系统分析模型,对我国未来能源系统减排 CO₂ 的技术选择、投资需求、能源供应结构及核能和可再生能源的作用进行了分析,并以常规煤电站作为参考,对核能减排 CO₂ 的附加比投资进行了评价。文中,在评价我国远期能源供求形势的基础上,分析了核能在未来能源系统向“与环境相宜的洁净能源体系”过渡过程中的作用。

能源生产与消费所产生的 CO₂ 排放,是人类社会经济活动中最主要的温室气体排放源,而能源又是社会经济持续发展必须的物质基础。在全球环境意识日益增强的今天,对 CO₂ 等温室气体排放引起的全球气候变暖问题越来越受到关注。我国发展核能不仅是为了缓解能源供应不足,也是减少 CO₂ 排放的一项重要技术对策。

从能源供需形势看发展核能的必要

影响未来能源需求的因素很多,主要有经济发展、人口增长、国民经济产业结构变化、科技进步以及能源价格等。我们采用能源系统分析模型,对未来的能源系统发展和结构进行了评价。

能源系统分析模型主要由能源需求预测模型和能源系统技术选择模型两个相互联结的模型构成。

能源需求预测模型采用的是分部门能源需求预测方法。根据我国现有的统计口径,将经济部门综合成六个:农业、工业、交通,其他行业、服务、居民生活。每个部门的终端能源需求均概括地由活动水平(即行业附加值、产品产量、交通车辆保有量、人口等社会经济指标)和能源消费强度(即附加值单耗、产品单耗、人均能源消费水平等指标)表明。

能源系统技术选择模型以能源网络图为基础。能源网络图包括了能源系统中各种能源开采、转换及分配环节,也包括了与能源需求模型相适应的终端用能环节。对每个环节,不仅考虑了现有各种技

术,还考虑了未来可能发展或引进的各种新型技术。该模型为动态线性最优化模型,以 1990 年为基年,每 10 年为一规划期,最终目标年为 2050 年。模型区分了能源工艺技术环节的能源流量变量和生产容量变量,能源流量变量表现为各周期内能源流量的各种平衡及制约因素(包括资源约束,最终用能约束,能流量平衡约束,进出口约束等),而生产容量变量则表现前一周期生产容量对后一周期的转移、更新、退役、新建等延续关系,并反映跨越两个或更长周期的能源项目建设期内投资需求关系,该类约束是模型中最主要的周期间关联约束。

根据未来社会经济发展的构想,我国人口平均年递增 0.452%,到 2050 年人口将达 14.98 亿;国民生产总值也将从 1990 年的 17 686 亿元,增到 2050 年的 245 900 亿元。根据对未来能源的开发利用和需求,我们是选定一个基准方案以及一个强化节能且在能源替代条件下的政策减排方案。方案的基本情况见表 1。

目前我国能源的消费结构为:一次能源中煤炭约占 75%,石油和天然气占 20%,水电占 5%。这种能源结构的能源利用率低,并造成了严重的环境污染,加剧了交通运输紧张状态。

能源供应预测表明,我国石油产量的高峰期大体出现在 2020~2030 年,最高年产量约 2.5~3.0 亿吨,从 2030 年后产量将逐渐下降,到 2050 年年产量将不足 2 亿吨。天然气将有较大发展潜力,产量高峰期大体出现在 2050 年,届时产量可望达 1 700 亿立方米。因此,下世纪中叶我国石油和天然

表1 两方案能源需求概况

方案		1990年	2000年	2020年	2050年
基准方案	一次能源总需求 (百万吨标煤)	987	1490.6	2334.6	3681.9
	电力需求 (亿千瓦时)	6212	11619	26456	48142
	单位 GNP 能耗 (千克标煤/元)	0.56	0.40	0.24	0.15
	GNP 增长率 (%/年)	8.0	5.0	3.0	
	能源消费增长率 (%/年)	4.20	2.48	1.39	
	电力消费增长率 (%/年)	6.43	4.20	2.02	
	能源消费弹性系数	0.53	0.50	0.46	
	电力消费弹性系数	0.80	0.84	0.67	
	年节能率(%)	3.55	2.40	1.55	
政策减排方案	一次能源总需求 (百万吨标煤)	987	1464.0	2218.3	3157.4
	电力需求 (亿千瓦时)	6230	11486	25318	45082
	单位 GNP 能耗 (千克标煤/元)	0.56	0.38	0.22	0.13
	GNP 增长率 (%/年)	8.0	5.0	3.0	
	能源消费增长率 (%/年)	4.02	2.10	1.18	
	电力消费增长率 (%/年)	6.31	4.03	1.94	
	能源消费弹性系数	0.50	0.42	0.39	
	电力消费弹性系数	0.79	0.80	0.65	
	年节能率(%)	3.80	2.70	1.74	

