

低碳压力下中国核电产业发展及铀资源保障

姜 巍,高卫东

(济南大学资源与环境学院,济南 山东 250002)

摘 要: 发展核电是减轻我国当前碳排放压力的现实选择。通过分析世界和中国核电发展的历程、技术水平和规模,结果显示:尽管我国在 20 世纪 70 年代就开始发展核电,但是我国核电装机容量和发电总量仅占我国电力总装机容量和发电量的 1.1%和 1.9%,与发达国家仍有很大差距;在技术水平上,发达国家已经开始研发第三、第四代核反应堆,而我国正在运行和多数拟建核电站都是压水堆技术为主的二代核电技术;在空间分布上,尽管我国很多省份都有需求,但我国核电站主要集中于沿海经济发达、能源短缺地区;从铀资源基础来看,我国仍属于贫铀国。鉴于世界铀资源分布和供给十分不均衡的状况,要保障我国核电产业持续发展不仅要加大国内资源的勘探开发,同时还需加紧拓展海外市场、建立资源储备和发展快堆技术等。

关键词: 核电; 铀资源; 能源

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2011)08-0938-06

随着全球气候变暖趋势愈加严重,世界各国正试图通过各种方式达成温室气体减排协议。2009 联合国哥本哈根会议召开之前,国务院正式对外决定到 2020 年将非化石能源的比例提高到 20%,单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45%^[1],这无疑对中国能源的开发和利用提出巨大挑战。

核能,是核裂变能的简称。核能发电是指利用铀燃料进行核分裂连锁反应所产生的热,将水加热成高温高压,利用产生的水蒸气推动蒸汽轮机并带动发电机。它与火力发电极其相似,只是以核反应堆及蒸汽发生器来代替火力发电的锅炉,以核裂变能代替矿物燃料的化学能^[2]。相对于其他非化石能源,核电具有清洁、安全、高效等特点,能够大规模替代化石能源,是发展低碳经济背景下的最有效、最现实的选择。

1 世界核电发展现状

1.1 数量发展

据国际原子能机构(IAEA)和世界核能协会(WNA)统计数据,世界核电发电量经过快速增长阶段,目前正处于平稳发展时期,未来 20a 核电发展将

会迎来一个新的高峰。截至 2010 年 10 月 1 日世界共有 30 个国家拥有核电站,总装机容量为 $370.19 \times 10^9 \text{ W}$,总发电量 $2560 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$,占世界总发电量的 14%左右(图 1);正在运行的核电反应堆已达 437 座,其中:压水堆占 60%,沸水堆占 21%,重水堆占 9%,石墨堆等其它堆型占 10%,这些核电机组已累计运行超过 1 万堆·年;在建机组 55 座,总装机容量 50 855 兆 W^[3],2/3 分布在亚洲各国,亚洲是未来世界核电发展的主战场。核发电量最大的国家依次是美国、法国、日本、俄罗斯、德国、韩国、乌克兰、加拿大、英国和瑞典(图 2)。各国核电装机容量的多少,很大程度上反映了各国经济、工业和科技的综合实力和水平,就核电在国家电力系统中的地位(比重)来看,法国核电发电占其总量的 76%,成为目前世界上核电发电比例最高的国家,而中国这一比例仅为 1.9%(图 3)。

1.2 技术发展

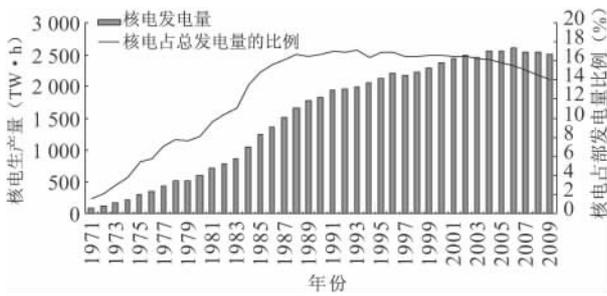
利用核能发电,在国际上已有 50 多 a 历史,根据核电发展的技术基础、安全性和经济性,核电站的发展可以划分为 4 个阶段^[4]。

