

论我国核能开发利用的基本阶段、重点领域和安全保障

安江林

(兰州财经大学 丝绸之路经济研究院,甘肃 兰州 730020)

[摘要] 以核电为主导全面开发利用核能的基本阶段及相应的主导技术大致包括:2020年以前,多数核电站采用第二代大型压水堆核电技术,新建核电机组全部采用具有自主知识产权的第三代核电技术;2021—2030年,加快第四代核电技术的研发和产业化进程,具有自主知识产权的快中子堆及其核增殖技术达到商业化应用,核电技术实现革命性提升;2031—2050年,大规模推广应用第四代核电技术,实现核燃料越烧越多的“核增殖”目标,核能产业成为高效益、大规模、微污染甚至零污染的支柱性能源产业;2050年以后,商业化开发利用核聚变能并过渡到大规模开发利用氢能为主的能源时代。当前和今后核能开发的战略重点主要是发展核电、核燃料后处理、核供热、先进核技术的研究与开发、核装备制造等产业,形成先进而健全的核工业体系。核能开发最主要的安全保障是提高核安全科学技术水平,第三代核电站的安全系数比第二代反应堆高出了一个数量级即10-100倍,第四代核电技术则使核工业成为几乎没有最终废料的清洁行业,核电站在任何情况下都不会出现核临界事故;其次是制定严格的核安全法律、法规、标准等规范体系,提高全社会的核应急能力。

[关键词] 核能开发; 核电技术; 核聚变电站; 核安全

[中图分类号] F416.23 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2016)02-0013-08

日本福岛核电站事故使核电复苏刚刚迈出一小步就进入了低潮,人类面临的能源危机和能源体系转型的迫切性也因此进一步加剧了。60多年来,尽管发生了3起严重的核事故,但从科学技术和核产业发展所提供的事实来看,核电仍是清洁、安全的能源,核能开发是未来能源发展的主要形式和主要趋势。核科学技术揭示了核能开发的更加广阔的前景,如核能可永续开发利用而不枯竭、核废料可处理得接近零排放、大的核事故发生概率等于或接近零等等。如果不加快发展核能,人类要实现减排并走出能源危机,目前尚找不出其他更可靠的道路。

一 顺应能源结构演变趋势加快核能开发利用

(一)能源技术进步和能源结构演变的展望

由于资源和环境问题的日益严峻,人类可能不得不在本世纪内终结大规模开发化石能源的道路。能源科技专家预测,人类能源发展的基本趋势是逐步取代碳的燃烧,最终进入无碳的永恒“燃氢”时代^[1]。因此,氢能的大规模开发利用将是人类告别能源短缺、实现能源生产和消费清洁化的主要途径。但是,以较低的成本和便捷的途径分解水来制氢,以氢为燃料来供热、发电以满足生产和消费的需要,在

21世纪的前50年内还难以占有重要地位。在2050年以前,占主导地位清洁能源有可能是核裂变能,以第四代核电技术为主的核电生产将占世界发电总量的50%以上。随后的十几年,太阳能和核聚变能有可能成为主导能源。氢能在太阳能和核聚变能获得大规模开发利用之后,即大约在世纪末,有可能成为取而代之的主导性能源。2030年以前,太阳能还难以取代传统能源的主导地位,因为在技术上和产业的成熟性方面克服太阳能发电、供热的间歇性等缺陷尚需较长时日。目前可控核聚变能在工业上大规模生产的技术还处于研究与开发阶段,估计这个阶段将要延续到2050年前后。而在2016—2050年期间,以大规模开发利用核裂变能(即人们习惯上所说的“核能”)为主,同时以尽可能地扩大开发利用太阳能、风能等可再生能源为补充,是更为现实的能源政策取向。在这段时间,能源结构变化的大致趋势是:太阳能将获得快速发展,但是否有条件成为主导型的清洁能源,取决于太阳能技术的进步和产业的成熟状况;风能的开发利用在能源总量中的比重将进一步提高,但风能开发的总规模由于受到资源状况的限制,难以成为主导性的清洁能源;核能、水能、太阳能、风能和一定规模的氢能这几种清洁能

[收稿日期] 2016-01-15

[作者简介] 安江林(1946-),男,陕西洛川人,兰州财经大学丝绸之路经济研究院研究员。

源的总规模将超过化石能源,清洁能源与清洁化的化石能源将成为能源结构多元化的主要角色,其中核能是这些角色中的主导力量。2050 年以后,核聚变能和廉价、稳定的太阳能开发利用将成为能源体系和能源可持续发展的主要角色,随后氢能的开发将加快步伐并逐渐成为主力能源。

