

清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF CLEAN ENERGY

全球核能产业 发展报告 (2017)

THE GLOBAL NUCLEAR INDUSTRY

DEVELOPMENT REPORT (2017)

国际清洁能源论坛（澳门）

主 编：苏树辉 袁国林 王 计

副主编：周 杰 徐玉明 韩文科



世界知识出版社

清洁能源蓝皮书

BLUE BOOK OF
CLEAN ENERGY

全球核能产业发展报告 (2017)

THE GLOBAL NUCLEAR INDUSTRY
DEVELOPMENT REPORT (2017)

国际清洁能源论坛（澳门）

主 编 / 苏树辉 袁国林 王 计

副主编 / 周 杰 徐玉明 韩文科

图书在版编目 (CIP) 数据

全球核能产业发展报告. 2017/苏树辉, 袁国林, 王计主编. —北京: 世界知识出版社, 2017. 11

(清洁能源蓝皮书)

ISBN 978-7-5012-5633-4

I. ①全… II. ①苏… ②袁… ③王… III. ①核能工业—能源发展—研究报告—世界—2017 IV. ①F416. 23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 275095 号

责任编辑 刘豫徽

责任出版 王勇刚

责任校对 张琨

书 名 全球核能产业发展报告 (2017)

Quanqiu Heneng Chanye Fazhan Baogao (2017)

主 编 苏树辉 袁国林 王 计

副 主 编 周 杰 徐玉明 韩文科

出版发行 世界知识出版社

地址邮编 北京市东城区干面胡同 51 号 (100010)

网 址 www.ishizhi.cn

投稿信箱 lyhbbi@163.com

电 话 010-65265923 (发行)

010-85119023 (邮购)

经 销 新华书店

印 刷 北京京华虎彩印刷有限公司

开本印张 787×1092 毫米 1/16 31 $\frac{1}{8}$ 印张

字 数 476 千字

版次印次 2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5012-5633-4

定 价 148.00 元

版权所有 侵权必究

《全球核能产业发展报告(2017)》

编委会成员名单

主 编：苏树辉 袁国林 王 计

副主编：周 杰 徐玉明 韩文科

编委会成员：（排名不分先后）

苏树辉 论坛理事长，全国政协委员，葡萄牙驻香港名誉理事，澳门博彩控股有限公司行政总裁

袁国林 论坛常务副理事长，中国长江三峡集团公司原副总经理

王 计 全国政协委员，中国经济社会理事会理事，中国东方电气集团有限公司原董事长、党组书记

毕亚雄 论坛副理事长，中国长江三峡集团公司副总经理

聂 凯 论坛副理事长，中国葛洲坝集团股份有限公司董事长

韩文科 论坛副理事长，中国经济社会理事会理事，国家发展和改革委员会能源研究所原所长、研究员

徐玉明 论坛理事，中国核能行业协会专家委员会副主任，原国家原子能机构副主任，国防科工委系统工程二司司长

周 杰 论坛副理事长兼秘书长，中国经济社会理事会理事

张松林 论坛理事，中广核资本控股有限公司党委副书记

尹向勇 中国广核集团有限公司研究中心研究员

黄 珺 论坛副监事长

Mycle Schneider 法国能源、核电政策国际独立咨询顾问

宋 梅 中国矿业大学（北京）教授，博士生导师

柴国旱 环境保护部华东核与辐射安全监督站，副主任

池雪丰 中核（天津）机械有限公司董事长

王 平 中国大唐电力集团核电有限公司总经理

白云生 中国核科技信息与经济研究院副院长兼核工业战略研究所所长

王晓峰 环境保护部核与辐射安全中心信息研究所所长

陈 荣 中国核能行业协会研究开发部主任

黄晓宏 武汉新能源研究院研发部负责人

王 焱 论坛秘书处项目官员

李维维 论坛秘书处项目官员

郭鹏超 中国矿业大学（北京）

前言

探索建立核电生态安全标准 是我国引领全球核电发展的历史使命

核电的长远发展，需要结合世情国情，洞悉时代发展洪流，研判核电安全的主要矛盾，才能破解安全发展的难题。当前我国已成为全球在建核电规模最大国，未来十年全球历史早期建设的第一批核电将迎来集中退役潮，我国在事实上已经成为全球核电工业的重要建设者、继承者、发展者，如何构建核电生态安全标准，补齐核电安全发展短板，已成为中国核电人不容回避的历史性课题。