第一代核电站是二十世纪五六十年代建设的原型堆和示范电站,以美国的希平港压水堆为代表的

收稿日期:2010-11-23;修回日期:2011-01-05

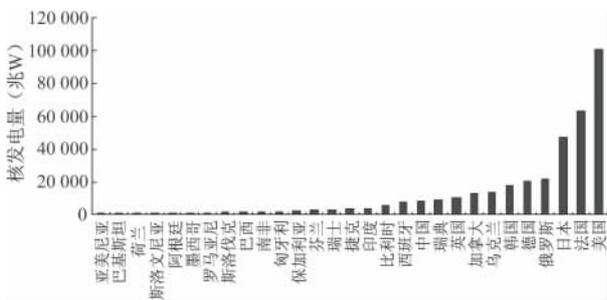
基金项目:国家自然科学基金项目“人口密集区能源流动及其综合效应分析(40801234)”;国家社科基金项目“中国能源消费增长机理及区域特征研究(11CJY039)”

作者简介:姜 巍(1977~),女,山东省文登人,副教授,博士,主要从事资源开发与区域发展方面的工作。E-mail: stu_jiangw@ujn.edu.cn



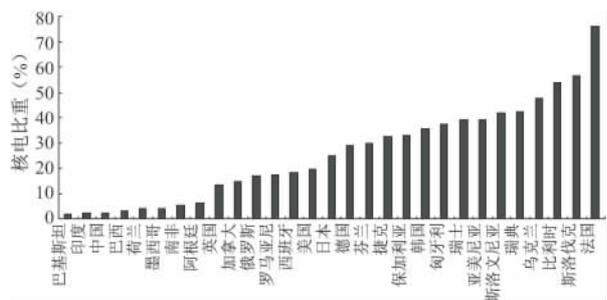
数据来源: World Nuclear Association. Nuclear Power in the World Today. <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>

图 1 世界核电发电量及占发电量的比例变化
Fig. 1 World Nuclear Electricity Production and Share of Total Electricity Production



数据来源: IAEA. Annual Report for 2009. <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>

图 2 2009 年世界各国核电发电量
Fig. 2 Different Countries Nuclear Electricity Production in 2009



数据来源: IAEA. Annual Report for 2009. <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>

图 3 2009 年核电在国家电力中所占比重
Fig. 3 Nuclear Electricity Proportion in Different Countries in 2009

轻水堆核电站。第一代核电站的核电机组运行在安全性、可靠性具有优势,但是必须以低浓铀为燃料。

第二代核电站是 20 世纪 80 年代开始推广建设的以压水堆、沸水堆、重水堆、气冷堆、石墨水堆为主

要反应器的商用核电站。第二代核电站实现了在全球范围内标准化、系列化和产业化建设。此后,各国不断发展一些新技术,对原来的二代技术进行了多方面改进,改进以后称为改进型二代技术(“二代加”),但基本类型还是属于二代技术。全世界正在运行的核电机组中,绝大多数采用的是第二代核电技术或比第二代核电技术有一定改进的“二代加”技术,正在建造中的新核电机组也以“二代加”为主。世界 13 000 多个堆年的核电运行实践证明,“二代加”核电机组的不管是安全性还是经济性都有竞争力。第二代核电站还会长时间存在,并继续作为核电的主力军发挥作用。

第三代核电站的研发开始于 1986 年的苏联切尔诺贝利核事故后。为了消除人们对核电站安全问题的担心,进一步改善核电的经济性,美国电力研究所(EPR)制定适用于下一代轻水堆核电站设计的“用户要求文件(URD)”,欧洲国家共同制定了类似的“欧洲用户要求文件(EUR)”,国际原子能机构也对其推荐的核安全法规(NUSS 系列)进行了修订补充,进一步明确了防范与缓解严重事故、提高安全性和改善人因工程等方面的要求。人们把按 URD 或 EUR 的要求开发或改进的核电机组称为第三代核电机组,典型代表是美国通用电气公司(GE)的 ABWR、美国西屋公司(WH)的 AP1000、法德联合开发的欧洲压水堆(EPR)等。

在开发第三代核电机组的同时,美国等十个国家联合提出了“第四代核电系统”的研究开发计划,第四代核能系统与前三代有本质区别,目标是“在电价具有竞争力的同时,还要令人满意地解决核安全、核废物、核扩散以及所在国家的公众接受性等问题”。2002 年在美国等 10 个国家组成的“第四代核能国际论坛”上,遴选出了 6 种第四代核电概念堆系统:钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆、超临界水冷堆、超高温气冷堆和熔盐堆。