根据能源科学技术进步和能源结构演变的上述趋势,21 世纪人类实现能源革命的重要桥梁应当是核裂变能的开发利用,在 2050 年以前使以核电为主的核裂变能上升为主力能源。核电具有装机容量大、发电稳定、经济竞争力强、清洁化程度高等优势,是在今后几十年内唯一能够大规模取代火电的支柱性电源。核能也可以较大规模地取代煤炭、石油、天然气,为供热、制冷、海水淡化、制氢和交通工具提供清洁、廉价的能源。研究开发不同功能的中小型核反应堆可以充当调峰电源以支持风电、太阳能发电规模的不断扩大。核电成本的降低可为大规模海水制氢提供动力,使氢能更广泛地得到使用,逐步减少石油、天然气资源的消耗。风能、太阳能、氢能等清洁能源在关键技术尚不成熟、技术体系还不健全的较长时期内,只有与核能和其他能源形成功能互补、良好配套的多元能源体系,才能持续、较快地扩大规模,逐步取代化石能源的主导地位。

要使核裂变能在能源产业体系中逐步占据主力能源地位并保证能源体系成功转型,其主要条件就是依次推广应用第三代、第四代核电技术和核聚变能产业化技术,由现在的以第二代核电技术为主导的阶段,过渡到核聚变能大规模开发利用的新阶段。在这个过渡时期完成后,能源舞台上唱主角的将是核聚变能、太阳能和氢能,核裂变能和清洁化的化石能源逐步退居到次要地位,推动能源体系转型的“核能桥梁”也将逐步退出能源舞台。

(二)以核电为主的清洁能源取代传统能源主导地位的基本阶段及相应的主导技术

我国的能源资源状况决定了能源结构调整和能源体系的清洁化转型,必须经历以核电为主的清洁能源取代传统能源主导地位的过程,其中核能开发的主要阶段、相应的主导技术及其带动其他清洁能源发展的主要阶段和基本进程是:

1、2020 年以前,推动核能、可再生能源及燃料电池等关键性能源技术获得重大突破,扩大核电、水电、气电、清洁煤发电和可再生能源发电的比例,为清洁能源的更大规模发展奠定基础。这一阶段多数核电站采用第二代大型压水堆核电技术,同时推进第三代先进核电技术的消化、吸收、再创新。新建核

电机组全部采用具有自主知识产权的第三代核电技术,即比目前引进的 AP1000 技术更先进、更安全、装机容量更大的 CAP1400 和 CAP1700 等技术,也就是中国自主研发的“三代+”技术,实现大型先进机组设计建造的标准化、模块化、批量化,提高反应堆的安全性、经济性和建设速度。依靠成熟的“三代+”技术,支撑核电在整体上实现“扩大投入—扩大产出—技术升级”的良性循环。保证先进核电技术稳步扩大出口,增强核电产业的经济实力和国际竞争力。加快研发以快中子反应堆为主的第四代核电技术,在第三代核电技术的改进、提高中逐步增加第四代核电技术的先进成分,缩短第四代核电技术由试验堆、示范堆向商业应用堆转化的周期,占领先进核电技术的制高点。

2、2021—2030 年,依靠推广应用安全标准更高的、具有自主知识产权的第三代核电技术,大规模开发利用核裂变能,保持核电和核工业整体以较快速度发展,核能产业实现高效益良性循环。同时以更加先进、成熟的技术开发利用太阳能、风能等可再生能源,电动汽车、氢能燃料电池汽车和分布式电站实现商业化应用,使清洁能源在能源体系中的比重得到大幅度提高。以改进和推广应用第三代核电技术形成的经济、技术实力为支撑,加快第四代核电技术的研发和产业化进程,具有自主知识产权的快中子堆及其核增殖技术达到商业化应用,实现核电技术的革命性提升,为 2030 年以后核电在第四代技术主导下的发展奠定基础。

3、2031—2050 年,核裂变能与太阳能、风能等清洁能源初步取代化石能源居主导地位,新增的能源需求主要由可再生能源和核能提供。大规模推广应用快堆技术与封闭的燃料循环技术结合起来的第四代核电技术,实现核燃料越烧越多的“核增殖”目标,使核能资源成为几乎永远用不完的一种能源资源。从根本上排除核电站发生重大事故的可能性,核生产设施不再需要厂外应急且具有防核扩散能力,核废物量大幅度减少,核能产业成为高效益、大规模、微污染甚至零污染的支柱性能源产业。研发并稳定掌握核聚变能开发技术,核聚变能的开发利用进入或接近大规模商业化阶段,使中国成为世界上清洁能源技术的领先国家。依靠能源技术的综合优势,保证在 2050 年以后由核裂变能为主过渡到核聚变能为主的能源体系,能源生产和消费实现高度化的可持续发展目标。