一、全球核电发展处于新的历史起点

全球核电发展呈现三轮波动周期。20 世纪六七十年代核电出现了第一轮增长期，全球经济高速增长和能源供应短缺推动了核电快速发展，若干年全球核电一年的投产机组曾超过 30 台，随后受到三哩岛等核事故影响，核电发展放缓。20 世纪 90 年代末核电出现了第二轮增长期，对三哩岛、切尔诺贝利事故的反思，推动了核安全技术不断进步，安全监管日臻完善，气候变化与能源安全问题促使核电再次受到青睐，全球核电迎来新一轮发展期。日本福岛核事故引发了全球对核电安全的进一步思考，对核电安全技术及监管方式提出更高的要求，核电进入第三轮波动周期。

核电安全发展的历史，是一个问题不断暴露、又不断解决的过程。核电技术从最初关注工程设备，到规范人因操作，再到当前应对极端自然灾害，构成了核电技术不断发展的主线。过去一段时间，工程设备的可靠性不断增强，操作流程不断规范，程序性的人为操作不断被取代，推动了核电安全技术水平不断提升。今后如何妥善应对自然灾害，处理好灾害引起的“剩余风险”，将成为核电技术发展的重要方向。

在本轮发展周期内，核电的特殊性使得核电安全发展面临诸多挑战。核电是

高度敏感、重大事故影响深远，需要配套国家现代治理能力的清洁绿色的跨代能源。这种特殊性对科学决策水平、公众参与、安全监管等方面提出了更高要求。例如，政治决策与技术决策的考虑范畴存在差异，科学决策的定量依据支撑不足，核电科学决策水平有待提升；公众沟通缺乏共同的话语体系，过于专业的技术信息，难以转化为普通民众的安全感；可再生资源成本快速下降，加之核电安全监管层层加码，导致核电发展的经济性面临挑战；等等。

二、生态安全标准空白是核电安全发展面临的重大挑战

过去，美国核管会的安全标准曾发挥过重要作用。三哩岛事故后，人们发现核电安全的工程技术视角，难以有效缓解人们对不确定风险的恐慌，需要建立具备共识、可互参照的安全标准。为此，美国核管会创造性地提出了核电安全的两个千分之一目标：一是对核电周边个体，因核事故导致立即死亡的风险，不应超过全社会成员因其他事故导致同类风险总和的千分之一；二是对核电周边的个体，因核电运行所导致的癌症死亡风险，不应超过其他原因导致的癌症死亡风险总和的千分之一。在过去三十多年的发展中，基于两个千分之一目标框架下的安全标准体系不断成熟完善，为核电长期的安全发展提供了重要保障。

当前，两个千分之一标准已难以满足人们日益提升的安全需求。福岛事故后，这一标准的不足已愈加显现。从实践情况看，目前全球核电站的安全运行情况，均满足两个千分之一的目标要求，特别是福岛事故，并未出现因核辐射导致人员死亡的事件，所增加的癌症死亡风险仍在全社会可控的风险之下，但民众仍难以接受核电。也就是说，核电的发展，并未增加全社会个体死亡及诱发癌症的总体风险的千分之一，但是公众对核电的忧虑却未见减少。究其原因，三十多年前所设定的两个千分之一的安全标准，在当前难以满足人们日益提升的安全需要。对日本福岛事故的质疑包括对海洋生态的影响，而在我国内陆核电质疑声中，也有对长江生态影响的担忧。然而，有关生态安全的相关要求，却并未包括在两个千分之一的安全目标范围内。