2 中国核电产业发展

2.1 发展历程

我国核电设计工作始于 1970 年代末就已开始,但真正起步于 80 年代初。1994 年大亚湾核电站正式商运以来,相继建成了秦山 2 期、秦山 3 期、岭澳、田湾等 4 座核电站(表 1),共 11 台机组 906.8 万 kW 先后投入商业运行^[5]。

表 1 2009 年中国大陆在役核反应堆
Tab.1 China Mainland Power Reactor in Work(2009)

机组	省份	类型	单机容量	商业运行时间	运营商
大亚湾 1、2 号机组	广东	PWR	944 MWe	1994	中广核
秦山 1 号机组	浙江	PWR	279 MWe	1994.4	中核集团
秦山 2、3 号机组	浙江	PWR	610 MWe	2002,2004	中核集团
岭澳 1、2 号机组	广东	PWR	935 MWe	2002,2003	中广核
秦山 4、5 号机组	浙江	PHWR	665 MWe	2002,2003	中核集团
田湾 1、2 号机组	江苏	PWR (VVER)	1000MWe	2007	中核集团

注: PWR-压水反应堆 PHWR-压重水式核反应堆、VVER-轻水反应堆数据来源: 国家发改委.《核电中长期发展规划(2005~2020 年)》. http://nyj.ndrc.gov.cn/zywx/t20071102_170108.htm

截止到 2009 年底,我国核电装机容量和发电总量分别占我国电力总装机容量和发电量的 1.1% 和 1.9%^[6], 尽管我国核电发电量稳步上升(图 4), 但仍远远落后于核电发电占世界发电量 14% 的平均水平。目前我国有福建宁德、福建福清、广东阳江、山东海阳等在建核电站 12 座, 湖南桃花江、安徽吉阳、江西彭泽、辽宁东港、山东石岛湾等筹划建设的核电站 25 座, 预计到 2020 年, 核电运行装机容量达到 7 000 万 kW, 核电年发电量达到 2 600~2 800 亿 kW·h, 核电装机容量占全部电力装机容量的 4%。

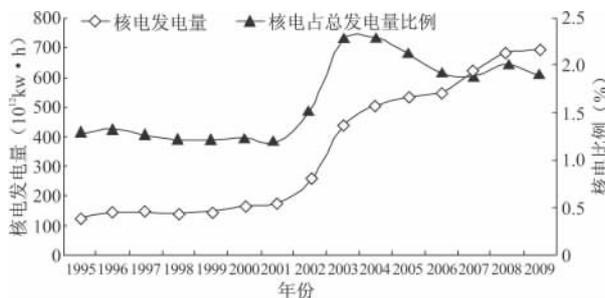


图 4 1995~2009 年中国核电发电量及占总发电量比例^[6]

Fig. 4 China Nuclear Electricity Production and Share of Total Electricity Production (1995~2009)

2.2 技术现状

中国早期的核电技术来自于法国、加拿大和俄罗斯, 在中国的本地化研发主要以法国技术为基础, 最新技术是从美国和法国引进。我国正在运行的 11 座核电机组均属第二代核电技术, 目前已经步入稳定的发展期, 在原有单一的压水堆核电站的基础上, 正积极发展重水堆、钠冷快堆、高温气冷堆等其他类型的核电站, 在建的山东石岛湾高温气冷堆核电站示范工程将成为我国第一台拥有自主知识产权的 20 万 kW 高温气冷堆商运核电站; 在核电标准化体系建设方面, 经过 30 多 a 的努力, 我国已经初步形成了一套先进反应堆设计方法和试验验证手段, 掌握了相应的核法规和国际接轨的核电标准

(ASME, RCCM); 在工程设计方面, 我国已具有自主设计运行 30 万 kW (CNP300) 和 60 万 kW (CNP600) 压水堆核电站能力, 也具备了以我为主、中外合作设计 CPR1000 的能力^[5]。

2.3 空间分布

我国早期核电建设是从沿海起步的, 因为核电厂由于各种机组冷却的需要, 必须有冷却水连续不断的供应, 其特点是流量大, 带走的热量, 因此核电站须有较大且稳定的水源以供核反应堆冷却之需, 会有旱灾或长期缺水的地方是不能建核电厂的。另外, 我国能源资源分布不平衡, 东南沿海地区离产煤地较远, 而快速的经济要求强有力的电网支撑, 因此我国早期的核电站都选择沿海地区作为厂址。