4、2050 年以后,大规模开发利用核聚变能,将廉价而清洁的核裂变能、核聚变能和太阳能用于生

产更为廉价的新能源,如从海水中分离氘和氚,分解水制氢,开发月球的氦-3资源等,率先告别能源短缺和能源污染的传统能源时代,进入以大规模开发利用氢能为主要标志的历史时期。

根据上述能源结构演替的预测,我国在今后30多年间加快发展以核电为主的清洁能源,就可以为最终解决能源以及能源引起的环境问题赢得时间和提供经验^[2]。

二 当前和今后核能开发利用的重点领域

当前和今后我国核能开发的战略重点主要是发展核电、核燃料后处理、核供热、先进核技术的研究与开发、核装备制造等产业,形成技术先进、结构合理、功能健全的现代核工业体系。

(一) 核电产业

核电产业是核能开发利用的主导部分。今后几十年,要使核能扮演主导性清洁能源的角色,必须成功解决核能开发利用的一系列重大难题,使核电技术达到并保持领先地位,陆续实现第三代、第四代先进核电站和核电机组建设的自主化目标,使核能成为传统能源体系过渡到清洁化能源体系的可靠桥梁。

成功发展核电必须确定正确的核电技术战略。核电第一代技术已基本淘汰,现在国际上和我国国内普遍使用的是比较成熟、通用的第二代技术,其中更先进一些的第二代技术称为“二代+”压水堆技术。第三代核电技术包括美国开发的AP600和AP1000技术(非能动先进压水堆技术)、德国开发的小型沸水堆(SBWR)技术、日本开发的简化型压水堆(SPWR)技术等先进压水堆技术和高温气冷堆技术,被称为“革新型”核电技术。这一代技术的主要特点是简化了核电系统,减少了电站设备,具有安全性和经济性双重优点。AP1000技术比第二代技术更先进、更安全也更经济,设计更简单,安全目标比现在运行的核电站领先约两个数量级,是目前世界各国新建核电站的首选技术。我国的核电技术战略大致为:不断改进第二代核电技术,自主掌握第三代核电技术,积极研发第四代核电技术,主动参与国际核聚变技术的研发。

我国在引进AP1000技术的同时,加快了消化、吸收、自主创新的步伐,重视在第三代技术的研发、应用中加入第四代技术的研发成果。由华能集团等骨干企业设计、建设的山东石岛湾高温气冷堆核电站示范工程和石岛湾大型先进压水堆CAP1400示范工程,成为世界上第一座具有第四代核电技术特

征的核电站,标志着中国在衔接、融合第三代和第四代核电技术并占领核电技术制高点方面走在世界前列。此后,运用第四代核电技术的高温气冷堆核电站将加快商业化推广,而且由于其模块化和经济性、安全性等多方面的优越性,既可以在沿海也可以在内陆地区大量建造。江西瑞金的60万千瓦高温气冷堆核电站于近一两年开工建设,从而成为世界上第一座商用第四代内陆核电站。由于第四代核电技术的先进性和固有安全性,就可在内陆地区大量布点大中小型核电站,这将使全国核电站的空间布局更趋合理化,大量的中小火电厂将陆续由先进的核电厂取代。

在核电快速发展的推动下,核产业链下游环节的生产能力正在成倍扩大,对上游核燃料、浓缩铀等环节提出了扩大产能的需求。今后几十年,核电的更快发展将使核燃料的需求成倍增长。因此,应当依托已有的产业实力和基础条件,适度超前扩大铀资源勘探开发、铀转化、铀浓缩、核材料制造等产业规模,保证核产业链的协调发展。要发展铀矿勘探开发、钍资源开发利用、核废料处理处置、核电出口等方面的国际合作,提升全产业链技术水平、自主研发能力和企业综合素质,完善基础设施和对企业的支持措施,增强主要核工业基地的功能。

(二) 核燃料后处理产业

核电的快速发展将产生大量的核废料,又称乏燃料,因而需要配套发展乏燃料后处理工业。为了对乏燃料进行再处理,回收其中96%的有用核素,英、法、日、俄等核电大国都建设了后处理工厂。美国政府也曾打算建设大型后处理厂,但由于一些权威核物理学家持相反的意见,认为乏燃料后处理“既昂贵又危险”^[3],至今没有形成明确决策。我国解决乏燃料大量积存问题的政策,是在核电发展中采用闭合燃料循环的技术路线。通过建设大型核燃料后处理厂,对核电站卸出的乏燃料进行处理,提取、回收其中的铀、钚等核素,将其制成新的核燃料元件,返回反应堆中使用,实现核燃料闭路循环。后处理可以使一次“燃烧”的核燃料重复使用60多次,原本可用几十年的核燃料能够使用3000多年。经过后处理,最终需要存放于地质储藏点的核废料的体积成倍缩小,其放射性毒性也可大幅度降低。

