

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.04.001

我国核电及核能产业发展前景

叶奇蓁

(中国核工业集团公司科技委, 北京 100822)

摘要: 从减排、能源结构调整、环境保护角度分析核电在我国能源结构和我国科技体系中的定位及核电发展的必要性, 根据我国运行核电站的实际情况和自主设计的先进核电站特性说明核电的安全性, 同时根据运行核电站放射性排放数据论述核电站对环境和公众不造成任何有害的影响, 并对核燃料循环、核废物对策和处理措施进行了论述。预测核电中长期发展情景, 通过评估核电及配套核燃料产业能力, 以及装备及相关行业发展情况, 表明我国工业基础能够支撑核电的规模化发展; 并反过来, 核电将促进相关行业大发展, 提高其技术水平, 高科技含量, 发展成高端产业, 有利于我国经济转型。

关键词: 核电; 核能; 核电定位; 规模化; 核电安全; 放射性排放; 核燃料循环

中图分类号: F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0018-04

Development and Prospect of Nuclear Power and Nuclear Energy Industry in China

YE Qizhen

(Committee for Science and Technology, China National Nuclear Corporation, Beijing 100822, China)

Abstract: This paper makes an analysis of the nuclear power position in China energy structure and science & technology system as well as the necessity of nuclear power development in the view of emission reduction, energy structure adjustment and environmental protection. Based on the situation of the existing power plants in China and the features of the independently designed advanced power plants, this paper shows the safety of nuclear power. A nuclear power plant will not do harm to environment and the public, according to the data of radioactivity release which is obtained from operational nuclear plant, and further discusses the nuclear fuel cycle and the treatment and management Strategies of the nuclear waste. Through the assessment of the capacity of nuclear power and supporting nuclear fuel industry as well as the situation of the equipment and related industry development, this paper predicts the medium and long term development of nuclear power, indicating that the industrial base of China has the ability to support the scale development of nuclear power. In turn, the related industries development will be promoted by nuclear power with the improvement of the technology level and high-tech content, thus developing into high-grade industries which contribute to the economic transition of China.

Key words: nuclear power; nuclear energy; nuclear power position; scale development; nuclear safety; radioactivity release; nuclear fuel cycle

核电是通过可控核裂变将核能转变为电能, 实现核能和平利用, 被称为 20 世纪人类的三大发明

之一, 使人类从利用化学分子能跨越到利用物理原子能的新天地。1942 年, 费米为首的科学家们在美国建立了世界第一座“人工核反应堆”, 实现了可控、自持的铀核裂变链式反应; 1954 年苏联建成了世界第一座试验核电站; 经过 60 多年的发展, 核电及配套的核燃料技术成为日益成熟的产业, 成为继火电及水电以外第三大能源, 水电资源大部分已得到开发, 核电是当前能够规模化、稳定提供能源并有效实现 CO₂ 及污染物减排, 替代燃煤电厂的清

收稿日期: 2015-11-15

基金项目: 中国工程院“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”项目(2015-ZD-09)

作者简介: 叶奇蓁(1934), 男, 浙江海宁人, 中国工程院院士, 中国核工业集团公司科技委副主任, 核反应堆及核电工程专家, 曾任我国自主设计秦山二期总设计师(e-mail) gang_su@126.com。

洁能源。经历福岛事故后，核电更加重视安全、进入全产业链可持续发展阶段，世界市场前景广阔，目前三代核电技术已成为发展的主流，四代核电开发亦受到重视，中小型模块化反应堆由于核能利用多样化、可适应分布式能源网络而受到广泛关注。

我国建立了完整的核科研和核工业体系。通过30年发展，我国核电产业已经初具规模，在运核电机组26台，总装机容量24.42 GW，世界排名第5；在建机组24台，总装机容量26.25 GW，占世界在建总装机容量的36%，居世界第一。