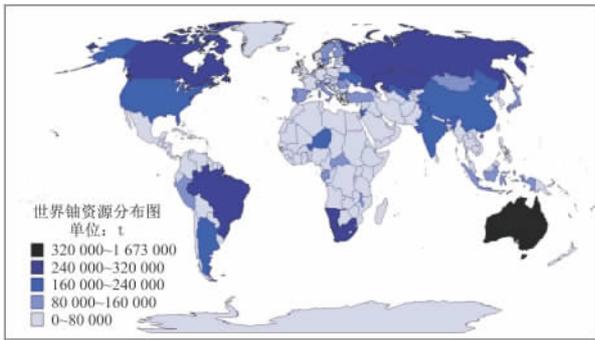
21 世纪以来, 形势发生了巨大的变化, 一些能源短缺的内陆省份在经济发展、环境保护、煤炭运输等方面的矛盾日益突出, 这些省份靠铁路运煤比海上运煤难度更大、代价更高。2009 年初南方各省发生的大范围、长时间的雪灾引发的长时间断电, 造成了严重的社会经济影响。因此, 仅依靠长途运煤和远距离输电是难以保障用电安全, 建设紧急情况下不依赖燃料运输的核电站变得很有必要。目前, 成熟的核电站设计和建造技术使得这一目的可以安全实现, 我国已能设计 160 m、2 000 m² 冷却塔, 正在开展超大型冷却塔的设计, 按照核电规范选择的厂址是能够保证核电站的安全的^[7]。符合厂址要求的四川、江西、湖南、湖北等内地区域都已提出建核电厂的要求, 并已有厂址储备。

3 铀资源供给

3.1 资源储量

天然铀供应是核电发展的基础。作为核能发电的主要燃料, 铀资源的分布十分不均衡, 从现有储量来看, 主要集中在少数几个国家。据世界核能协会

(WNA)的统计,世界已探明铀资源储量 540.9 万 t (成本低于 130 美元/kg 铀),澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、俄罗斯、南非、纳米比亚、巴西、尼日尔、美国 9 个国家世探明的铀资源量(成本低于 130 美元/kg 铀)占全球已探明铀资源总量的 85%^[8]。这其中又主要集中于澳大利亚、哈萨克斯坦、加拿大、俄罗斯 4 个国家(图 5)。与世界其他国家相比我国仍然属于贫铀国,中国的铀资源量为 17.1 万 t,其中成本低于 40 美元/kg 铀的储量约占 60%,主要分布在江西、新疆、广东、辽宁等地。



数据来源: World Information Service on Energy. Uranium Maps. <http://www.wise-uranium.org/umaps.html>

图 5 世界铀资源分布图

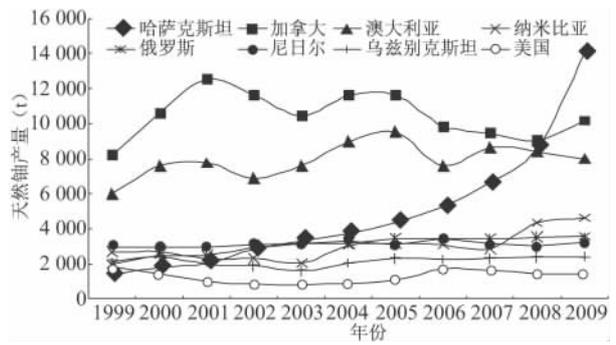
Fig. 5 World Uranium Resource Distribution Map

铀资源的生产上,WNA 的数据显示:2009 年世界共有 18 个国家开采铀矿,天然铀总产量达 50 772 t,90% 以上都集中在哈萨克斯坦、加拿大、澳大利亚等八个国家。而铀矿的开采又主要集中在 10 大矿业开采公司中,这 10 大铀矿开采公司掌控了全球近 90% 的铀资源产量,其中法国阿海珉集团、加拿大矿业能源公司和澳大利亚力拓矿业集团的铀矿产量占全球总产量的约 49%。近年来随着核电产业的迅速发展,世界主要铀资源生产国天然铀的产量都开始增加(图 6)。

尽管天然铀产量不断增加,但仍然不能满足国际市场的需求,世界铀矿山 2009 年的产量仅能满足世界核反应堆燃料需求量的 76%^[9](图 7),不足部分靠二次铀(包括乏燃料循环利用、政府和民间库存、核武器高浓缩铀的转化)供应。2009 年中国天然铀产量为 750 t,主要产于江西、新疆、陕西和辽宁,仅提供当前国内核电需求的 40%,不足部分主要从哈萨克斯坦、俄罗斯、纳米比亚和澳大利亚进口^[10]。