更深层次的原因是，生态安全标准空白，已成为工业文明的重大短板，也成为核电发展面临的重大挑战。工业革命以来，各种矿物质资源开发及化学工业获得了繁荣发展，核电因其特殊性受到最为严苛的工业标准约束，促使核电工业水平不断提升，成为了人类工业文明的贡献者。然而，以人为中心的工业标准体系，对非人生态环境关注不足，生态安全标准严重缺失，导致大气污染、土地退化、物种灭绝等一系列的生态风险难以得到有效遏制。包括核事故在内的各种工业事

故，给人类的工业文明蒙上了一层阴影。其中核辐射因其难以感知的神秘性，加之普通公众易与军事核威慑相混淆，导致核电的安全风险在各种工业风险中，往往引起人们的更多关注。

生态安全标准空白，引发了一系列问题。人们关心核电对周围水体及水产品的影响，特别是担心核事故对生态的影响。然而基于传统工业安全标准的评估体系，难以有效度量相关生态影响，也很少涉及各类工业领域生态影响的综合比较。安全基准的缺失，使得安全描述的参照难以统一，公众对核电的信心难免摇摆。此外，由于缺乏定量的生态安全目标，安全标准提升的科学依据也显不足，导致一些安全设施层层加码，核电建设运营的成本不断攀高，其真实的效果也难以评估。上述问题不断传递并累积，最终进入核电决策，增加了核电决策的复杂性。

三、探索核电的生态安全标准是我国跻身世界前列的历史使命

我国有望在第三轮核电波动周期中，跻身全球核电发展第一梯队。历次波动发展期也是新老交替的历史窗口期。第一轮周期中，苏联、美国、英国的核电技术处于全球领先地位，属于核电发展的第一梯队。第二轮周期中，英国、美国等国由于能源供需变化和反核浪潮，核电发展停滞，而日本、法国、韩国由于能源资源匮乏，坚定发展核电，进入核电发展第一梯队。当前全球正处在第三轮周期中，核电技术梯队正在逐渐发生更替，俄罗斯、韩国的核电技术在全球市场仍然获得了较高的认可，我国也开始进入英国的核电市场。

构建生态安全标准是工业文明迈向生态文明的重要阶梯。迎战挑战，是文明升级的途径，经由外部挑战转化为内部矛盾，倒逼文明内部聚力短板，实现自我变革。在各类变革举措中，标准的建立，使得矛盾可以度量，有利于凝聚力量取得突破。建立生态安全标准，将为工业文明的自我变革奠定重要基准，成为文明转型的关键一步。任何一轮文明的诞生，往往是在最为困难环境下成功应战的结果。福岛核电事故将全球工业文明的短板，暴露在了更加突出的位置。从这个意义上讲，核电工业已被推到工业文明转型的历史前沿。

探索构建生态安全标准是中国这一代核电人的历史使命。至2035年基本实现现代化的征程中，我国将面临工业化、城镇化、环境治理三大历史任务，届时需要增加超过十亿吨标准煤左右的清洁能源供给，这个量超过德国及法国两国的能源消费总和。核电作为高密度能源的脱碳解决方案，是我国能源发展战略必争的重要选择。没有核电生态安全标准的要求，就难有核电的有序发展。建议在两个千分之一的安全目标基础上，进一步研究生态安全标准的第三个千分之一，建议

构想如下：“对于核电周边的生态系统，因核电发展所引发的生态安全风险，不应超过其他原因导致的同类风险总和的千分之一”。

建议在宏观思路，可考虑按照三步走路径，探讨构建“三个千分之一”安全目标框架下的核电生态安全标准体系：

第一步，聚焦人民群众的核心关切，择选典型评估对象，开展试点示范，建立核电生态安全标准的培育机制。在做好公众健康风险评估、放射性环境影响、热污染环境评价的基础上，进一步聚焦群众的核心关切，根据实际情况择选典型评价对象开展试点示范，扩展比较其他工业活动的影响，结合现有数据和事实，开展生态安全风险评估试点，初步建立以数据和事实为基础的可对话、可质询、可优化的生态安全标准培育机制。