1 发展核电有利于减排改善环境，实现绿色低碳发展

我国经济社会发展对能源需求持续增长，面临着国内资源环境制约日趋强化和应对气候变化减缓CO₂排放的双重挑战。当前我国生态环境污染形势已极其严峻，近年来PM 2.5弥漫造成的雾霾天气已经成为威胁人民健康和降低幸福指数的重要杀手，治理雾霾已成为中国能源结构调整刻不容缓的战略任务。造成雾霾天气的主要原因就是工业燃煤、车辆燃油和供热等分散燃烧，要从根本上解决雾霾问题，呼吸到清洁的空气，就必须大幅度减少碳燃料的使用。鉴于核电是稳定、洁净、高能量密度的能源，发展核电将对我国突破资源环境的瓶颈制约，保障能源安全，减缓CO₂排放，实现绿色低碳发展具有不可替代的作用，核电将成为我国未来可持续能源体系中的重要支柱之一。我国核电发展坚持“安全高效”的方针，面临良好的发展前景。

中国是碳能源消耗大国，煤炭等传统化石能源在一次能源结构中占比过大；中国的CO₂排放量居于世界首位，来自国际社会的减排舆论压力很大，中国政府在2009年承诺在2020年单位GDP碳排放下降40%~45%的目标。为达到这个目标，我国能源结构需要实现低碳转型，到2020年中国非化石能源电力将占总电力的15%。核电从铀矿开采到废物处置全生命周期的每度电的碳排放量仅为2~6 g，与风能和太阳能发电相当，比煤炭、石油和天然气排放量低两个数量级。在全球碳减排的边际成本中，核能的边际成本远低于风能、太阳能、碳捕获及封存等技术的边际成本。

若核电能实现200 GW的装机，就相当于取代近 5×10^8 t标准煤，即替代约1/5的煤炭供给，极

大减轻传统化石能源的供给压力，减少近 2×10^9 t的CO₂排放，以及大量的SO₂、NO_x、可吸入颗粒物等污染物，显著改善我国的大气质量。此外核燃料不需要大规模运输，可以显著减少我国长期形成的“北煤南运”的运输压力。同时未来核能作为优质的一次能源，不仅可以用于大规模发电，还可以用来制氢，海水淡化，供热制冷，对于城镇化的能源需求、乃至开发燃料电池汽车都具有重要战略意义。

因此，规模化发展核电是必要的，国家在核电中长期发展规划中提出的目标：2020年实现运行58 GW，在建30 GW核电装机。工程院预测2030年实现0.15 TW，在建50 GW核电装机。目前在核电技术、核电装备及配套的核燃料产业方面具备了规模化发展的条件。纵观核电发展历史，美国在核电建设高峰期，每年核电同时建设达6~8台机组，个别年份甚至有10台的记录。

2 核电安全确有保障

我国核电安全标准与当前国际核电最高安全标准接轨，并持续改进，不断提高；我国核电自秦山一期机组投运20年来，在运机组安全水平进一步提升，未发生二级及以上运行事件(事故)；运行业绩良好，主要运行指标高于世界平均值，部分指标处于国际前列，核电厂工作人员照射剂量低于国家容许标准，核电厂周围环境辐射水平保持在天然本底范围内，没有对公众造成不良影响。

我国自主开发的华龙一号和CAP 1400压水堆机型，采用先进的三代核电技术，有完善的严重事故预防和缓解措施，全面贯彻纵深防御原则，设置多道实体安全屏障，实现放射性物质包容。三代压水堆核电机组采用双层安全壳，外层安全壳能够承受强地震、龙卷风等外部自然灾害，以及火灾、爆炸等人为事故的破坏与袭击，包括大型商用飞机恶意撞击，内层安全壳能耐受严重事故情况下所产生的内部高温高压、高辐射等环境条件，安全壳的完整性保障了实际消除大量放射性物质的释放。

诚然核电历史上发生过3次重大核事故。1979年发生的三哩岛核事故：该核电厂系美国早期的压水堆机型，事故起因是操作员误操作及设备故障，导致堆芯熔化，由于安全壳保持完好，有效包容了事故所产生的放射性物质，对周围公众没有产生严重的后果。

1986年的切尔诺贝利核事故：该核电厂的反应堆系石墨慢化水冷堆，没有安全壳作为放射性屏障，加上设计缺陷，存在瞬发超临界的潜在风险，事故起因是违反操作规程人为误操作导致瞬发超临界，造成大量放射性外逸。这种堆型仅在前苏联设计建造，切尔诺贝利核事故后已不再建设。

