

国际核能发展态势

Development Trend of Nuclear Energy in the World

周 胜/ZHOU Sheng,王革华/WANG Ge-hua

清华大学核能与新能源技术研究院,北京 100084

Institute of Nuclear & New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

[摘要] 石油和天然气价格的上涨,以及温室气体减排压力,使得核能利用备受关注。在欧美发达国家,核电站及其他核设施的相继退役,既给反对核能找到了借口,也给核能的发展提供了机遇——如果核废物能够适当处理的话。综述了国际核能利用的现状、特点,以及核能技术(包括第三代和第四代核能技术、核聚变技术、燃料循环技术等)的研究进展状况,展望了未来核能发展的态势及其对中国核能发展的启示。

[关键词] 核能;外部成本;发展态势

[中图分类号] TL31

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)06-0015-03

Abstract: With the rising prices of oil and natural gas, and under the emission reduction demand of green house gas (GHG), the nuclear energy is causing wide concern. At the same time, some of the nuclear plants and nuclear facilities in Europe and America are out of decommission continuously, which provides not only the excuses to the nuclear opposition camp, but also the opportunities of nuclear development under the conditions of proper disposal of nuclear waste. This paper summarizes the current status and features of nuclear energy utilization, the research of nuclear energy technologies which includes nuclear technologies of Gen III and Gen IV, the nuclear fusion and the nuclear fuel cycle, etc.. The nuclear future prospect is also provided, with suggestions to China nuclear development.

Key Words: nuclear energy; extern cost; development trend

CLC Number: TL31

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)06-0015-03

据世界核能协会(WNA)统计^[1],2004年,全世界核电站共发电26 186亿kWh,占总电力的16%,已经拥有在役、在建、或拟建核电站的国家共有37个。其中北美和西欧的核电装机容量基本不变,亚洲是世界上核电装机容量增加最为明显的地区。

随着煤、石油和天然气价格的上涨,以及温室气体减排压力的增加,各国政府对核能的支持力度加大,公众对核能的接受性增加。与此同时,在欧美发达国家,核电站及其他核设施的相继退役使得核废物处理工作提上日程,发达国家中的清洁行动(clean-up)得到了强烈的关注,这种清洁行动耗资巨大,并且核废物问题还没有最终

解决,这既给反对核能找到了借口,同时也给核能的发展提供了机遇——如果这些废物能够适当处理的话^[2]。

1 2005年世界核能发展特点

1.1 北美和西欧的核电装机容量基本不变,亚洲是世界上核电装机容量增加最为明显的地区

截至2006年1月,全球正在运行的核电反应堆有441座,分布在30多个国家和地区,总装机容量为368 386 MWe。其中前5位的国家为:美国103座,法国59座,日本55座,俄罗斯31座,英国23座。中国大陆9座,排名第12。正在建设的核电反应堆

有24座,计划建设并资金落实的有41座,拟议而资金没有落实的有113座^[1]。

总体来说,北美和西欧的核电装机容量基本不变,其进一步挖掘主要靠电厂升级和电厂寿命的延长(从40年延长到60年)。而亚洲是世界上核电装机容量增加最为明显的地区,新建核电厂主要分布在中国、印度、日本和韩国等。

除了商用核电站以外,目前有8个国家拥有核武器生产能力,56个国家运行着284个研究堆和220多个船用核动力装置^[3]。

1.2 随着石油天然气价格的上涨,温室气体减排压力的增加,政府对核能的支持力度加大,公众对核能的接受性增加

收稿日期:2006-04-11

作者简介:周 胜,男,北京市清华大学核能与新能源技术研究院,讲师,主要研究方向为能源、经济和环境政策;

E-mail: zhshinet@tsinghua.edu.cn

scattering and mass transport of dye-sensitized nanocrystalline solar cells [J]. J Electroanal Chem, 2006 (588):51-58.

[24] LIN Y, XIAO X R, ZHANG D S, et al. Light scattering characteristic of TiO₂ nanocrystalline porous films [J]. Chin Sci Bull, 2003 (48):856.

[25] MA Y T, LIN Y, XIAO X R, et al. Synthesis of TiO₂ nanotubes film and its light scattering property [J]. Chin Sci Bull, 2005 (50):1985-1990.