尽管后处理工业在核燃料的可持续使用和环境安全等方面有许多优越性,但是对它的危险性尤其是它可能导致核扩散危险的后果依然不可忽视。解决核废料问题的根本出路在于核废料处理处置技术的重大突破。在这方面,国内外的技术进步很快,以

前确定的后处理技术路线相对于最新的技术成果和处理方案,有可能成为既昂贵又有一定危险性的选择。这就需要密切跟踪国际第四代核电技术和核燃料再循环技术进步情况,注重借鉴国际上诸如高温冶金处理技术与快堆技术的结合等研发进展状况,及时权衡利弊,选择最佳的技术路线,放弃不合理的或次佳的技术路线,以确定最佳处理处置方案^[4]。解决核废料处理处置问题的根本出路,是依靠先进、成熟的快堆技术,实现核废料的资源化循环利用,排除核事故、核扩散、放射性废料污染环境、核资源枯竭等危险发生的可能,使核电真正成为高效益、成本低、微污染甚至零污染的清洁能源。

(三)核供热产业

核供热的主要领域包括:大规模的工业供热,如煤的汽化、液化,金属冶炼,海水淡化等;居民住宅的供暖;制冷。小型、微型核供热反应堆在为舰船、航天器等交通工具提供动力方面有着不可替代的优越性,其应用前景更为广阔。核供热可以大量代替煤、石油、天然气等化石燃料的燃烧,不排放温室气体,减少大量运输,占地少,能够集中产生大量热能,对环境的放射性辐照量仅为燃煤锅炉的 1/30。供热核反应堆的建造较为简单,比其他形式的反应堆更安全,不可能发生核临界事故,便于大面积推广使用。核供热能够为工业和居民生活提供清洁、安全、经济的热源,已在许多供热发达国家广泛应用,具有良好的经济效益、社会效益和环境效益。

由于技术的先进、成熟,核供热反应堆可以建在距离城市几公里的地方,也可以建在城市居民区的内部,甚至能够建在城市建筑物旁边,欧美一些国家甚至允许供热的微型核反应堆建在居民楼的地下室。我国清华大学的核能与新能源研究院经过研究和试验,已于 80 年代后期建成了为该院 5 万平方米建筑物供暖的小型核反应堆,成为世界上第一座投入运行的一体化自然循环壳式低温核供热堆^[5]。清华大学开发的这种反应堆在低温供热方面具有“优异的固有安全性”,可以建在居民区附近^[7]。中广核等核电企业也正在研发适用于海上和陆地的各种小型核电站,核供热的技术成果将加快进入工业应用阶段。

包括中国在内的世界主要国家,以热能形式消耗的能源占能源消耗总量的 60%-70%。对这些国家来说,要大幅度节约煤炭、石油、天然气等化石能源资源,从根本上改变温室效应、雾霾等环境污染状况,重要途径之一就是大规模发展核供热产业。可以依托我国国内的核科学研发机构和核工业企业,

同时加强与国内外有关企业和科研机构的协作、联合,自主研究、开发、应用先进的中、小型核供热反应堆技术,规划和建设各类小型、微型核供热反应堆,使越来越广泛的工业和民用供热实现清洁化、安全化。

(四)先进核技术的研究与开发

我国提出到 2030 年力争形成能够体现世界核电发展方向的科技研发体系和配套工业体系的目标。虽然 CAP1400 已成为中国第三代核电技术的自主品牌,标志着中国已经稳定地掌握了国际第三代核电的先进技术,但是第三代核电技术仍有继续改进、提高的巨大空间。在第三代核电技术的继续研发、改进、提高中,中国核科技界仍需在技术的先进性、经济成本、安全性和人才培养等方面攀登新的高峰。

在稳定掌握第三代核电先进技术的同时,要争取在快中子堆技术(第四代)领域连续取得重大突破,加快速度走向商业化应用的步伐。快堆与热堆相比,最大的两个优点是能够充分利用核燃料和安全性更高。快堆在消耗核燃料、产生核能的同时还能产生相当于消耗量 1.2 倍以上的新的裂变核燃料,即在消耗一定量的铀-235 进行发电的同时,能够使铀-238 转变成钚-239,新生成的钚-239 在能量上相当于已消耗的铀-235 的 1.2—1.6 倍。快堆由此可以使核燃料越烧越多,实现“核增殖”,核裂变资源因此几乎成为永远用不完的一种能源资源,从而实现能源领域的一项革命性重大技术进步。快堆基本上排除了发生核临界事故的可能,比第三代核电站的安全性提高了 10—100 倍。快堆技术还可以焚烧长寿命锕系核素和长寿命裂变产物,使之转变成稳定的、没有毒性的核素,同时可以产生中子和可观的能量。锕系核素由此不仅不再是具有毒性的废料,而且还可当燃料使用。根据法国、俄罗斯、日本等国家的数据,一座快堆可以烧掉 4~6 座甚至 10 座同等功率的压水堆产生的长寿命锕系核素。