2011年的日本福岛核事故^[1]：日本福岛处于欧亚板块与太平洋板块“俯冲带”附近，历史上大地震和海啸频发，事故原因是极端外部自然灾害，超强地震和随即引起的大海啸叠加造成核电厂失去全部厂用电源，反应堆余热无法导出，致使堆芯熔化、氢爆和大量放射性释放。福岛第一核电厂是早期设计的沸水堆核电厂，其安全壳容积远小于压水堆，且堆内产生的蒸汽直接通向汽轮发电机组，因此可以说三道屏障不完整，一旦堆芯发生熔融事故，放射性物质有可能穿过第二、第三道屏障进入常规岛厂房，导致大量放射性外逸。应该看到，地震后反应堆立即停闭，专设安全系统和应急柴油发电机迅速启动，保证了反应堆的余热导出，只是1 h后随即而来的14 m海啸越过了挡浪堤，淹没了应急柴油发电机房和所有厂用电设施，才导致事故的严重发展。

三次核安全事故都是促进了核安全理念和技术提升，更好的推动核能技术进步和产业健康发展^[2]。福岛核事故后，各国组织了核电安全检查，国际原子能机构（IAEA）等国际组织推出了福岛核事故后的行动计划，我国核安全局制定了福岛核事故改进行动项及技术要求，全面实施，并在核安全规划上提出新建核电厂应从设计上实际消除大规模放射性释放，进而从根本上保障核电的安全，消除核事故对环境和公众的危害。

我国核电采用压水堆技术路线，无论从堆型、自然灾害发生条件和安全保障方面来看，可以坚信中国不会出现类似福岛和切尔诺贝利核事故。

3 核电是清洁能源

核电不仅不排放温室气体、有害气体、微尘外，对放射性流出物进行严格的处理和监控。按照国家环境保护法规，依据管理部门批准的排放限值，我国核电厂对放射性流出物的排放进行了严格的控制，对核电厂周围环境进行了有效监控。2013年运行核电厂放射性流出物的监察结果表明：我国

商业运行核电厂的放射性流出物均远低于国家标准值。例如，大亚湾核电厂气态流出物：惰性气体年累计排放量 9.65×10^{11} Bq，占国家规定0.138%；卤素年累计排放量 6.93×10^6 Bq，占国家规定0.028%；气溶胶年累计排放量 4.87×10^6 Bq，占国家规定0.128%；液态流出物：氡年累计排放量 3.85×10^{13} Bq，占国家规定17.111%；其余核素年累计排放量 1.81×10^8 Bq，占国家规定0.139%。秦山第二核电厂气态流出物：惰性气体年累计排放量 9.13×10^{11} Bq，占国家规定0.315%；卤素年累计排放量 6.48×10^6 Bq，占国家规定0.360%；气溶胶年累计排放量 1.29×10^7 Bq，占国家规定0.299%；液态流出物：氡年累计排放量 6.35×10^{13} Bq，占国家规定57.72%；其余核素年累计排放量 1.23×10^9 Bq，占国家规定2.181%。

核电厂工作人员的职业照射按国家规定，连续5年平均年有效剂量不超过20 mSv；任何1年不超过50 mSv。2013年数据表明：大亚湾核电厂平均个人剂量0.549 mSv，年度最大个人剂量13.345 mSv；秦山第二核电厂平均个人剂量0.385 mSv，年度最大个人剂量8.726 mSv；均远低于国家标准。

低中放固体废物^[3-4]亦受到严格的控制，规定每座核电厂年固体废物不超过50 m³。低中放固体废物在核电厂暂存后，运到永久处置场处置。上述固体废物目前还存储在核电厂，受到完全的监控。相关地方正积极按国家标准建设永久处置场。

内陆核电站由于采用冷却塔闭式循环带走余热，没有循环冷却水对放射性废液的稀释，《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》（GB 14587—2011，代替GB 14587—1993）提出了100 Bq/L的排放罐出口浓度控制值^[5]，以减少对江河稀释要求。事实上目前废水净化的技术已可净化到20~30 Bq/L，经处理过的水完全可以在工艺上复用，从而实现废水的“零排放”，或近“零排放”。

4 关于核废物的问题

每个核电厂每年卸出约20~30 t乏燃料，存贮在核电厂内部的乏燃料厂房中，乏燃料厂房存贮的容量可满足15~20年的卸料量和一个整堆的燃料。压水堆核电站乏燃料中含有：约95% ²³⁸U、约0.9% ²³⁵U、约1% ²³⁹Pu、约3%裂变产物、约0.1%次锕系元素。其中仅裂变产物和次锕系元素为高放