[26] WANG G Q, LIN R F, LIN Y, et al. A novel high-performance counter electrode for dye-sensitized solar cells [J]. Electrochimica Acta, 2005 (50):5546-5552.

[27] LI C Y, LI X P, MA Y T, et al. A Novel Nanocrystalline TiO₂ Thin Film Electrodes Prepared at Low Temperature [J]. Chin Chem Lett, 2005 (16):967-970.

(责任编辑 胡春华)

IEA 的能源展望预测,到 2030 年,世界的石油需求将从目前的每天 8 200 万桶增加到 12 100 万桶,而天然气和煤的需求将同时增加 1 倍。由于开采成本越来越高,石油天然气的价格也越来越高。同时,京都议定书在 2005 年 2 月 16 日最终生效,这给发达国家带来了温室气体减排压力。

美国和欧洲开始重新审视原有的核能政策,并制定了一系列新的核能发展政策。2005 年美国公布的能源提案为建造新的核电站开启了绿灯,并从财务风险上对新建核电站进行了补贴。2004 年的公众调查表明,2/3 以上的美国人支持使用核电,这与 1993 年低于 50% 的支持率形成了鲜明的对比。英国最近调查表明,公众对核电的支持比例上升,以 28% 支持对 26% 的反对,这是英国从 1999 年以来,公众对核电的支持比例首次超过反对比例。尽管 1998 年后的德国把取消核能作为其政策,但目前的趋势有所改变。罗马尼亚、芬兰、保加利亚、法国等相继宣布建造新的核反应堆,显示了欧洲核电复苏的迹象。而日本和韩国坚定地将核能列为“准国产能源”,放在国家能源发展政策的首位^[2-4]。

中国大陆有 9 个核电机组正在运行,另外两个正在建设,规划中的核电项目到 2020 年将达到 40 GWe,多数是 PWR。国家的目标是反应堆设计和建造的国产化。同时中国的高温气冷堆的商业化应用也正在进行。台湾有 6 个反应堆正在运行,另外 2 个先进反应堆正在建设。

1.3 核设施的退役和清洁行动 (clean-up) 提上日程

核设施的退役工程浩大,大量的铀矿设施、商用反应堆、研究堆和其他核设施已经退役。这些核设施有些被完全拆除或改成他用,同时退役后的清洁行动更引人注目。在清洁行动中,核废物处理成本从原来的后处理成本扩展到玻璃状废物存放成本、超铀元素处理成本、返回的废物管理成本和后处理设施的退役成本等。

到 2006 年 1 月,100 个铀矿、90 个商用堆、超过 250 个研究堆和大量的核燃料循环设施被退役,其中部分被完全拆除。核电站的退役成本不同国家差别很大。在美国,每个反应堆的平均退役成本为 3.25 亿美元。

美国爱达荷州国家实验室 (INL) 的清洁行动项目,总共约 29 亿美元,于 2005 年 5 月 1 日开始启动,执行到 2012 年。另外,美国的 K-25U 浓缩工厂,当年曼哈顿工程的一部分,目前的清除工作将花费 5 亿美元,与当年建造的成本一样,计划 2008 年完成清理工作。英国的核退役局 (NDA) 计划开展的清洁行动将在英国 20 个地点实

施,预计投入 560 亿英镑 (约合 1 010 亿美元)。2005 年 8 月,日本通过立法规定:日本的核设施必须设置专门资金交给独立的外部机构进行核废物管理。在德国的清洁行动中,德国的 11 个核电机组将在 21 世纪 20 年代早期全部关闭。目前德国已有两个核电站被关闭。

1.4 核能外部成本优势没有得到实质性的支持和认可

从外部成本、温室效应、死亡事故等分析,核电远优于煤电。从单位发电量来看,核电的外部成本仅为煤电的 1/10,几乎没有 CO₂ 排放,每 TWy 的死亡事故也远低于煤电。单纯从能源的投入和产出来看,核能的投入产出比最高^[5]。

尽管核电的外部成本很低,但目前很少得到实质性的支持和认可。伦理原则目前支配着很多国家的能源政策的制定,这在核能方面尤为明显。从可持续发展来看,核能的竞争力是固定的,因为核能把健康、环境等大多数外部成本已经内部化了。