3.2 资源价格

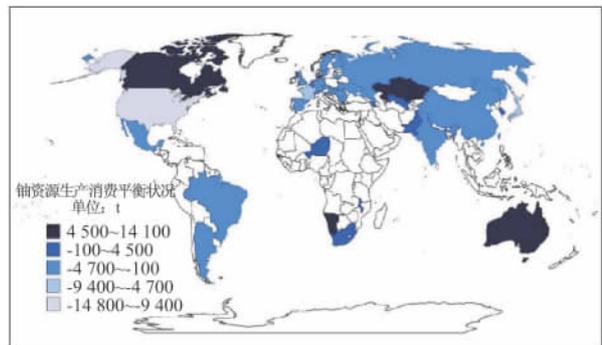
面对石油价格的不断上涨和碳减排的压力,近



数据来源: World Nuclear Association. Nuclear Power in the World Today. <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>

图 6 世界主要国家天然铀产量(1999~2009)

Fig. 6 World Main Country Uranium Production (1999~2009)



数据来源: World Information Service on Energy. Uranium Maps. <http://www.wise-uranium.org/umaps.html>

图 7 2009 年世界铀资源生产消费平衡状况

Fig. 7 World Uranium Production and Consumption Balance in 2009

年来世界很多国家都把发展核电作为解决能源短缺的主要手段,随着世界库存铀和由军用高浓铀稀释的铀逐渐减少,天然铀产需差的弥补能力逐步削弱和下降,各国之间为获取铀的权益展开激烈的竞争,供需紧张导致世界天然铀价格自 2006 年底始飞速增长(图 8)。然而铀的勘探与开发周期非常长,而且常常还面临许多限制因素,从发现铀矿到形成生产能力至少要 6a,甚至需要更长的时间^[11],这使得铀资源的供需矛盾势必长久存在。

3.3 资源保障

我国铀矿地质事业和铀矿采冶工作始于 20 世纪 50 年代,经过 50a 的勘探,我国已探明的大小铀矿床有 200 多个,经济可采、保有地质储量的铀已有相当的规模,可以满足当前已运行核电站的需要。但是,已探明矿床以中小矿床为主,且品位较低,而

目前我国在役的、在建的及拟建的核电站,都是只能利用 ^{235}U 的压水堆^[12]。按照目前的核电技术水平,每台 100 万千瓦压水堆型核反应堆首次装料需天然铀 400t,每年换料 150t,压水堆使用周期按 60a 设计^[10],对天然铀的需求量十分巨大,这给铀资源保障带来了更大的压力。



数据来源: World Nuclear Association. Uranium Markets.
<http://www.world-nuclear.org/info/inf22.html>

图 8 铀资源(U_3O_8)价格变化图

Fig. 8 Uranium Resource(U_3O_8) Price Change

4 建议与对策

(1) 科学制定勘察开发规划,加大国内资源的勘探与开发力度。

能否有效克服铀资源短缺制约,保证核燃料供给安全是我国核电产业持续稳定发展的重要因素。然而,天然铀是军民两用的敏感性资源,海外开发和天然铀贸易严格受 IAEA 的监控,并在很大程度上受不确定性的国际关系的影响,且难度大、风险高、不确定因素多^[13]。相比较而言,国内铀资源是我国核电产业发展最为稳定和安全的资源供给途径。鉴于铀资源开发周期长的特点,目前最重要的是将铀矿勘查和开发纳入国家中长期发展规划和年度计划之中,确立铀资源的勘查和开发在能源结构调整与国防安全保证中的优先地位。在今后相当长一段时间内政府应积极加以扶持,加大财政资金投入力度,促进铀矿勘查加快发展,使铀资源的勘查和开发工作处于主动状态。

(2) 积极拓展海外铀资源市场。

据 IAEA 估计,全球常规铀资源量为 1 620 万 t,如按现有消费能力可供使用 250a。从长期的天然铀安全供应角度考虑,无论从弥补国内铀资源相对不足,还是从谋求全球视野的多元化供应来考虑,都应积极开拓并获取国外铀资源,以建立多元化、国际