国际上处于前沿领域的第四代核电技术种类较多,目前较成熟的反应堆技术包括钠冷快中子反应堆、铝合金冷却快堆、气冷快堆、超高温气冷堆、超临界水冷堆和熔盐堆六种。我国在 20 世纪 60 年代中期就开始了早期的快堆技术研发工作,1970 年 6 月建成了一座快中子零功率装置。1987 年快堆技术被纳入国家 863 计划,1992 年国务院批准在中国原子能科学研究院建设一座热功率为 65MWt 的中国实验快堆(CEFR)。2011 年该实验快堆成功并网发电,标志着我国在掌握第四代先进核能系统技术领

域取得重大突破。再用15年左右的时间,可以分阶段实现由实验快堆到示范快堆再到大型商用快堆的技术升级,2030年以后新建核电站将采用以快堆为主的第四代核电技术。

第四代核能系统中的熔盐堆是开发利用钍资源的核电技术,研发这一领域的技术对我国未来核能开发利用有着重大的战略意义。熔盐堆可以在中子反应中将钍元素转换成铀-233,实现钍-铀核燃料循环,还可以燃烧其他反应堆卸出的核废料。这种反应堆安全性能高,核废料少,不存在核扩散危险,用途广泛,灵活性强,是一种环境友好型的核电技术。钍裂变产生的能量相当于等量铀的200倍,因而是一种能量极大的核资源。尤其重要的是,世界上可供开发的铀资源储量有限,几十年内就可能用尽。我国的铀资源储量相对少且多为贫矿,而钍资源却相当丰富,居世界第二位,因而适合于大规模建设熔盐堆核电站。

在本世纪的后半期,核聚变电站技术将走向成熟并得到广泛应用,人类由此可彻底摆脱长期受困扰的能源危机。核聚变能技术也就是可控热核聚变反应堆技术,该项技术若达到成熟并付诸商业化应用,地球上的氘、氚资源可以满足人类几十亿年的能源需求。目前由欧盟、美国、俄罗斯、中国、日本、韩国、印度联合开发的热核试验反应堆已完成了工程设计,估计在2020年前建成。可控热核聚变堆技术大约要经过四五十年时间,即到2050年前后达到技术成熟和经济、实用的目标。热核巨变能的利用将更加灵活、安全,小型的反应堆甚至可以直接在交通工具上使用。核聚变反应堆技术以及先进、成熟的太阳能技术等,有可能使以水制氢的成本显著降低,氢能将有条件成为主导性能源。大约到21世纪末,依靠先进的核聚变能、氢能和太阳能开发利用技术,人类的能源生产和消费将最终实现清洁化。

我国早在20世纪50年代末就开始进行磁约束核聚变研究,目前已经取得一系列重要进展,但是与发达国家的水平相比还存在相当大的距离。今后必须积极参与世界核聚变能的联合研究与开发,寻求产业发展的新领域、新机遇,同时自主规划和建设相应的研究开发项目,力求较早获得核聚变能开发的先进、实用技术。

(五)核工业设备制造业

未来核工业发展必然带动形成规模巨大的核设备制造行业。国家早已确定了核电设备国产化的政策,正在全力推动先进、成熟的压水堆核电成套设备批量化、自主化设计和制造。核电的主要装备领域

包括百万千瓦级压水堆核电站成套设备,气体离心铀浓缩、核燃料后处理、铀钍混合氧化物燃料(MOX)、高性能核燃料元件制造设备等。目前国内已经形成东北、上海和四川三大核电设备制造基地,有100多个企业具备了核电设备的生产能力。在自主研发和生产第三代核电站成套设备方面,上述企业已陆续取得成效,如2015年国务院决定在沿海地区核准开工建设“华龙一号”示范机组,将形成具有自主知识产权的第三代百万千瓦级压水堆核电机型。今后,从反应堆堆芯、蒸汽发生器、反应堆冷却剂泵、稳压器、承压管道、汽轮机、发电机、主蒸汽系统、主给水和冷凝系统、专用安全系统和非安全系统、电力和控制系统,到安全壳、辅助设施、放射性废物处置和储存设备等,都将陆续达到或超越三代核电技术要求,实现自主设计和制造,提升国际竞争力。

核电设备以及核工业的其他设备制造属高端装备制造业,在这一领域取得世界领先地位,不仅能使中国拥有世界级的核电主打品牌,而且能够带动许多领域的装备制造、工程管理以及冶金、材料、电子信息、科技研发等产业的发展,从而为产业链所涉及的大量企业和许多地区提供难得的发展机遇。随着核电产业的迅速扩大和核电走向国际市场,核工业设备制造的规模将成倍扩大,越来越多的民营企业将参与到核工业设备制造中并形成各自的优势。核工业的主要企业和科研机构应当与更多的国有和民营企业发展联合、协作关系,使参与协作的非核企业尽快适应核工业生产、管理的特点,成为支撑核电走向国际市场的重要力量。