第二步，丰富生态安全目标的内涵，加强评估能力和机制建设，构建核电生态安全标准的升级机制。在总结试点示范经验的基础上，丰富生态安全目标的内涵，有序拓展风险评估的领域与对象，通过规范安全评价导则等方式加强评估能力建设，通过信息公开、公众参与等多种形式，构建核电生态标准有序升级的更新机制。

第三步，夯实风险数据基础、完善生态风险评估体系，拓展建立核电生态保险和再保险体系，构建生态安全标准、核电技术、生态安全保险三者互动制衡的良性发展机制。随着数据及事实的不断累积，生态风险评估体系的不断完善，需择机考虑引入核电生态保险和再保险体系，大幅提升国家生态风险评估能力和风险防范化解能力，使之成为国家现代治理能力的重要组成部分。依托各类风险的综合比较，通过成熟的风险评估体系，将核电生态安全标准提升，传递到生态保险的浮动变化，反哺核电升级的技术投入，最终形成技术投入、标准提升、生态责任三者良性互动的发展机制。

总之，构建核电生态安全标准是一个助推工业文明向生态文明跨越的宏大历史性工程，建设初期切忌贪大求全、一蹴而就，要坚持安全与发展并重，坚持目标导向与问题导向，量力而行、尽力而为。

从更宏大的视角看，太阳能与风能本身均是来自于太阳内部的核反应活动，核能是人类能源的终极解决方案。每一代核电人都有其身处时代的历史使命。本次澳门国际清洁能源论坛，得益于会务组精心组织，将国内外核电人的智慧凝结在一起，并出版成书。愿以此为契机，引发深入思考，促成核电人进一步遵循规律、敬畏自然、直面问题、凝心聚力，不辱使命，共同为核电安全高效发展做出新的历史性贡献。

韩文科 康晓文

2017年11月8日

目 录



前言 探索建立核电生态安全标准是我国引领全球核电发展的历史使命	
.....	韩文科 康晓文 003

第一篇 总报告

图 1 2017 世界核能产业现状报告	
.....	Mycele Schneider & Antony Froggatt 等著 宋梅 等译 / 001

第二篇 中国专题报告

图 2 中国核电产业发展及未来展望	徐玉明 / 267
图 3 大力提升核安全监管水平 推进我国核安全治理体系 和治理能力现代化的实践与思考	柴国早 王晓峰 王桂敏 / 295
图 4 从环境公平角度审视内陆核电的环境安全	
.....	陈晓秋 侯杰 刘永叶 / 310
图 5 夯实核安全基础 提升核电社会公众认同	
.....	李勇 尹向勇 / 322

图 6 中国压水堆核电站乏燃料管理
与产业发展思路研究 白云生 石磊 张红林 / 336

图 7 中国新一代核电技术研发与中长期发展战略
..... 汪永平 张萌 / 353

图 8 中国核电装备制造业的现状与未来
..... 唐洪驹 张义 / 369

第三篇 国际专题报告

图 9 复兴与挑战：全球核科技人才教育培养体系与竞争力评价
..... 杨军 杨章灿 黄晓宏 / 377

图 10 世界和中国核电发展态势分析
——基于文献计量及专利分析视角 余翔 阳维 / 410

图 11 后福岛时代日本核能产业国家战略研究
..... 周杰 / 442

图 12 结语：中国正在积极应对核电转型升级挑战 苏树辉 / 478

Contents / 482

第一篇



总报告



2017 世界核能产业现状报告



序言

核电诞生在美国人因投掷原子弹而产生的集体歉疚中，在至少 20 年间，它曾是煤炭的“清洁”替代品，看来将永远满足我们所有的能源需求。1979 年三哩岛核电站反应堆的熔毁事故结束了核电欣欣向荣的局面，但核电之梦还在继续，并且仍然没有仔细考虑核电的负面影响。核电的反对者同样漠视正在改变的事实。他们极力忽略一个事实：许多心怀善意之人视当地空气污染和气候变化比核电危害更大。在那些年里，关闭一个核电站，确实意味着加重当地污染和温室气体排放。

