

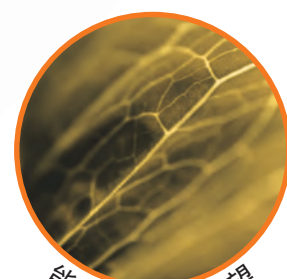


2050

2045

2040

2035



能源技术展望

技术路线图

核能

2015 年版



国际能源署

国际能源署(International energy agency, IEA)是一个自治机构,创立于1974年11月。其在过去和现在都具有两重使命:通过对石油供应的实际中断做出集体响应来促进其成员国的能源安全;为其29个成员国及其他国家提供确保可靠、廉价的清洁能源供应方法的权威研究和分析。国际能源署在其成员国之间开展全面的能源合作计划,每个成员国都有义务持有相当于其90天净进口的石油库存。

国际能源署的目标是:

- 确保成员国获得可靠、充足的各种形式能源供应;特别是,在石油供应中断时要通过维持有效的应急响应能力来实现。
- 促进在全球范围内推动经济增长和环境保护的可持续能源政策,尤其是要减少导致气候变化的温室气体的排放。
- 通过采集和分析能源数据改善国际市场的透明度。
- 支持全球能源技术协作,保障未来能源供应并减轻其环境影响,包括通过改善能源效率以及开发和推广低碳技术。
- 通过和非成员国、产业界、国际组织及其他利益相关者进行接触和对话找到全球能源挑战的解决方案。

经合组织核能署

经合组织核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)成立于1958年2月1日,目前一共有31个成员国:澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、墨西哥、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、俄罗斯、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚共和国、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。欧洲委员会也参与了核能署的工作。

核能署的任务是:

- 协助其成员国通过国际合作维持和进一步建立实现核能安全、环保、经济地用于和平目的所要求的科学、技术和法律基础。
- 提供权威评估,并在关键问题上建立共识,作为政府核能政策决策和经合组织在更广泛的领域诸如能源和可持续发展领域的政策分析参考。

核能署具体的职能领域包括核活动安全和监管,放射性废物管理,辐射防护,核科学,核燃料循环的经济技术分析,核法律和责任,以及公共信息。核能署的资料库为参与国家提供核数据和计算机程序服务。

在这些任务和相关任务中,核能署与位于维也纳的国际原子能机构密切合作,双方有一个合作协议,核能署还与核领域的其他国际组织合作。

经济合作与发展组织

经济合作与发展组织(Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD)是一个多国政府协力应对全球化带来的经济、社会、环境挑战的独特组织。同时,OECD在研究和帮助各国政府应对公司管理、信息经济、人口老龄化挑战等新的发展和焦点问题方面也走在前列。该组织为各国政府比较政策经验、寻求常见问题解决方案、识别优良实践和协调国内外政策提供了一个平台。经济合作与发展组织的成员国有:澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。此外,欧盟委员会也参与了经济合作与发展组织的工作。

经济合作与发展组织出版物内容广博,广泛传播该组织在经济、社会、环境问题上收集的统计资料和获得的研究成果以及成员国公认的协定、方针和准则。

前言

当前能源供给与消费的发展趋势是不可持续的。若不采取果断行动，到 2050 年与能源相关的二氧化碳（CO₂）排放量将翻番，而化石能源需求的增长将加剧人们对能源供应安全的担忧。改变当前的发展模式将引发一场能源革命，而低碳能源技术将在其中发挥至关重要的作用。为了大幅减少温室气体（GHG）的排放，需要提高能源利用效率、推广各种可再生能源、采用碳捕集与封存（CCS）技术、大力发展核能以及采用新型运输技术。这将需要每个主要国家和经济行业的参与。为了避免将来因技术选择失误而付出太多的代价，在今天做投资决定时，迫切需要对未来能源技术发展的方向有全面的把握。

尽快把政治见解和理论分析转化为具体行动，已逐步成为世界各国的共识。为了推动这一转化，国际能源署（IEA）正针对部分重点技术制定相应的技术路线图。通过明确加速技术变革实施所需的步骤，这些路线图将能够帮助政府、核工业界和投资者做出正确的决策——而这反过来也有助于整个社会形成更加科学的全民共识。

本路线图是 2010 年核能技术路线图的更新版本，同样由 IEA 和经合组织（OECD）核能署（NEA）共同筹备编写。自 2010 年以来，核能发展的格局已然发生了变化，诸多事件给核能的发展带来了影响：福岛第一核电站事故加剧了许多国家公众对核电安全的担忧，推动了随后对核电站的安全检查及新的安全标准的制定，以确保现有的和未来的核电站的安全水平得到提升；新建核电站正逐渐采用第三代反应堆技术；经济危机和金融危机削弱了能源需求，也让资金密集型基础设施项目的融资，特别是在开放的电力市场中融资变得更加困难。在制定了该路线图之后，NEA 正发起一项技术性很强的调查，来确定一些关键性的研究和开发工作，这些研究和开发工作可以帮助各国考虑使用先进的核能技术来减少对化石燃料的依赖。