* GNP 为国民生产总值(模型中计算应采用 GDP 国内生产总值)

气供应可望达 4.5~5 亿吨标煤。我国可开发利用的水力资源约为 3.8 亿千瓦。目前开发利用程度很低,仅 0.4 亿千瓦。2050 年前后,除西藏等边远地区外,大量水力资源将开发利用,总装机容量将达 2.5 亿千瓦左右,折合一次能源 3 亿吨标煤。为了保护环境,下世纪对风能、太阳能、地热能、潮汐能等新能源的开发利用将有突破性进展。但新能源系统从研究开发到形成独立的工业体系往往要经历几十年或更长的时间,目前距大规模商业推广尚远。到 2050 年左右,新能源对我国一次能源构成不会产生显著影响。

还应指出,我国煤炭资源虽然丰富,开发潜力很大,但是大规模开发和使用会受到环境和运输等多种因素的严重制约。我国东部 18 个省市能源消费集中而资源严重不足。下世纪东部地区的煤炭需求将更大,届时本地原煤产量预计最多为 10 亿吨,其余依靠晋陕蒙地区供应,由于外运通道限制,该

区的外调量很难超过 10 亿吨,因此对东部地区的煤炭供应量最高只能达 20 亿吨。到 2050 年,晋陕蒙地区的煤炭需求约为 4~5 亿吨。西南地区的煤炭资源则主要集中在贵州省,运输困难,生产规模不会超过 3 亿吨。新甘宁青地区虽然资源开发潜力很大,由于运输困难,下世纪中叶主要立足本地区自产自销,产量约为 2.5~3 亿吨。综上所述,2050 年我国煤炭总供应量上限只有 30 亿吨,折标准煤为 21.4 亿吨。

纵观我国能源资源状况及供应形势,2050 年国内化石燃料资源供应总量很难超过 30 亿吨标煤,从解决沿海地区能源供应问题以及以煤炭为主的能源结构带来的一系列问题来看,发展核能势在必行。

减少 CO₂ 排放的技术选择

为减少 CO₂ 排放,除推广终端节能技术,在满足相同能源服务的前提下,减少最终能源消费之外,还依赖于能源系统减排 CO₂ 的技术选择。一是改进能源生产和转换技术,以提高能源利用效率,例如发展煤气化联合循环发电,加压流化床,燃料电池等新型发电技术,使发电效率由以前的 31.5% 提高到 45% 左右;二是促进能源替代,即以核能、可再生能源等不含碳的非化石燃料和含碳量少的天然气取代煤炭。

根据模型计算,到 2050 年我国一次能源以煤炭为主的供应格局将有很大改善。届时国内石油产量不会超过 2 亿吨,需进口 2~2.5 亿吨,而天然气产量可望达到 1 500~1 700 亿立方米,仍需少量进口。在基准方案和政策减排方案中石油需求量测算分别为 5.99 亿吨和 5.22 亿吨标煤,而天然气需求量则分别为 2.34 亿吨和 2.40 亿吨标煤。石油消费在一次能源中的比例仍与 1990 年相当,占 15~20%,而天然气则从 1990 年的 2.1% 上升到 6.4~7.6%。两种方案测算表明,1990 年水电比重为 5.1%,而新能源和核能均无商业化应用,到 2050 年水电比重上升到 7.1~9.2%,核电比重上升到 9.9~13.9%,非化石能源比例达 19.3~26.6%,一次能源总构成向多元化发展。

同样,电力消费增长速度将大于一次能源消费总量的增长速度,并向多元化方向发展。根据两方案测算,1990 年发电用一次能源在一次能源消费中比例为 25.5%,到 2050 年则将占 40.0~43.4%。1990 年,我国水电装机 0.36 亿千瓦,发电 1 267 亿千瓦时;火电装机 1.02 亿千瓦,发电 4 945 亿千瓦时;尚无核电站运行。而根据基准方案和政策减排方案测算,到 2050 年水电装机将达 2.37~2.65 亿千瓦,发电量达 8 518~9 488 亿千瓦时;火电装机

将达4.92~3.65 亿千瓦,发电量达 27 134~20 157 亿千瓦时;核电装机 2.0~2.4 亿千瓦,发电量达 11 921~14 306 亿千瓦时;新能源装机 0.2~0.4 亿千瓦,发电量达 570~1 131 亿千瓦时;电力需求总量分别达 48 142 亿千瓦时和 45 082 亿千瓦时。

到 2050 年高效新型发电技术,如煤气化联合循环、加压流化床等有了较大发展,其装机容量可达煤电总容量 65~70%,发电效率达 44~47%,而由此使煤电的平均效率达 41.3~42.2%。