关于核电的辩论与谈论宗教相似。争辩很少会建立在全部相关事实基础之上——每一方都以自己的视角持有理念，用特定事实支持自己的观点。鉴于这段历史，《2017 世界核能产业发展报告》或许是核电历史上最具决定性的文件。报告以详尽论述明确指出，辩论已经结束。核电已经被太阳能和风能所取代。这些可再生的、使用免费燃料的能源不再是梦想或是预测，现实是——太阳能与风能正在全球范围取代核能成为新电厂的首选。不管你最关心的是核电还是气候变化，答案都是一样的。现代的“爱迪生们”已经学会了经济地利用大自然母亲免费提供给地球的永恒能源。这份报告的价值在于其结论不再依赖于希望或观点，而是用事实说话。在一个又一个国家中，事实都是一样的。核电远未消亡，但它正在衰退，可再生能源正在跨越式发展。整个报告反映这样一个事实，在美国、德国、日本和法国，几乎每个国家——核电正处于衰退之中。不仅仅是具象征性的，日本政府已正式承认其增殖反应堆报废，而这座反应堆最初曾是核电的圣杯。最能说明问题的是：世界上没有任何一个电力市场竞争激烈的地方有核电站启动，只有在由政府或消费者承担成本超支和工程延误风险的地方核电才会被考虑。

本报告最具决定性的部分是最后一章——核电与可再生能源的发展对比。它揭示了自 1997 年以来，全球范围内可再生能源已发电量的千瓦小时数四倍于核电。或许媒体尚未详细报道这场革命，但它正在进行中。与核电相比，可再生能源是成本更低、更清洁、更安全的化石能源替代者。世界不再需要建造核电站以避免气候变化，当然也不是为了要省钱。如果您对这一事实有任何疑问，请阅读《2017 世界核能产业发展报告》。

大卫·弗里曼

（S. David Freeman）

目录

2017 世界核能产业现状报告……004

I. 引言……006

II. 全球综述……008

III. 建设时间……017

IV. 聚焦重点国家……028

V. 艰难的市场环境……108

VI. 能源部门发展展望……136

VII. 福岛核电站现状报告……148

VIII. 核能 VS. 可再生能源部署……162

附录 1. 区域和国家概况……176

附录 2. 日本反应堆重新启动前景……224

附录 3. 主要评级机构的评级标准……236

附录 4. 作者简介……237

附录 5. 缩写……241

附录 6. 世界核电发展现状……252

附录 7. 全球在建核反应堆……254

附录 8. 执行摘要与结论……257

2017 世界核能产业现状报告

摘要：

全球回顾（中国例外）

全球核电发电量在 2016 年上升了 1.4%，原因是中国增长了 23%，尽管核电在发电中的份额停滞在 10.5%（-0.2%）。

2016 年共有 10 座新核电反应堆启动，其中一半在中国。2017 年上半年有两座反应堆发电入网，一座位于中国，另一座位于巴基斯坦（由中国公司承建），后者是世界上第一台开建于福岛核事故之后并运行入网的机组。

2016 年全球新建动工核反应堆 3 座，其中两座位于中国，一座位于巴基斯坦（由中国公司承建），与 2010 年全球新建动工 15 座（中国 10 座）的情况相比下降明显。2017 年上半年全球仅有一座新建反应堆在印度开建，中国和世界其他国家都没有。

全球在建核反应堆数量连续 4 年下降，由 2013 年年末的 68 座下降到 2017 年年中的 53 座（中国 20 座）。

关停与建设延期

俄罗斯和美国 2016 年关停了部分核反应堆，瑞典和韩国也于 2017 年上半年将其最老的机组关停。

韩国新当选总统关闭了一座核电站，并暂停了另外两座核电站的建设。这使其本国核电产业的发展和出口希望陷入危险。

目前，有 13 个国家正在建造新的核反应堆，比 WNI SR 2016 报告中少了 1 个。随着项目管理高层卷入大规模腐败丑闻，巴西 Angra-3 反应堆的建设被放弃。