三 核能开发利用的安全保障

由于核物质具有放射性,核能开发从一开始就是在先进、有效、全面的安全保障条件下进行的。今后几十年,核能开发最主要的安全保障仍然是提高核安全科学技术水平,其次是制定和实行更加严格的核安全法律、法规、标准等规范体系,提高全社会的核应急能力。

(一)核能生产是清洁、安全的行业

核能是清洁、安全、优质的新能源。扩大核能的开发利用,是扩大能源生产和供应能力、减少传统能源生产造成的环境污染、有效改善环境质量的重要战略途径。核科学技术是当代最先进的高科技领域之一,核工业则是具有高度安全保障的生产行业。与其他产业相比,核工业是在操作规程和技术标准、安全标准甚至安全意识方面要求最严格、最苛刻的

新兴产业。任何工业系统都存在发生事故的可能,而核能生产领域发生事故的可能性比其他能源、其他社会生产领域发生事故的可能性要小得多,其安全性比普通的化工厂还要高。世界商业核电站 60 多年的运行历程证明,从工业事故、环境损害、健康效应和长期危害的角度看,包括后处理生产在内的核工业系统比化石燃料系统要安全得多。在中国,核工业的安全记录一直高于全国平均水平。核电既不产生烟尘、二氧化硫和氮的氧化物,也不产生二氧化碳,是重要的高科技、低碳型工业行业。我国能源方面的资料表明,核电向环境释放的温室气体只是煤电的百分之一,水电的约八分之一。

人们往往认为核能产生放射性物质是它独有的缺点,其实煤炭中也含有微量的放射性核素,而且核电行业产生的放射性环境影响大大小于煤电。100 万 kW 燃煤电厂所释放到环境的放射性,是同等规模核电机组的 100 倍。核电站释放的放射性有害气体引起的人均辐射剂量比乘飞机旅行或看电视引起的辐射剂量还要低。从向环境中释放放射性物质所造成的辐射程度作对比,煤电燃料链远高于核电燃料链。从对公众产生的辐射照射程度作对比,煤电燃料链为核电燃料链的 50 倍。从对电站工作人员产生的辐射照射来对比,煤电燃料链约为核电燃料链的 10 倍。近年来我国政府和企业分别独立对我国沿海核电站的环境辐射程度进行了监测,其结果是:电站对周围环境没有产生辐射影响,环境仍保持着天然本底水平。

尤其重要的是,发展核电是能源生产中大幅度减少人员死亡的主要途径。经合组织的统计表明,生产百万千瓦能量的事故死亡人数,核能产业链是 0.73,天然气产业链是 7.19,石油产业链是 9.37,煤炭产业链是 12,三种化石燃料产业链分别是核能产业链的 9.8 倍、12.8 倍和 16.4 倍。据能源科学家提供的有关资料:煤电为美国提供 50% 的电力,却排放 80% 的二氧化碳;核电提供 20% 的电力,不产生任何碳排放^[7]。美国因化石燃料发电厂排出的颗粒物污染,使 60 多万人哮喘病发作,5.9 万人患支气管炎,4 千多人患肺炎,9700 人患心脑血管病,3 万多人因病过早死亡。仅美国东北部两座煤电带来的环境污染,每年就会使数万人患哮喘病,数十万人患呼吸道疾病,其中有 70 人因病过早死亡^[8]。瑞士的一家名叫“保罗谢勒”的专业研究所从实验分析中得出结论,仅就污染造成的健康损害来看,化石燃料是能源生产中最危险的领域。

由于能源结构不合理和技术、管理落后等原因,

“煤电杀手”在我国事故和污染劣迹大大超过了欧美国家。百万吨煤炭生产的煤矿事故死亡人数,中国相当于美国的 40 多倍。据有关资料,我国的电力、热力、冶金、非金属矿制品等重点煤炭消费行业排放的烟粉尘约占全国烟粉尘排放总量的 80%,以烟粉尘为主的空气污染成为第四大致死因素。全国尘肺病患者总数中,约有一半在煤炭行业。煤炭燃烧所排放的一次性细颗粒物、二氧化硫和氮氧化物分别占污染物排放总量的 62%、93% 和 70%。这些污染物在每立方米空气中每增加 10 微克,就会使人群的死亡率提高 1% 到 8% 不等。仅煤炭燃烧产生的细颗粒物(造成雾霾的主要原因)一项,每年就可使死亡人数额外增加 70 多万。因此,要使能源生产和消费显著降低人员死亡率,以较大份额的核能取代化石能源是最明智的选择。