每个国家都必须根据自己的国情来选择合适的能源结构。然而，核能在减少温室气体排放、电力生产竞争力和供应安全方面依然存在着一些根本性的优势。目前，在建反应堆的数量为 25 年来最高，其中中国在新项目建设方面处于领头位置。开发更多创新性的设计和先进的核燃料循环以满足新兴市场并提升核电站竞争力，再次成为关注的焦点。基于将全球气温的长期上涨控制在 2°C 以内的目标情景，本路线图描述了强调核能对未来低碳目标的潜在贡献的情景分析。这种情景估计并非是对未来的预测。

核能通过提供稳定的低碳基荷电力，可以在电力系统脱碳方面发挥关键作用。通过明确主要障碍，并提出克服这些障碍的建议，本路线图旨在为有意保持或发展核能技术的政府提供协助。为了核能的健康发展，本路线图着重强调了一些在未来十年内亟待采取的关键措施，以确保核技术拥有国家以及核电新兴国家发展安全的、公众认可的、经济的核能。

本刊在 IEA 执行干事以及 NEA 总干事的授权指导下出版发行。

Maria van der Hoeven
IEA 执行董事

William D. Magwood, IV
NEA 总干事

本刊是 IEA 和 NEA 合作努力的结果。它反映了 IEA 秘书处和 NEA 秘书处的意见，但并不一定代表各个 IEA 和 NEA 成员国本身的意见。IEA 和 NEA 未就本刊内容（包括其完整性或准确性）发表任何意见或保证，也不对本刊的任何使用和引用负责。

序

—中文版

当前，无论世界核电还是中国核电，都处在关键岔路口。一旦出现战略误判，就可能错失重要的脱碳电源，而一旦过度建设，也会带来财务风险及安全隐患。部分国家在未来较长时期的工业化及城市化进程，引发了对高密度能源的持续需求。气候变化问题推动人类能源进入后化石时代，对化石能源的约束越来越强。核电作为高密度的低碳能源，与可再生能源形成互补，将成为支撑人类低碳道路难以舍弃的脱碳电源。

核电的发展有着特殊的行业规律。核电是高度敏感、事故难以恢复，并需要配套国家现代治理能力才能有序发展的跨代际能源。世界各国过去不曾、未来也不会实现核电长期的稳定增长。在发展中，核电技术、产业、监管中间出现的矛盾不断外化、涌现，又不断解决的过程，构成了核电安全发展的内在规律。在核电每一次低潮与发展的轮回过程中，新兴市场都会出现新的发展梯队。

过去，发展中国家受到核技术封锁以及人才、技术、资金的限制，缺乏建设核电技术强国的环境。后福岛时代，这些后续的发展中国家有可能通过吸收各国的先进技术，走出一条符合核电特点的科技之路，解决工业化及城市化过程中对高密度低碳能源的需求问题。

国际能源署和核能署共同撰写的《2015 版核能技术路线图》，全面介绍了当前全球的核电发展进程，对核电区域发展情况进行了展望、分析了核电的减排贡献、研判了核电的投资情况，并最终从政府、工业界、研究机构、金融部门等不同角度提出了核电发展的里程碑和行动路线图。在中国核电发展的关键岔路口上，我感到有责任翻译该路线图，以期让我国核电界了解世界核能发展形势，认真思考适合国情的发展路径。

在翻译意向达成的过程中，IEA 中国办主任涂建军、Cecilia、国家发改委能源所韩文科、高世宪、张有生给予了大力支持。报告翻译过程中，北京世纪藤原科技有限责任公司完成基础性文本翻译，清华大学付文进行了大量细致的校核审稿工作，李明光修改了若干翻译错误，国家发改委能源所周大地给予了宝贵意见及大力支持，肖新建对关键用词给予了宝贵意见。中国核能行业协会陈荣提供了宝贵修改意见。任海聚提供了图形设计支持，国际能源署的樊俊、谢茜、AREVA 公司的 Ji Jinting 和 CHEN Yaqin 对报告翻译工作进行了细致的校核，BARBIERE Jane、BENNETT Simon、PAILLERE Henri 对报告中一些中英文词汇差异给与细致的解释，消除了不少翻译上的误解。在此一并感谢！

国家发展和改革委员会能源研究所康晓文

2015 年 5 月 15 日

目录

前言.....	1
序.....	2
目录.....	3
致谢.....	6
主要发现.....	7
未来十年内应采取的关键行动.....	8
第 1 章引言.....	9
1.1 路线图更新的目的.....	10
1.2 核能发展背景和路线图的范围.....	10
1.3 路线图流程、内容和结构.....	11
第 2 章 2010 年以来核能发展进程.....	12
2.1 2011 年 3 月 11 日发生的福岛第一核电站事故.....	12
2.2 2014 年年底核能发电及新建核电站情况.....	14
2.3 第三代反应堆的建设情况.....	15
2.4 现有反应堆的长期运营.....	16
第 3 章核能发展的区域性展望.....	18
3.1 OECD 欧洲.....	20
3.2 美国.....	21
3.3 日本和韩国.....	22
3.4 俄罗斯.....	22
3.5 中国.....	23
3.6 印度.....	24
3.7 中东地区.....	24
3.8 亚洲其他发展中国家.....	26
第 4 章至 2050 年核能发展愿景.....	27
4.1 修订后的核能发展目标（与 2010 年版路线图比较）.....	28
4.2 核能对减排的贡献.....	30
4.3 至 2050 年全球核能投资情况.....	30
4.4 区域核电成本假设.....	31
第 5 章核能技术的发展：行动和里程碑.....	32
5.1 反应堆技术.....	32
5.1.1 安全升级和长期运营.....	34
5.1.2 新型反应堆的开发.....	36