有 37 座反应堆的建设进度滞后，其中 19 座在去年进一步延误。中国也不例外，20 座在建反应堆中至少有 11 座出现了工程延期。

有 8 个在建核电项目已开工建设 10 年以上，其中 3 个已有 30 年。

《2016 世界核电产业现状报告》指出有 17 座反应堆计划于 2017 年启动。截至 2017 年年中，只有 2 座启动，而有 11 座至少要延期至 2018 年。

历史核巨头的破产 / 救助——核电企业的深度金融危机

在发现核电建设项目发生巨额亏损之后，东芝集团为其美国子公司——西屋电气公司申请破产，西屋公司是历史上世界最大的核电建设商。

在过去六年里，阿海珐集团累计亏损了 123 亿美元。法国政府已经向其提供 53 亿美元的纾困，并继续采取“拆分”策略。阿海珐集团 Creusot Forge 业务部的大规模质量控制丑闻进一步削弱了人们对核电产业的信心。主要核电公司的股价遭受侵蚀，信用评级机构调低了他们的信用等级。

福岛现状报告

福岛核事故发生六年后，日本政府开始解除撤离令，以限制飞涨的赔偿费用。灾难总成本的官方估计已从 1000 亿美元增加到 2000 亿美元。一项新的独立评估将灾难成本估计为 4440 亿 - 6300 亿美元（取决于水的除污水平）。只有 5 座反应堆已经重启。

可再生能源拉开与核能的距离

2016 年全球风能发电量增长 16%、太阳能发电增长 30%、核电发电量增长 1.4%。风能发电量增长 132 TWh、太阳能发电量增长 77 TWh，分别是核电 35 TWh 发电量的 3.8 倍和 2.2 倍。可再生能源发电量占全球新增发电量的 62%。

新的可再生能源击败了现有的核能。在智利、墨西哥、摩洛哥、阿联酋和美国，可再生能源拍卖创下了低于 30 美元 / MWh 的低价，而 2015 年美国核电站的平均摊分成本为 35.5 美元 / MWh。

I. 引言

从何谈起？自 2016 年 7 月发布《2016 世界核能产业发展报告》（以下简称 WNISR2016）以来，在核能产业内外已经悄然发生潜在巨变。

首先，在政治层面，一些重要（核电）国家发生了某种“政权更迭”。世界五大核能发电国中的三个国家的最高领导人——法国（新任总统埃马纽埃尔·马克龙）、韩国（总统文在寅）和美国（总统唐纳德·特朗普）均制定了与前任政府截然不同的能源计划。此外，日本首相安倍晋三最近进行了令人惊讶的内阁改组。

其次，在产业层面，有一些重大事件发生：世界上最大的老牌核电建设商东芝西屋和法国阿海珐公司相继破产；备受争议的英国欣克利角 C 核电项目在经历漫长等待后终于被政府批准；美国南卡罗来纳州 V. C. Summer 核电站，宣布停建，引起震惊。与此同时，售电商低价竞争策略将继续对全球核电站形成挑战。

第三，世界范围内可再生能源部署不断涌现，对核电带来巨大冲击。最能说明这一点的是中国的可再生能源发展。作为目前全球核电建设的领导者，中国在 2017 年上半年仅增加一座新的 1GW 核电站并网，而同期却有 24.4GW 太阳能发电量并网，另外还有一个装机容量为 10.5GW 装机容量的太阳能光伏。与仅仅五年前的 2012 年对比，德国的光伏发电量 2012 年全年增加 7.5GW 就已经创造了当年的世界纪录，由此预测：“到 2017 年底，世界太阳能光伏装机容量将媲美核能发电，并很有可能在 2022 年超过核能装机容量的两倍。”

新任政府在核能和能源部门将带来怎样的变革呢？马克龙政府郑重声明，法国将继续实施上一任政府的能源转型立法并进行路线规划，争取在 2025 年完成将核能发电份额从约 3/4 减到 1/2 的目标。毫无疑问，随着电力消费的停滞或下降，法国将关闭 58 个核反应堆中的 1/3 以上以达成此目标。

韩国新任总统文在寅在上任不到一个月时主持了韩国最古老核反应堆的