和长寿命放射性废物，其它均是可再利用的战略物资。我国实施闭式燃料循环的技术路线，提取乏燃料中的 U 和 Pu 作为快中子增殖堆的燃料。自主设计的我国第一座动力堆乏燃料后处理中试厂热试成功，正式投产；并正在规划自主建设我国首个商业规模的乏燃料后处理工程，为实现我国核燃料闭式循环奠定基础。我国已建成快中子实验堆，并投入运行；正在研发并建自主示范快堆，为开发第四代核电技术，充分利用核资源，为下一代核电技术发展奠定基础。

乏燃料中的次锕系元素可利用快堆或加速器驱动的次临界系统 (Accelerator Driven Sub-critical System, 简称 ADS) 来嬗变，使其变废为宝，ADS 具有较高的嬗变支持比 (与快堆相比为 12/5)，中子能谱更硬，安全性较好。我国正在开展 ADS 的研究。

高放废物的处置：裂变产物放射性核素含量或浓度高 (4×10^{10} Bq/L)，释热量大 (2 kW/m^3)，含有毒性极大的核素。占有废物体积的 1%，但占放射性总量的 99%。高放废物通过玻璃固化，采取三重工程屏障：玻璃固化体、废物罐、缓冲材料，用以阻水，防止核素迁移；然后进行与生物圈隔离的深地层埋藏。

可以说核电厂的乏燃料是严格受控的，不会出现任何安全问题。高放废物危害远小于煤电等废弃物，经玻璃固化和三重工程屏障处理，以及深地层最终处置不会对环境、人类带来危害。

5 我国核电已具备规模发展的能力

我国在核电总体设计、核岛设计、关键设备和材料国产化、先进燃料元件制造、数字化仪控系统开发等方面都取得重大进展^[6]。自主设计的三代核电“华龙一号”已开工建设，拥有完全自主知识产权，已出口巴基斯坦 2 台。在引进消化吸收 AP1000 核电技术基础上，自主研发的三代核电 CAP 1400 示范工程也即将开工建设。

通过实施国家重大科技专项，提高了核电装备行业的技术水平，主设备和关键设备大部分由国内供货，设备国产化率超过 85%。设备制造商的装备

水平属国际一流，三大动力集团均具备年供应 3~4 套核电装备的能力，加上近年来，火电发展减速，腾出更大的产能，可以说我国完全有能力每年建设 6~8 台核电机组，设备行业的发展为核电大国奠定了基础。

我国已成为世界上少数几个拥有完整核工业体系的国家，成功实现 U 浓缩离心机国产化，我国已建成完善的核电用锆材生产体系，自主研发的 CF2、CF3 核燃料元件，正在进行随堆考验。我国核电厂的核燃料供应完全立足国内。

核电的规模化发展不仅将促进能源发展，而且将拉动装备业、建筑业、仪表控制行业、钢铁等材料工业的发展，促进高科技及高端产业的发展，有利于经济转型。

参考文献：

- [1] 叶奇蓁. 从“福岛第一核电站事故”看我国核能利用的核安全 [J]. 物理, 2011, 40(7): 427-433.
YE Qizhen. The Fukushima Accident and Nuclear Power Development and Safety in China [J]. Physics, 2011, 40(7): 427-433.
- [2] 叶奇蓁. 后福岛时期我国核电的发展 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 1-8.
YE Qizhen. China's Nuclear Power Development After Fukushima Nuclear Power Plant Accident [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 1-8.
- [3] 叶奇蓁, 张志银. 我国核电厂放射性废物管理进展及挑战 [J]. 中国核电, 2010, 3(3): 194-199.
YE Qizhen, ZHANG Zhiyin. Progress and Challenges of Nuclear Power Plant Radioactive Waste Management in China [J]. China Nuclear Power, 2010, 3(3): 194-199.
- [4] 郑文棠, 程小久. 我国低中放废物处置相关问题研究 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 75-82.
ZHENG Wentang, CHENG Xiaojie. Research on Related Problems of Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal in China [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 75-82.
- [5] GB 14587—2011, 核电厂放射性液态流出物排放技术要求 [S].
- [6] 叶奇蓁. 自主发展核电产业 [J]. 军工文化, 2015(1): 1-2.

(责任编辑 张春文)