5.1.3	小型模块化反应堆 (SMR)	38
5.1.4	第四代反应堆	40
5.1.5	核聚变反应堆: 2050 年以后	42
5.1.6	核能非电力应用	43
5.2	核燃料循环	44
5.3	退役	47
第 6 章推动核能技术的部署:行动和里程碑		50
6.1	许可授权和监管	50
6.2	核安全	53
6.3	核能发展融资	55
6.3.1	电力市场	56
6.3.2	支持核电开发的融资计划	58
6.4	培训和能力开发	60
6.4.1	人力资源评估	62
6.4.2	核技术培训和教育的国际化	63
6.5	规范和标准、供应链的开发和国产化等事项	64
6.6	交流沟通和公众认可	67
第 7 章结论:利益相关者应采取的短期行动		70
附件		72
核能案例研究		72
缩写、首字母缩略词和计量单位		73
缩写和首字母缩略词		73
计量单位		74
参考文献		75

插图目录

图 1:	1955 年到 2014 年的核反应堆开建数量	15
图 2:	核电并网率以及达到 2D 情景目标所需的并网率	15
图 3:	6D 情景和 2D 情景各种技术对应的发电量	27
图 4:	2D 情景中各区域的核电装机容量	28
图 5:	2D 情景中电力行业的减排情况	30
图 6:	世界范围内在建反应堆的类型 (2014)	33
图 7:	核裂变反应堆技术的发展演变	41
图 8:	铀钚混合氧化物燃料 (MOX) 的制备	47

图 9: 日本的新安全标准	54
图 10: 核能部门及其职能的说明性分类	62

表目录

表 1: 不同地区核电发展特征总结	18
表 2: 2D 情景中需要的投资 (以十亿美元计)	31
表 3: 第三代反应堆设计范例	37
表 4: 小型模块化反应堆设计范例 (在建或近期有部署可能)	39
表 5: 本地化方面的进展	66

专栏目录

专栏 1: 核电站运营商之间的同业审查过程——WANO (案例 1)	14
专栏 2: 第三代反应堆建设项目的经验教训 (案例研究 2)	16
专栏 3: 一体化建筑工程模型, 这是一个被证明有效的工业模式, 可用于优化核电站的设计、 施工和运营 (案例研究 3)	17
专栏 4: 关于国家核能基础设施建设的 IAEA 里程碑方案—阿联酋经验 (案例研究 4)	25
专栏 5: 《2015 能源技术展望》6D 情景和 2D 情景	27
专栏 6: 核电站延长运行 (超过 60 年) 研究 (案例研究 5)	36
专栏 7: 核聚变——远期低碳电力来源。	42
专栏 8: 瑞典地下深埋处置场安装启用的进展情况 (案例研究 6)	45
专栏 9: 乏燃料回收利用 (案例研究 7)	46
专栏 10: 德国核电站的退役 (案例研究 8)	49
专栏 11: 监管机构间的国际合作: 多国设计评估项目 (案例研究 9)	51
专栏 12: 芬兰的环境影响评价 (案例研究 10)	53
专栏 13: 日本增强的新安全标准 (案例研究 11)	54
专栏 14: 美国佐治亚州 Vogtle 核电站新机组的融资情况 (案例研究 12)	57
专栏 15: 阿库尤 (Akkuyu) 核电站的“建造-拥有-运营”模式 (案例研究 13)	60
专栏 16: 英国的核技能评估 (案例研究 14)	63
专栏 17: 建立合格的第二代和第三代反应堆技术供应链: 中国的重型部件生产制造案例 (案 例研究 15)	65
专栏 18: 在工业发达国家为新建项目做准备: 供应链调查 (案例研究 16)	67

致谢

本刊由国际能源署能源技术政策司和核能署的核发展司编写。可持续能源政策和技术理事会主任 Didier Houssin、科学与发展部副主任 Thierry Dujardin 以及核发展部前主任 Ron Cameron 为本路线图提供了重要的信息和指导。Henri Paillere 和《能源技术路线图》项目协调员 Cecilia Tam 是本路线图的主要作者。许多在 IEA 和 NEA 工作的同僚为本路线图提供了重要帮助，尤其要感谢的是 Marco Baroni、Amos Bromhead、Manual Baritaud、Marco Cometto、Rebecca Gaghen、Antoine Herzog、Uwe Remme、Maria-Elena Urso 和 Robert Vance。

本工作得到了政府、核工业界和其他特别支持开展核能案例研究的核能专家的通力合作。笔者在此感谢以下提供了案例研究的专家：Ambassador Hamad Alkaabi、Steve Bennett、Didier Beutier、Natalie Bonilla、Yaqin Chen、Didier Cordero、Veronique Decobert、Tristram Denton、Andreas Ehlert、Daniela Ferraro、Japan Ministry of Economy、Trade and Industry、Grigory Kazakov、Milko Kovachev、Laurent Lavie、Oscar Mignone、Fabien Lagriffoul 和 David Shropshire。