2 核能技术研究主要进展

核能技术主要包括第三代核能技术、第四代核能技术、聚变技术、先进燃料循环技术和核能的综合利用技术^[6-8]。

2.1 第三代核能技术

第三代核能技术在安全性大为提高的同时,其经济竞争力也大为提高,发电成本可与火电竞争。比如,AP1000 是 ABWR、System 80+ 和 AP600 之后第 4 个取得 FDA 的新型反应堆,设计寿命 60 年,建设工期约为 3 年。第一套发电成本 3.0 美分/kWh,后续机组发电成本可降到 2.2 美分/kWh,可与煤电和天然气发电相竞争。

第三代反应堆即先进反应堆,包括轻水堆 (ABWR、AP600/AP1000、IRIS、System 80+、EPR、SWR1000、ESBWR、VVER-91)、重水堆 (CANDU、ACR、AHWR)、高温气冷堆 (PBMR、GT-MHR)、快中子堆 (BN-800、BN-600、ALMR、Super-PRISM) 等堆型。根据美国 DOE 研究表明,有可能在 2010 年前后投放市场的堆型为 ABWR、AP600/AP1000、EPR、PBMR 和 CANDU。

由于美国等对第二代核电机组采取延长寿期的方案,普遍推迟了第三代反应堆的建设,目前除 ABWR 在日本有实际的运行经验外,其它堆型都在积极寻找第一个商业示范项目。其中,芬兰政府已于 2005 年 2 月发放了建造 EPR 堆 (1 600 MWe) 的许可证,并于 2006 年开始建设。韩国批准建立两个新的 System 80+ 核电站,预期 2010 年和 2011 年竣工。近期内最可能实施的高温气冷堆示范电站为中国的 HTR-PM (195 MWe) 和南非的 PBMR。在快堆方面,

俄罗斯 BN-800 正在南乌拉尔 Beloyarsk 建造,计划于 2010 年建成。该电厂的 BN-600 自 1981 年以来一直运行良好。美国、日本、印度和中国的快堆研究基本上都处于试验阶段。

2.2 第四代核能技术

第四代核能技术具有良好的经济性、更高的安全性、核燃料资源的持久性、核废物最小化和可靠的防扩散性。其中最具有发展前途的 6 种核能系统为:气冷快堆 (GFR)、铅冷快堆 (LFR)、熔盐堆 (MSR)、钠冷快堆 (SFR)、超临界水冷快堆 (SCWR)、超高温气冷堆 (VHTR)。6 种方案中的 4 种是快中子堆,5 种采取闭式燃料循环,并对乏燃料中所含全部铀系元素进行整体再循环。第四代反应堆概念与前几代完全不同,必须以大量的技术进步为前提,对这些技术的研究才刚刚开始。据估计,工业上成熟的第四代核能系统可能在 2035 年左右开始首批应用。

第四代核能技术多数考虑能量的综合利用,采用先进的热循环生产电力,同时生产氢气、海水淡化等工艺热。第四代反应堆的出口温度在 550~1 000℃,靠近范围低端的 SCWR 和 SFR 主要用于发电,高端的 VHTR 用于氢气生产,中间的 GFR、LFR、MSR 既可发电又可生产氢。

如果真能大部分实现第四代核能的目标,在成本上具有强竞争力,在安全性上被公众接受,那么未来的能源供应格局中将会发生根本性的变化。

2.3 核聚变技术

2005 年聚变研究的重要里程碑是 2005 年 6 月国际热核反应堆 (ITER) 参与各方 (欧盟、美国、俄罗斯、日本、韩国和中国) 签订了联合声明,同意未来 ITER 地点选择在法国 Cadarache。ITER 地点确定以后,印度表示极大兴趣,希望全面加入该项目。

ITER 为 Tokamak 聚变堆,500 MWt,是原来世界最大的 Tokamak 装置欧洲 JET 的 5 倍。ITER 项目金额达 100 亿美元,仅次于国际空间站的预算。建设时间从 2005 年开始,预期 2015 年完成,然后运行 21 年。目前这一项目还处于起步阶段,中短期内无法用来缓解能源问题。