(二) 社会预防核事故的能力在不断提高

人类预防核事故的能力在发展核工业和核科学技术的长期实践中不断提高。三哩岛、切尔诺贝利和日本福岛核事故促使有核电站运行的所有国家重新仔细检查了核电站的基本安全特性,制定了核电站“用户要求文件”,提出了新的核电厂设计目标。各国核安全当局和国际原子能机构也对原有的核安全法规、标准 and 规范进行了修改或重新制定。1986—2006 年的 20 年中,先进反应堆技术和核燃料后处理技术的研究开发推动了核工业的经济性和安全性水平及相应指标实现大幅度升级。取代第二代核电站的第三代反应堆已成为今后核电建设的主流。不会发生任何大事故的、比煤电还要便宜的“第四代核能系统”,以及先进的高放废液处理方法“分离—嬗变法”等已经取得重大进展,核能开发由此获得了更加广泛的公众接受和社会支持。尤其是福岛核事故之后,国际原子能机构牵头制定了更加严格的核安全规范和安全审查制度,并要求各成员国严格遵守和执行。大多数核能国家在吸取福岛事故教训、重新评估核能的安全性和经济性后,仍然坚持发展核电的能源道路,一方面大幅度提高核电建设的安全性成本,另一方面加快开发和应用安全水平更高的第三代、第四代核反应堆技术。

核反应堆等所有的核设施均推行全范围、全过程的质量保证体系,以确保设计、施工、调试、运行的质量和安全。核反应堆实施纵深防御、多重保护、多样性的设计原则,以确保核生产安全。核设施项目实行国家环境法中规定的“三同时”制度,即建设项目中的污染防治工程必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。为了确保核安全,核电站和

后处理厂等民用核设施还实行国际、国家和地方的严格监督。我国的核安全工作已与国际正式接轨,核应急工作处于世界先进水平。20世纪80年代成立了对民用核设施独立进行安全监督的权力机构——国家核安全局,制定和颁布了关于核安全的一系列法规。国家从核工业项目的选址、设计、建造、运行直至将来的退役准备等各个环节,都依照一整套非常严格的核安全、核应急法规和标准进行管理。实行由国家核安全局独立进行的对民用核设施(主要是核电站动力堆和研究堆以及后处理厂)的审评和监督制度,并推行安全许可证制度。1991年8月,中国正式成立了国家核事故应急委员会,逐步建立起了三级核事故应急系统,即国家核事故应急管理机构、地方核事故应急管理机构 and 核电厂营运单位应急管理机构,目前已有16个省建立了核应急委员会和相应的办事机构。核科学家总结我国核能开发60多年、核电发展30多年来的经验时指出,我国核工业以往没有出现过2级以上的事件、事故,目前核电站发生放射性物质大量泄露事故的概率,已达到每堆年10的负6次方这样低的水平(每堆年10的负7次方就是不可能发生事故的零概率)。尽管如此,国家还在继续加强核安全保障和核应急能力建设。《中国的核应急》文件提出了我国核应急的基本目标、方针政策和法制、体制、机制建设,提出“建立全国统一的核应急能力体系”、“核事故应对处置主要措施”和加强“核应急科技创新”、“核应急国际合作与交流”等任务,在核安全和核应急领域向世界更高水平攀升^[9]。

(三)核安全的技术研发不断取得新的进展

科学技术是保障核安全的根本性手段。20世纪70年代,美国提出了“概率风险评价”(PRA)的方法用于核安全研究。其特点是用概率论方法定量评定一个系统可能产生的风险(即一定时间内发生事故的次数和事故造成的后果的乘积),使核安全研究建立在系统和定量化的科学基础上。概率风险评价目前改称为概率安全评价(PSA),我国清华大学核能技术设计研究院率先把PSA引入国内并为国内核能界普遍接收。20世纪70年代末,德国核科学家提出了安全准则的新概念,主张按“决定论”方法制定核安全准则,以代替按“概率论”方法制定核安全准则,即当一切都按最坏的情况发生时,单凭客观自然规律(例如重力下降,热传导、辐射和对流,由温度差引起的密度差产生的自然循环等)就能将事故的后果控制在允许的安全范围之内,而不论其发生的概率多么小。这种新的安全概念现在已

经在第三代核电站建设中变成了现实。

核能开发的安全标准和核安全的技术保证能力一直处于快速提高的过程中。现代核技术的进步可以使核工业生产特别是放射性废物处理、处置变得更为安全。如近年来核科学家正在研究开发的高放废液最终处置的先进技术——“分离—嬗变法”,可以把乏燃料中的铀、钚等核素分离、提取出来继续作为核燃料利用,将高放废液中的所有锕系元素特别是次锕系元素和长寿命裂变产物比较彻底地分离出来,通过中子反应使之嬗变成短寿命或稳定的、没有毒性的核素,使核废物的辐射危害延续时间由几十万年缩短到千年以下^[10]。科学家估计到2030年以后,分离-嬗变技术将发展到可以把核废料处理得非常干净的程度。