最后 IEA 和 NEA 对以下为作者提供了素材和路线图评论的专家表示感谢：Lyudmila Andreeva-Andrievskaya、Jorma Aurela、Tom Blee、Daniel Brady、Jerome Brueziere、John Cheng、Zaf Coelho、Matthew Crozat、Marton Csordas、Matthew Deady、Marc Deffrennes、Giles Dickson、Ian Emsley、Alberto Fernandez、Patrick Foo、John Gross、Sylvain Herberg、Tomasz Jackowski、Barry Kaufer、Hisham Khatib、Theo Klomberg、Doug Koplow、Miroslaw Lewinski、Yanfei Li、Elizabeth Lisann、Peter Lyons、Paul Murphy、Ana Picado、Christian Rengifo、Holger Rogner、Oliver Rooke、Assad Saab、Cornelia Spitzer、Nobuo Tanaka 和 Anders Wik。IEA 和 NEA 同时还希望向在香港亚洲核能商务论坛上三次研讨会的参与者表示感谢，感谢与会者做出的贡献。这些参与者人数过多，就不再一一列名。

笔者还想感谢 Janice Griffiths (NEA) 对草稿进行的编辑，以及在 IEA 出版单位工作的 Astrid Dumond、Bertrand Sadin 和 Therese Walsh，尤其是 Muriel Custodio，感谢他们在设计图和图形设计方面提供的支持。

有关此文件的更多信息，请联系：

TechnologyRoadmapsContact@iea.org 或 henri.paillere@oecd.org

主要发现

- 核电是 OECD 成员国低碳电力的最大来源，2013 年核电占经合组织成员国总电力供应的 18%，占全球总电力供应的 11%，在全球范围内位居第二。在基于《能源技术展望：2050 年核能发展方案与策略》（IEA，2015）2°C 情景（2DS）¹ 的新版核能发展路线图中，核能依然被视为能源领域减排至关重要的一部分，同时，核能还可以改善能源供应的安全状况、支持燃料多样化，并以稳定的生产成本进行大规模电力生产。
- 在该 2D 情景中，2050 年全球总装机容量将从目前的 396 百万千瓦（GW）水平提高到 900 百万千瓦（GW），增长超过一倍，届时核能发电量将占全球总发电量的 17%。虽然该数据低于 2010 年路线图中的 1200GW 和 25% 的总发电量份额，但这依然表明核工业将迎来巨大的增长。
- 福岛第一核电站事故的发生，对众多国家核能的短期前景造成了影响。尽管该事故并没有导致直接的辐射致死伤亡，但是引发了人们对核电站安全性的担忧，使得公众对核电站的接受度下降，并使少数一些国家改变了其能源政策。伴随着一场导致众多国家能源需求下降的经济危机和一场使得资金密集型项目出现融资困难的金融危机，在过去的四年中，核电站的总开工建设量与并网率双双下降。
- 然而从中长期来看，核能的前景依然光明。2014 年初总共有 72 台在建核电机组，为 25 年内之最。根据该 2D 情景，中国的核电装机容量将从 2014 年的 17GW 增长到 2050 年的 250GW，为增长速度之最，届时中国将占据全球核电装机容量和全球核电发电量的 27%。其他处于增长中的核电市场还包括印度、中东和俄罗斯。根据 2D 情景中的预测，除了韩国、波兰、土耳其和英国以外，大多数 OECD 国家的核电装机容量将会下降或保持不变。
- 核电安全依然是核电行业最受关注的议题。虽然核电安全的首要责任在于核电站运营商，但监管机构依然在这方面发挥重要的作用，以确保所有的运营活动满足最高安全级别要求。福岛第一核电站事故的经验教训证明了强有力的、独立的监管机构的重要性。我们必须在核能行业（运营商和产业，包括供应链以及监管机构）的各个层面提倡安全文化，尤其是对核电新兴国家而言。
- 各国政府有责任提供一个长期稳定的、可持续发展的投资框架，使资金密集型项目能够得以开发，并为所有低碳技术制定合理的长期电力价格。各国政府应继续支持核电技术的研究和开发（R&D），特别是在核电安全、先进核燃料循环、核废物管理以及创新性设计等领域。
- 核能属于一种成熟的低碳技术，将向着安全水平更高、电力输出功率更大、规模经济更好的趋势发展。此发展趋势将导致第三代核反应堆的成本相对于前两代有所上升，相应的标准化的某种堆型的第 N 个核电站（NOAK）的性能和经济性都会更好。诚然，这些还需得到进一步证实。
- 小型模块化核反应堆（SMRs）可以向较小的电网系统以及在不适于建设大型核电站的独立市场中提供电力，因而大大拓展市场范围。这些模块化特性也可提高核电的经济性。

¹2°C 情景描述了各种能源如何发展，才能实现 2050 年 CO₂ 排放量降至 2009 年一半，使全球升温长期控制在 2°C 以内。详细信息见专栏 5。

未来十年内应采取的关键行动

为了使核能发展达到 2D 情景中的部署目标，在未来十年中，每年并网电量的增速应从 2014 年的 5GW 提高到 20GW。在未来的十年中，只有采取以下措施才能够保证如此高速的增长：