在 2004 年第 20 届聚变能年会上,惯性约束 (ICF) 的最新成果为:美国基于激光的国家点火装置的建造及其改进。传统的间接驱动方式正向稳定点火示范发展,在快速点火的实质性进展中, multi-wire Z-pinches 驱动从成本上很有竞争力。同时,利用重离子驱动发电,基于柱型直接驱动靶并压缩点火的概念也已提出来。

2004 年中国成都的 HL-2A Tokamak 进行的试验,在等离子的转向和反馈控制

方面取得进展。日本临界等离子体实验装置 JT-60 成功地使 ITER 所需的高压等离子体持续了 24 s,这是迄今世界上高压等离子体持续时间最长的试验结果。

2.4 燃料循环技术

燃料循环技术包括铀矿的生产和储备、核燃料增殖和再循环、乏燃料的后处理和放射性废物最终处置技术等。采用一次通过循环,目前的铀资源还能够使用 300 年,如果采用适当的燃料循环,通过增殖和再循环最大限度地提取铀中蕴涵的能量,那么同样数量的资源能够使用上万年^[9]。

2.4.1 铀矿的生产和储备

WNA 统计数据表明:2004 年铀矿生产量为 40 219 tU,其中加拿大占 29%,澳大利亚占 21%,中国仅占 2%左右。预计全球 2006 年的铀需求量将达到 6.5 万 tU。目前,铀储备以天然铀和浓缩铀为主要形式。从长远来看,其他铀储备形式还包括从乏燃料后处理中获得的铀(制成 MOX 燃料)和从贫铀尾料再浓缩中获得的铀。由于受目前技术的限制,其他形式的铀储备尚无法大量使用,绝大部分被储存起来,以备将来使用。

2.4.2 乏燃料现状及其管理战略

世界的乏燃料库存量正在不断上升,目前乏燃料的总库存量已达到 18 万 tHM(吨重金属),此外还有 8.8 万 tHM 来自后处理的核废物。其中美国有乏燃料 5 万 tHM,每年新产生 2 000 tHM。俄罗斯有乏燃料约 1.6 万 tHM,每年以 750tHM 的速度增加。

在乏燃料的处理方面,目前美国采用厂区贮存,尽管已经批准建造 Yucca 最终处置库项目,但其前景仍存在不确定性。加拿大决定在 Ontario 进行深埋藏并批准了一个放射性废物焚烧电厂,通过焚烧后,能够明显减少低中等放射性废物的体积。日本目前的乏燃料主要运往欧洲进行后处理,处理后的高放射性废物玻璃固化以后运回日本核电站保存。

由 15 个欧盟成员国参加的长寿命放射性废物备选管理战略比较(Compas)研究项目结果表明:是否进行乏燃料的后处理和乏燃料的长期管理方案选择是目前争议最大也最关键的两个问题。是否进行乏燃料后处理主要取决于经济因素。确定长期管理方案是否适用的主要影响因素包括子孙后代的安全、环境的保护、代际公正、可持续性。目前正在考虑的长期方案是陆地地质处置和无定期贮存。对于欧盟和所有申请加入欧盟的国家而言,地质处置是一个优选方案。但是,对地质处置战略的安全性,在一些国家仍然受到公众质疑,例如法国、意大利和英国。

2.4.3 MOX 燃料

采用 MOX 燃料循环方式,可将来自于核武器退役的可裂变核材料和核电站乏燃料中存在的可裂变钚作为核燃料消耗掉。这既可降低武器级钚/钚处理费用,也可为公众提供福利。

2005 年,英国的 SMP 工厂经过一个艰难时期,重新投入运行,SMP 年处理能力 120 tHM。2005 年 4 月,美国卡托巴核电厂对使用武器级钚制成的 MOX 燃料进行试运行,试运行成功后,根据美国与俄罗斯达成的协议,美国和俄罗斯将在法国的帮助下各建造一座 MOX 工厂,用来处置 34 t 过剩武器级钚。日本青森县政府 2005 年 4 月也授权 JNFL 在六所村建造日本首座商用 MOX 燃料制造厂,最大年处理能力 130 tHM。目前,日本 JNC 在东海设施内运行着一座小型 MOX 燃料设施,为文殊、常阳和普贤反应堆提供燃料。