由于一次能源结构改善和发电结构变化,能源消费的 CO₂ 排放强度则有较大降低,将从 1990 年每公斤标煤能源消费排放 0.63 公斤碳,在 2050 年基准方案中下降到 0.52 公斤碳,在政策减排方案中下降到 0.46 公斤碳,分别下降了 18%和 27%,和经济合作与发展组织国家 1990 年每公斤标煤能源消费排放 0.48 公斤碳的水平相当。在这些改善中

核能起着关键性作用。同时由于强化节能所导致的单位国内生产总值能源消耗的降低,使未来国内生产总值 CO₂ 的排放强度降低更快。

能源系统的投资

为了保持国民经济的持续发展,减少环境污染,在未来能源系统中将大量采用新型能源转换技术,核能将得到较大发展,这必然加大对未来能源系统的投资需求,见表 2。

能源系统投资,包括一次能源开发和转换环节的投资,能源资源勘探的投资,新增煤炭运输能力的铁路投资,新增石油、天然气输送能力的管道投资,其他燃料的运输投资,输配电投资。对核电站而言,还包括建立相应核燃料循环体系的投资。

表 2 能源系统投资分析

	1980 ~ 1990 年	1990~2000 年		2010~2020 年		2020~2050 年	
		基准 方案	政策 方案	基准 方案	政策 方案	基准 方案	政策 方案
GDP 累积(亿元)	123804	276706	276706	821343	821343	2160555	2160555
能源系统投资(亿元)	3307.6	12258.5	11993	21842	21068	31262	29068
电力系统投资(亿元)	1769.8	5732	5134	10495	10705	17818	18056
核能系统投资(亿元)	~	312.0	312.0	2159.6	2879.5	5106.3	6382.8
能源投资占 GDP 比重(%)	2.67	4.43	4.33	2.66	2.57	1.45	1.35
电力系统占能源投资比重(%)	53.5	46.8	42.9	48.0	50.81	57.0	62.1
电力系统投资占 GDP 比重(%)	1.43	2.07	1.86	1.28	1.31	0.87	0.84
核能占能源投资比重(%)	~	2.55	2.60	9.89	13.67	16.33	21.96

模型计算表明,未来我国能源建设对投资需求很大。特别是在本世纪最后几年内,由于国民生产总值保持 8%以上的年增长率,为了扭转目前能源短缺局面,尽管年节能率维持高于前十年的 3.6%,但能源系统的投资占国内生产总值的比例仍然将继续前十年的上升趋势。随着国内生产总值增长速度放慢以及能源消费弹性系数进一步降低,能源系统投资占国内生产总值的比重会逐渐降低。由于能源资源开采难度增加,其比投资为上升趋势,所以电力系统投资占能源系统投资的比重,一度呈下降趋势,但随着比投资高的新型发电技术大规模应用,电力系统投资占能源系统投资比重又再度增高。另外,尽管今后十年电力系统投资在能源系统总投资中的比重下降,但电力投资在整个国内生产总值中的比例,仍将上升,进入下世纪后才逐渐降低,其中核能在能源系统投资中的比重在基准方案和政策减排方案中分别高达 16.33%和 21.96%。

与常规电站比较,煤气化联合循环发电是通过

提高发电效率来减少煤炭的消耗,而核电站则是通过替代化石燃料达到减排 CO₂。在满足相同电力供应的情况下,对三种供电技术减排 CO₂ 效果和投资分析评价表明,我国一般的节能设施在工业部门的比投资约为 500~700 元/吨标煤,折合减排 CO₂ 的附加比投资为 690~965 元/吨碳,与联合循环发电减排 CO₂ 的附加比投资 688 元/吨碳相当,低於核能替代减排 CO₂ 的比投资 1 447 元/吨碳,见表 3。

从表中的投资数据分析,似乎提高终端利用效率和采用洁净煤技术具有一定的优势。但是节能的潜力是有限的,尽管采取了成功的节约能源措施,提高了利用效率并加强了需求方管理,但是持续的经济发展和国际社会对温室气体排放的关注都要求选择更具有竞争力的、可行的发电方式。而核电则是技术上和经济上都可能在中期大规模发展的可替代能源。1992 年美国能源了解委员会对煤、气、核电的发电费用进行了详细分析研究,在比较了先进设计的标准化核电厂、低排放的燃煤电厂、

煤气化联合循环,电厂和燃气联合循环电厂的发电费用(包括投资费用、中间更换费、运行维修费、燃料费、退役费)和电厂规模、建造时间、寿命、运行特

表 3 减排 CO₂ 技术的经济比较
(以 1990 年不变价计算)