- 我们必须充分了解到核能的贡献——提供有价值的基荷电力，为电网提供重要的辅助服务，并提高能源供应的安全性。因此，检查电力市场的部署极其重要，确保为新建核电机组提供与其他低碳技术同等有利的投资框架，并确保核电站的有效运营。
- 承建厂商必须证明其有实力按照预算及时地建好电站，并有能力削减新设计的成本。从近期首堆建设（FOAK）中总结的经验教训将至关重要，包括项目管理和规划、人力资源配置、供应链建立、资质证明和监督，以及反应堆设计、施工的简化和优化等方面的经验教训。
- 我们需要加强标准化工作，统一规范、标准以及监管要求，并简化监管许可授权流程，以降低成本、改进新建核电站的规划和性能。与此同时，核工业界必须不断提高核设施建筑物、系统和部件的质量保证和控制水平，并在整个核电行业、整个供应链、供货商、公共事业以及监管机构等方面加强核安全文化的教育。
- 必须加强监管机构以及核电站运营商之间的信息交流和经验分享，以提高整体安全性和运营业绩。
- 首次开发利用核电的国家，必须首先建设好一些必要的基础设施，然后再启动核能发展规划。对工作人员开展能力建设，进行培训、教育，使其能够胜任本职工作，对核电站的长期运行和管理监督来说也十分必要，这需要长期的计划。
- 还必须加强一些能够提升核电公众接受度的行动举措。这些措施包括在后福岛时代对现有的核电站进行安全升级，并向公众证明核能监管机构是强有力的、独立的。同时，这还意味着需要改善对公众的宣传，向公众提供真实、透明的信息，告知其核电的风险和好处，以及它在能源安全、经济性、缓解气候变化以及改善空气质量方面的作用。
- 尚未最终确定其自身核废物管理战略的政府也应当立刻行动起来。我们推荐使用地下深埋处理法（DGD）来处理高放射性废物。如果地质条件和安全状况允许且经济可行，政府最好在本国境内实行核废物的 DGD。另外，也可以考虑使用区域性的解决方案，即利用其他国家计划使用的、或正在使用的 DGD 场所来管理核废物。长期规划、政治承诺和地方社区的积极参与是这一战略的核心内容。

第 1 章引言

自 IEA/NEA2010 年发布《核能技术路线图 2010 版》以来，许多事件对全球能源行业以及核能发展的前景产生了重大影响，包括 2011 年 3 月发生的福岛第一核电站事故、在 2008-2010 年期间发生的对众多工业国家造成了冲击的全球金融危机和经济危机，以及电力市场和碳市场的衰败。福岛第一核电站事故对公众舆论和将核能作为能源供给的总体接受度造成了不利影响，导致一些国家制定政策逐步淘汰核能；这场金融危机带来了新的金融监管条例，使得诸如新建核电站之类的资本密集型项目的融资比过去更加困难；随之而来的这场经济危机使得电力需求下降，再加上可再生能源得到强有力的政策支持，导致众多 OECD 成员国出现了电力行业产能过剩的情况。此外，在开放的电力市场中，缺乏或未能有效地实施碳定价和补贴替代技术，加上电力批发价格的下跌，也使得核电行业的投资吸引力下降。

同时，非常规天然气和石油技术的快速发展使得世界某些地方对新能源技术的开发需求变得不那么迫切。例如，美国廉价的页岩气在该国某些特定地区大大减少了电力行业的碳排放量，并降低了电力价格。因此，美国的煤炭需求和煤炭价格双双下降。美国煤炭出口随之增长，主要出口到了煤炭消耗增加的欧洲，这些出口的煤炭在一定程度上弥补了损失的核电装机容量（例如在德国的情况）。尽管出现诸多额外的挑战，核能依然被证明是低碳基荷电力的一个重要来源，并且，有很多国家在他们的国家能源战略中重申了核能的重要性。

为了达到在本世纪末将全球气温上升限制在 2°C 以内这一目标，到 2050 年全球能源相关的碳排放量需要减半。这就要求对能源的生产和消费模式进行前所未有的转变。要实现这一转变，就需要大量的低碳能源技术，包括各种各样的可再生能源技术、能源效率提升技术、先进的交通工具、碳捕集与封存技术以及核能技术。尽管政府承诺实现这一目标，目前在能源领域依然缺乏转变所需的具体行动，同时，包括核能技术在内的诸多技术都没有步入正轨，不足以支撑 2°C 这一远期目标的实现。

1.1 路线图更新的目的

在 2010 年发布核能技术路线图之时，有 16 座新开项目正在施工，这一数字是 1985 年以后最高的，当时许多人都期待着“核能复兴”。然而，福岛第一核电站事故对很多国家的中短期核能发展都造成了直接的影响，在首版路线图发布四年以后，IEA 和 NEA 对核能路线图进行了更新，在其中考虑了近期核能技术发展所面临的挑战。

本次更新核能路线图的目的在于：

- 概括核能技术发展的现状以及为满足新的安全需求同时提高经济效益而有必要开展的额外的研发工作；
- 对核能在低碳能源体系中扮演的角色进行新的阐述，把各个国家核能发展政策的改变、当前核能以及其他低碳电力技术的经济性纳入考虑范围；
- 找出为达到路线图目标而加快核能技术发展可能遇到的障碍，并明确应采取的行动；
- 分享在核电安全和监管、核燃料循环前后端操作、施工、核电站退役、融资、人员培训、能力建设和公众沟通等方面的经验教训和良好的操作习惯。