化的安全稳定的天然铀供应保障体系,从而确保我国核电中长期发展的天然铀供应的战略安全^[14]。我国铀资源勘探国际合作已经起步,在勘查开发海外铀资源和铀产品贸易方面有了良好开端,也积累了经验。近年来,中国核工业集团公司国核铀公司实行走出去战略,与尼日尔、纳米比亚等国家开展合作,取得探矿权或合作开发权,有的矿床正在开发。

(3) 建立铀资源储备制度。

我国将实施天然铀资源储备和保护性开采战略,建立天然铀国家战略储备和企业商用储备体系。在世界核电复苏、我国加快核电发展的背景下,为了确保我国铀原料的供应安全,建立铀资源储备是绝对必要的。在这方面,可以参照我国已有的国储粮等储备模式,同时也应根据核工业的特殊性,采取相应的特殊政策。

(4) 发展快堆核能系统和核燃料闭合循环,燃料无限次循环,可以大规模提高铀资源利用率^[15],从而保证核能的大规模可持续发展。然而先进核燃料闭合循环研究是一项极为复杂的系统工程,投资巨大、耗时较长,应该在国家的统一规划和总体布局下,将先进核燃料循环科技与工业纳入国家核能发展总体规划,做好顶层设计和系统策划。为了确保我国热堆(以压水堆为主)核电产业今后几十年内的顺利发展,应注意提高核燃料循环前段(包括铀资源勘查和铀采冶技术、铀浓缩、高性能燃料制造等)的技术水平和经济竞争力,扩大产业规模。

参考文献:

- [1] 花明,谢青霞.从“低碳经济”谈江西发展核电的必要性和可行性[J].长江流域资源与环境,2010,19(1):13~17.
- [2] 王成孝.核能与核能技术应用[M].北京:原子能出版社,2002:117~118.
- [3] IAEA. Annual Report for 2009[EB/OL]. [2010-03-01]. <http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>
- [4] 汪永平,赵守峰,蒋林立.关于我国核电发展战略若干问题的认识[J].中国核电,2008,1(1):32~38.
- [5] 中新网.核电中长期发展规划(2005—2020)[EB/OL]. [2007-11-14]. <http://www.chinanews.com.cn/gn/news/2007/11-04/1067944.shtml>
- [6] 国家统计局.中国统计年鉴 2009[M].北京:统计出版社,2010.
- [7] 潘自强,沈文权.核能在中国的战略地位及其发展的可持续性[J].中国工程科学,2008,10(1):33~38.
- [8] World Nuclear Association. World uranium mining[EB/OL]. (2010-07-01). <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>.

- [9] World Information Service on Energy. Uranium maps[EB/OL]. (2010-07-23). <http://www.wise-uranium.org/umaps.html>.
- [10] 张金带,李友良. 我国铀资源勘查状况及发展前景[J]. 中国工程科学,2008,10(1):54~60.
- [11] 叶奇蓁. 中国核电发展战略研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(1):3~8.
- [12] 郑文元,张庆春. 我国核电产业发展的铀资源保障[J]. 中国核电,2010,3(2):174~179.
- [13] 金有忠. 核电发展与铀资源保障[J]. 矿物学报,2009(1):629~631.
- [14] 徐 铄. 快堆和我国核能的可持续发展[J]. 中国核电,2009,2(2):106~110.
- [15] 吴剑鸣. 核电技术和产业发展的动向[J]. 自动化仪表,2010,31(8):1~5.

ANALYSIS OF CHINA NUCLEAR POWER INDUSTRY DEVELOPMENT AND ITS URANIUM RESOURCE SAFEGUARD

JIANG Wei, GAO Wei-dong

(School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: It is China's realistically choice to develop nuclear power, which is one of the practical approaches to carbon emission reduction. This paper compares the situations of nuclear power development and technology as well as resources both in the world and in China. The results indicate that there still has a long way to go for China's nuclear power industry not only in the total installed capacity but in the share of nuclear electricity, even the country has began to develop its nuclear power industry since 1970s. In reference to technique, all the generators of both in operation and under construction in China belong to the second generation technique, namely pressure water reactor. In the meantime, all the nuclear power stations in China are located in east coastal area, where the economy is thriving while energy is scarce. More importantly, China has a poor image in uranium resource, and to improve the country's resource supply in the future will rely on both the domestic and the international markets.

Key words: nuclear power; uranium resource; energy