技术类别	常规煤 电站	煤气化联合 循环电站	核电站
1. 单机容量(兆瓦)	300	300	300
2. 发电效率(%)	36	44	33
3. 年运行时数(小时)	5500	5500	6500
4. 电站比投资(元/千瓦)	2875	3260	5000
	(含脱硫)	(含脱硫)	
5. 输配电比投资(元/千瓦)	550	550	650
6. 相应煤炭开采运输或核 燃料循环比投资(元/千瓦)	1183	968	1500
与常规电站比较:			
7. 年节约或替代煤炭量(公斤标煤/千 瓦)		341	2218
8. 年减排 CO ₂ 量(公斤一碳/千瓦)		247	1608
9. 年节约煤炭开采运输投资(元/千瓦)		215	1398
10. 电站比投资增加(元/千瓦)		385	2125
11. 供电系统高出的比投资(元/千瓦)		170	2327
12. 减排 CO ₂ 附加投资(元/吨一碳)		688	1447
13. 附加比投资的年回收成本 (元/吨一碳)(10%贴现率 35 年寿命)		71.4	150.0

性等因素后指出,先进的标准化核电厂在经济上将可同其他类型电厂进行竞争,核电厂是满足未来电力需求费用最低的选择(600 兆瓦机组的供电成本,每千瓦时核电厂是 4.5 美分,先进煤粉电厂是 4.8 美分,煤气化联合循环发电是 5.0 美分,燃气联合循环发电是 4.3 美分),而且采用先进设计后核电厂建造、运行、维修更加简单了。这样,为减少 CO₂ 排放问题的附加投资就得到解决。为了保持能源供应和减排 CO₂,当选择核能为能源供应替代方案时,就不需要增加为减排 CO₂ 所附加的投资。

核能是向未来清洁
能源体系过渡的重要支柱

当前全球环境问题受到国际社会的密切关注。化石能源的开发利用是造成大气污染、酸雨以及温室气体排放等环境问题的最主要因素之一。目前每年全球煤炭消费量为 32 亿吨标煤,我国到下世界中叶,预计每年能源消费量高达 42~45 亿吨标煤,如果维持目前以煤炭为主的能源结构,对环境的影响将使人们无法承受。

从我国未来能源资源的开发前景来看,下世纪中叶,液态燃料的需求量将比开采供应量高出一

倍。为减少对石油进口的依赖,我国应尽早研究或引进煤的液化技术以及气态燃料或电力对液态燃料的替代技术。利用核能作为能源政策支柱之一,除了可以减少燃烧化石燃料带来的污染外,还可提供大量高温工艺热用于煤炭的气化及液化,成为液态燃料短缺的补充手段,因此核能将成为提供流态燃料转换技术的可行途径。

上面我们已分析过我国东部沿海及东北三省能源短缺,在近期内也不可能根本解决经济迅速发展所带来的煤炭运输困难和大量排放污染的问题,因此发展核电及核供热手段将成为东部地区弥补能源供应缺口,提高环境质量,提高人民生活质量,保证经济持续发展的手段。

长远解决能源与环境问题的根本出路在于建立“与环境相宜的清洁能源体系”。为了我国持续发展的要求,合理地利用各种资源,保护生态环境,人们希望资源开发投资和技术开发方向以及相应的组织、政策都与 2050 年的“无碳经济”相协调,发展一个以含碳少的燃料和非化石能源替代煤炭的能源体系,建立一个以水力、风力、太阳能、潮汐能、核能、洁净煤技术为主的新的能源体系。核能是目前唯一能大规模替代化石燃料的最实际最有经济竞争力的能源。在温室效应威胁日趋严重和全球环境意识高涨的今天,我国在新能源体系的发展战略中,对核能更应给予重视。(责任编辑 刘先曙)

科技动态

我国首次实验成功光纤孤子传输

[本刊讯] 光纤孤子传输实验最近在清华大学获得成功并通过了成果鉴定。此项研究获得了 1992 年国家自然科学基金委员会信息科学部的重点资助。光孤子是光纤数字通信中的理想光源。光纤孤子传输是实现超高速、大容量、超长距离通信的重要技术基础。近年来,许多发达国家竞相投入人力、物力、财力开展光纤孤子研究。所谓光纤孤子是光纤中的色散效应和非线性效应共同作用于光脉冲信号,使其经过长距离传输之后不产生畸变而形成的。光孤子的产生与传输在技术上具有相当大的难度。以清华大学周炳琨、高以智教授为首的研究小组经过两年的努力突破了高速调制、消除啁啾、频率锁定等一系列技术难关,于 1993 年 12 月在国内首次实现了 21 公里的光纤孤子传输。此项成果打破了我国光纤孤子研究长期徘徊于理论研究的局面。专家认为,此项成果是我国光纤传输技术的新起点,为发展我国自己的信息高速传输技术奠定了基础。

(国家自然科学基金委员会 王玉堂 李明供稿)
(责任编辑 刘先曙)