第三代核电站的安全系数比第二代反应堆高出了一个数量级即10—100倍,其发生核事故的几率在统计学上是几乎可以忽略的。这种核电站按照“非能动”的原则进行设计,排除临界事故的机制不再是依赖人的主观努力和规章制度的严密性,而是依赖自然规律的作用。今后新建的这类核电站可以在失去供电以及没有人工操作的情况下自动为反应堆降温数天,其所具有的多层保护设施,即使在受到外界强烈攻击的情况下也能够保证反应堆安然无恙。而第四代核电技术甚至可以使核电站在任何情况下都不会出现核临界事故,象前苏联切尔诺贝利和日本福岛那样的核事故不可能再发生。预计再经过十几年的时间,一个包括先进的分离-嬗变技术的第四代核燃料循环系统将会建立起来,使核能的安全性、经济性及与环境的协调性达到比第三代核电站再高一个数量级的水平。有关资料提示,作为第四代反应堆较成熟堆型的钠冷快中子反应堆,可与若干座压水堆和相应的后处理厂、MOX燃料元件制造厂以及若干中小型核反应堆按照产业链关系组成“快堆-后处理厂-热堆”相对集中分布的“核能园区”,在实现核增殖和锕系核素嬗变方面取得极好的规模效益。这方面的技术若取得重大突破,核工业将成为几乎没有最终废料的清洁行业。应该说,第四代核电技术实现大规模商用时期,能源产业的可持续发展和绿色化、安全化目标就可得到初步实现。

[参考文献]

- [1] 毛宗强.氢能——21世纪的绿色能源[M].北京:化学工业出版社,2005:9-10.
- [2] 王秀清.世界核电复兴的里程碑——中国核电发展前

- 沿报告[M].北京:科学出版社,2008:300.
- [3] [美]弗兰克.N.冯.希佩尔.危险的核废料回收[J].环球科学,2008,(6):67-71.
- [4] 威廉.汉努姆、杰拉尔德.马什、乔治.斯坦福.巧用核废料[J].环球科学,2006,(1):76-81.
- [5] 马翔泉.核能开发与应用[M].北京:化学工业出版社,2005:245.
- [6] 张晓东,杜云贵,郑永刚.核能及新能源发电技术[M].北京:中国电力出版社,2008:86.
- [7] 亚当.皮奥雷.探问第三代核电站安全底线[J].环球科学,2011(7):63.
- [8] 马克.菲谢蒂.能源生产的死亡数字[J].环球科学,2011(10):93.
- [9] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国的核应急[N].经济日报,2016-01-28.
- [10] 王大中.21世纪中国能源科技发展展望[M].北京:清华大学出版社,2007:191.

On Basic Stages, Key Areas and Security in China's Nuclear Energy Development and Utilization

An Jiang-lin

(Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Dominated by nuclear power, the basic stages of comprehensive development and utilization of nuclear energy and the corresponding leading technology mainly include: Before 2020, most of the plants use the second generation large pressurized water reactor nuclear power technology, the new nuclear power units use the third generation nuclear power technology with independent intellectual property rights; In 2021-2030, acceleration of the fourth generation nuclear power technology research, development and industrialization, as well as the commercial application of independent intellectual property rights of fast reactor and its nuclear proliferation technology and revolutionary advancement in nuclear power technology can be all realized; In 2031-2050, there will be a massive use of the fourth generation nuclear power technology in order to achieve the goal of more “nuclear proliferation” and nuclear energy will become the pillar industry with high benefit, large-scale, slightly polluted and even zero pollution; After 2050, the era will meet the fulfillment of the commercial development and utilization of nuclear fusion and transform to a new one with the large-scale of development and utilization of hydrogen energy. The main strategic focus of the present and the future nuclear power development are the development of nuclear power, nuclear fuel reprocessing, nuclear heating, advanced nuclear technology research and development, nuclear equipment manufacturing industry, which help to form an advanced and perfect system of nuclear industry. The main security in nuclear power development is to improve nuclear safety science and technology. The security of the third generation of nuclear power plant is 10-100 times as the second generation reactor. The fourth generation nuclear power technology has become a cleaning industry with almost no final waste. In no case will nuclear power plant have any nuclear critical accident; By strict nuclear safety laws, regulations and criteria, and other standard systems, the nuclear emergency ability of the whole society will be enhanced.

Key words: nuclear energy; nuclear technology; nuclear fusion power plant; nuclear safety