1.2 核能发展背景和路线图的范围

核能目前依然是 OECD 成员国低碳电力的最大来源，也是世界范围内低碳电力的第二大来源（第一大低碳电力是水电²）。我们必须意识到核能是现在和未来的重要的脱碳能源，并且，其重要程度应当与其他低碳能源相当。作为一种被证明能够提供稳定电力的成熟技术，核能未来可在世界上很多地方的能源系统中发挥关键作用。但是，核能在很多国家的公众接受度大大下降，即便自 2011 年以来有所恢复，但大趋势并未改变。与此同时，核电作为巨大资本密集项目，融资困难重重，使得核电开发变得愈加困难。

本路线图主要关注 IEA 《2015 能源技术展望》（ETP 2015）2D 的核能发展愿景，以及核能对能源体系脱碳的贡献。ETP 2015 指出，全球核电总装机容量达到 930GW 才能支持能源体系的转型过渡。虽然这个目标小于 2010 版路线图中描述的愿景，但是相对于当前 396GW 的核能装机容量而言，要实现这一增长对政府和核工业界来说依然是一个艰巨的挑战。

²译者注。

本路线图主要集中于核裂变发电技术，虽然核能在热电联供、集中供暖、氢气生产和海水淡化等其他能源应用领域的潜力巨大，但是在本路线图中所确定的行动和里程碑式目标主要集中在电力行业。在本路线图的技术发展章节中，仅对其他能源应用情况进行了简单描述。虽然从长期来看核聚变是一项前景很好的技术，但是在本路线图中并没有涉及，因为核聚变技术在 2050 年以前都不可能投产发电。

1.3 路线图流程、内容和结构

本路线图的编制得到了来自政府、核工业界、研究机构、学术界和非政府组织的大量利益相关方的支持。IEA 和 NEA 举办了三次专家研讨会，为本路线图的制定提供材料，其中有两次研讨会由 IEA 在巴黎举办，而另外一次在香港举办的研讨会主要关注核能在亚洲的发展。本报告中的主要发现和建议切实反映了三次研讨会中的讨论内容和关键信息，以及在本路线图起草和审校之时所搜集到的其他材料。

本版路线图对 2010 年以来核能发展的情况进行了更新，并突出强调了核反应堆的技术发展需求，以及核燃料循环前后端的各个事项，其中包括核反应堆退役。在本报告中，还谈到了标准化、统一规范和标准、发展全球和本地供应链、质量保证和当前新建设项目反馈经验的整合等行业事项。核电新兴国家，尤其是在中东和东南亚地区的核电新兴国家都期待在核能发展项目的增长中获得较大的份额，因此本路线图还特别关注了在这些国家中核能得以发展的条件。已知的在核电发展中存在的障碍包括融资困难，福岛第一核电站事故之后公众接受度下降、安全监管提升所导致（部分地）的成本上升，人力资源能力建设以及缺乏有利的能源政策和电力市场激励措施。

在众多核能利益相关方的帮助下，本路线图给出了案例研究，以帮助解释说明核能发展过程中得到的经验教训。我们在路线图的文档中对这些案例研究的内容进行了总结，您可以在附件 A 中得到这些研究内容的完整版本³。这些案例研究旨在为本路线图中所给出的建议和所提议的行动提供额外的视角和实践上的支持，涵盖从新建项目中得到的经验教训、在核电站退役和核废物管理中的最佳做法、建立高放射性核废物的地质处置库、融资、教育和技能训练计划以及供应链的设立和巩固。同时还包含了运营商和监管机构之间的同业审查所能带来的好处：同业审查可以分享知识经验，提升核电站的安全性。

³<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-nuclear-energy.html>

第 2 章 2010 年以来核能发展进程

在 2010 年 IEA/NEA 发布《核能技术路线图 2010 版》之时，核电行业的发展经历了所谓的“核能复兴”。在 2010 年前的十年间，人们对核电兴趣不断增加的原因有二：一是对电力行业温室气体排放以及能源供应安全的担忧；二是需要以稳定的生产成本获得经济实惠的基荷电力供应。然而，这一趋势在 2011 年明显放缓，这很大程度上是由于当年 3 月份发生的福岛第一核电站事故所带来的影响，其对几个国家的核能公众接受度以及核能发展政策造成了冲击。其他原因还包括 2008-2009 年金融危机的余波未消，以及随之而来的经济危机，导致贷款机构的融资能力下降，电力需求因经济危机影响也下降了。在日本核电站事故发生三年多以后，全球核能发展情况正逐步改善，新建核电站的数量再次上升。然而，核电站的并网率依然太低，无法满足 2D 情景中 2025 年核电发展的目标（IEA，2014）。新版路线图旨在确定有效措施，使核能发展能够满足 2D 情景目标。

2.12011 年 3 月 11 日发生的福岛第一核电站事故

福岛第一核电站事故是由里氏 9 级的东日本大地震所导致，这次地震是日本有地震记录以来最强烈的地震，随之而来的海啸袭击了该核电站。该核电站的 1、2 和 3 号机组在事故发生之时正处于运行状态，在场外电源供应切断的情况下应急发电机组开始工作，使反应堆在地震发生后得以安全停堆。当海啸袭击电站时，大部分应急发电机组都失效了，反应堆厂房底部被海水所淹没。因此，反应堆的余热导出功能失效，导致了更严重的事故发生，在反应堆厂房遭到部分损坏以后，堆芯熔毁，氢气产生（随之发生爆炸），放射性物质被释放到环境中。