2.5 核能的综合利用

核能的综合利用技术主要指核能的工艺热利用技术,比如核能制氢、海水淡化、石油炼制、油页岩加工、天然气重整、煤的液化和气化等。目前最受关注的是核能制氢和海水淡化。

2.5.1 核能制氢

目前氢的生产主要在化肥生产、石油精炼领域,主要通过蒸汽重整甲烷得到,全世界年产量约 4 000 万 t。尽管氢能经济引起了人们的极大兴趣,但氢只是一个能源载体,而不是能源资源,因此氢的产生将是一个巨大挑战。在生产氢气的一次能源的各种选择中,适用于大规模氢气生产而几乎零排放的第四代核能最具有竞争力^[6]。

研究表明,HTGR 最适合高温热解制氢。2004 年 4 月,日本的 HTTR 的出口温度达到 950℃,这是世界上第一个有可能通过直接高温热解制氢的反应堆。中国清华大学核研院 10 MW 高温气冷堆已经运行成功,其商业化示范项目 HTR-PM(195 MWe)的主要任务也包括验证核能高温热解制氢的技术经济可行性。

2.5.2 核能海水淡化

目前世界上已经进行了一些规模较小的核能海水淡化项目,累积运行经验超过 150 堆年。但在全世界运行中的 7 500 多座海水淡化厂中,绝大部分都使用化石燃料^[10]。大型海水淡化厂将需要数百兆瓦的热功率,能满足这一要求的能源只有核能或者化石能源。几乎所有类型的反应堆都能与海水淡化装置整合在一起。核能海水淡化的竞争力完全取决于其经济竞争力,如果其成本与化石燃料工厂的成本相当,核能海水淡化技术将有巨大的市场空间。

印度目前正运行着一座由 Kalpakkam 加压重水堆提供热量和电力的海水淡化示范厂,其生产能力为 6 000 m³/d。巴基斯坦也计划将一座生产能力为 4 500 m³/d 的海水淡化装置与位于 Karachi 的加压重水堆整合在一起。

3 核能发展的展望和对中国核能发展的启示

先进核能技术必须与先进燃料循环技术协调发展。任何能源工业都必须以相应的燃料工业为基础,把核能技术和燃料循环技术作为一个系统工程进行部署,这是国际先进核能技术研究开发的一个显著特点。IAEA 的“先进核反应堆和燃料循环国际项目”(INPRO)的最主要结论是:核燃料循环(自铀资源开采、燃料生产、电力生产,直至废物处理)是推进核能发展的一个核心问题。GIF(第四代核能国际论坛)确定的目标是:良好的经济性、更高的安全性、核燃料资源的持久性,核废物最小化和可靠的防扩散性。必须配套先进的核燃料循环技术,核能才能持久发展^[8]。

中国具有丰富的煤炭资源和相对贫乏的石油天然气资源,对石油进口的高度依赖必然对我国的能源供应安全造成影响,因此核能开发将有利于我国的能源供应保障。同时中国的核电装机容量相对较低,如果从一开始就将核能的发展、先进核燃料循环技术与核能的综合利用结合在一起,中国的核能前景将一片光明。

参考文献(References)

- [1] World Nuclear Association [M/OL]. <http://www.world-nuclear.org>
- [2] 臧明昌,阮可强.世界核能走向复苏[J].核科学与工程,2004(3):1-5.
- [3] 常冰,译.世界目前的核动力应用现状[J].国外核新闻,2005(2):1.
- [4] 伍浩松,译.法国解决公众反核问题的措施[J].国外核新闻,2004(12):2-5.
- [5] 温鸿钧.由核电与煤电外部成本比较看核电价格之优势[J].中国核工业,2005(4):18-21.
- [6] 臧明昌.第四代核能和氢气经济——21 世纪能源领域的新进展[J].核科学与工程,2004(9):193-199.
- [7] 杨孟嘉,任俊生,周志伟.未来 10 年核电先进堆型介绍[J].国际电力,2004(3):32-35.
- [8] 高立,译.先进动力堆[J].国外核新闻,2004(12):27-32.
- [9] 伍浩松,译.长寿命放射性废物管理战略比较[J].国外核新闻,2005(5):19-24.
- [10] 伍浩松,译.只有核反应堆才能满足大规模海水淡化的需求[J].国外核新闻,2005(5):5-15.

(责任编辑 黄永明)