该事故是自 1986 年切尔诺贝利事故以来最严重的核泄漏事故，在国际核事件等级表（INES）中被列为七级，跟切尔诺贝利事故属同一级别。与在乌克兰发生的切尔诺贝利事故不同的是，在福岛核事故中，成千上万的群众在大部分放射性物质进入环境之前就已经从核电站的附近地区撤离，并得到了保护。联合国原子辐射影响问题科学委员会在 2014 年发布了福岛第一核电站事故放射性后果的最终报告（UNSCEAR，2014），根据其中的总结数据，此次事故所释放的放射性物质大致为切尔诺贝利事故的 10%~20%。虽然地震和海啸事故导致了一些伤亡情况，但是没有出现因过量辐射照射导致的死亡者。福岛第一核电站周边大范围地区受到放射性尘埃的污染，并且规定

的极低辐射剂量标准使得被撤离人员无法返回他们自己的村庄和家园。日本已经开展了一项耗费数十亿美元的“救赎”计划来净化环境，但是这将需要数年时间来完成，此后人们才会被允许返回家园。同时，福岛第一核电站的退役工作正在进行之中，以防止放射性物质再次从被损毁的反应堆中释放出来。

尽管福岛第一核电站事故所造成的死亡人数非常有限，但全世界都关注该事故所带来的后续影响，人们对核电的安全性深表担忧。在国家和国际层面上，人们都已经开始采取行动以评估极端外部事件对核设施运行的安全性的影响，包括对现有反应堆、在建反应堆和其他核燃料循环设施的综合安全检查（在欧盟被称为“压力测试”）。这些检查对核电站设施的安全裕量进行了重新评估，主要关注反应堆应对多重外部事故挑战（如福岛第一核电站事故经历过的安全功能丧失，包括反应堆堆芯冷却措施的丧失等）的能力，或者反应堆应对严重事故的能力。

这些检查检验了基准设计假设的合理性，以及应对超设计基准的事故的预设方案。评估工作由运营商在国家相关监管机构的指导下开展。随后国际监管机构和同行也对这些评估工作进行了检查，例如，欧洲核能安全管制机构（ENSREG）对在欧盟成员国以及邻近国家（瑞士、土耳其和乌克兰）的设施评估工作进行检查，或者应国际原子能机构（IAEA）的要求进行检查。根据这些安全评估工作，人们发现绝大多数核电站可以继续安全运行，但是有必要做一些安全升级工作，以提升核电站应对极端或多重外部事故影响的能力。目前，运营商们正在进行这些安全升级工作，并向国家监管机构报告。

在该事故发生短短几个月以后，《IAEA 核安全行动计划》就被 IAEA 理事会采用，并随后在 2011 年 9 月的 IAEA 大会得到一致的认可。该行动计划的最终目标是通过 12 项有针对性的行动来提升全球核安全性，这 12 项行动用于解决同业审查、应急准备和响应、监管机构和运营商有效性以及安全标准，尤其是安全评估方面的问题。

IAEA 即将完成《IAEA 福岛核电站事故报告》（将于 2015 年发布）。在其 2013 年发布的《OECD/NEA 核能安全响应及经验教训》中，描述了 OECD 成员国及 NEA 所采取的即时行动和后续行动。该报告就提高核能的安全性给出了一些关键信息和建议。运营商们同时也正从该事故中吸取经验教训，互相分享信息和最佳的操作实践方式，并且接受同业审查，特别是由世界核电运营者协会（WANO）执行的同业审查（见专栏 1）。

专栏 1：核电站运营商之间的同业审查过程——WANO（案例 1）

WANO 将世界各国的商业核电站运营商们集中到一起，以最大可能地提升核能安全标准。WANO 帮助其 130 个成员实现最高水平的运营安全和可靠性。WANO 将安全作为唯一目标，帮助运营商们进行有效的沟通以及公开的信息分享，以提高所有运营商的运行水平。

在过去的 25 年中，WANO 主要通过以下四个核心规划帮助核电站运营商：

同业审查：通过组织外部独立团队对运营商的运营情况进行深入客观的分析，这些同业审查可以让 WANO 的成员将其运营表现与那些标准卓越的运营情况进行比较。

运营经验：WANO 会向其成员通报其他核电站所犯的错误或出现的事故，使他们能够采取相应措施以防止类似的事件再次发生。成员们分享他们的运营经验，让其他运营商受益。

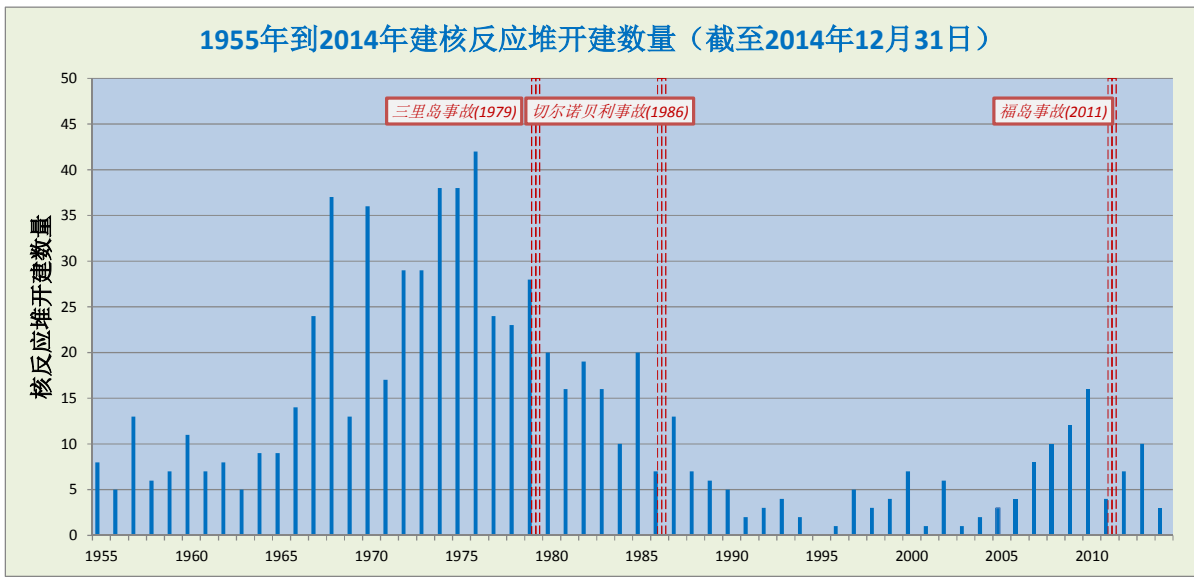
技术支持和交流：这个规划包含很多方面，其中包括应某核电站或机构要求而开展的技术支持任务，使 WANO 的成员可以互相帮助以解决发现的问题或难题。

专业技术开发：为 WANO 成员提供了一个平台，以提升他们的专业知识和技能，从而能够提前处理潜在的安全隐患。

2.2014 年年底核能发电及新建核电站情况

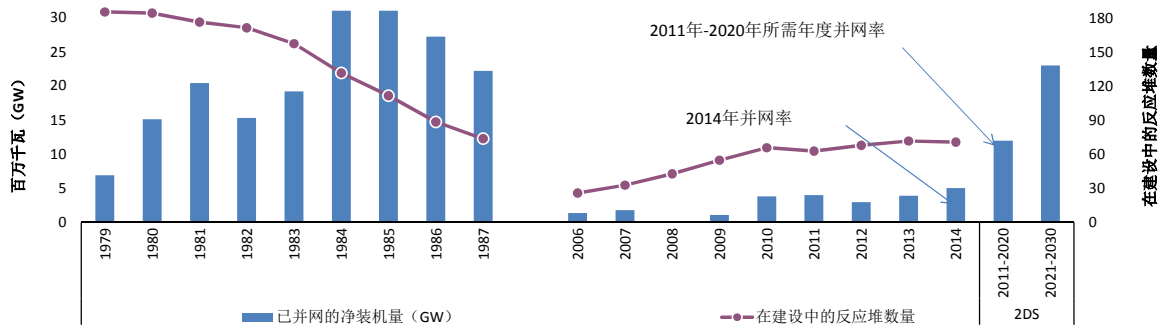
2013 年，全球核电发电量下降至 2478 太瓦时（TWh），比 2010 年降低了 10%，其根本原因在于德国永久关停了 8 座反应堆，而日本可运行的反应堆在 2013 年的大部分时间处于停产状态。从 2013 年 9 月到整个 2014 年，日本的 48 座可运行反应堆都处于闲置状态。2013 年至 2014 年，核电装机容量稍有上升，达 396GW（总装机容量），在 2013 年尚有 10 座新核电站开建，但是在 2014 年仅有 3 座（参见图 1）。在 2014 年初有 72 座核反应堆在建，创历史记录，但是就并网情况而言，当年轻有 5GW 的核电产量并入电网（2013 年是 4GW），远比 12GW 低，在接下来的十年中每年需要并网的核电产量达到 12GW 才能在 2025 年实现 2D 情景目标。

图 1：1955 年到 2014 年的核反应堆开建数量



资料来源：IAEA 核反应堆信息系统（PRIS）。

图 2：核电并网率以及达到 2D 情景目标所需的并网率



资料来源：IAEA PRIS 数据库、IEA 和 NEA 数据分析

2.3 第三代反应堆的建设情况

建设核电站项目是复杂的大型项目，涉及大量的供应商、建筑工人和高级技工，这需要有强大的建筑工程管理能力。核电项目同样会受到严格的监管和政治管制，并需要得到政策批准。因此，有很多因素会导致新建项目的延误和预算超支。第二代核反应堆技术完善、具备成熟的供应链和建设规划体系，而第三代核反应堆的设计可能会更复杂，从第二代向第三代转变的过程中，核工业可能会面临一些额外的挑战。一些首台机组建设（FOAK）引起的工程延误和成本超支现象影响了公众对核电的接受度

以及投资者的信心。行业内十分清楚“按时、按预算”地交付工程的能力必须得到提高，所有供应商都应从 FOAK 项目中吸取经验教训，以优化反应堆的设计、提高供应链的能力和品质、改进项目调度和管理。

因为第三代反应堆相对更复杂、安全性和运行性能比二代反应堆更高，可能人们普遍认为第三代反应堆的建设周期要比第二代反应堆更长，但是事实上有些第三代反应堆的建设周期在所有的反应堆的建设周期中是最短的（参见专栏 2）。

专栏 2：第三代反应堆建设项目的经验教训（案例研究 2）

第三代反应堆的供应商都意识到“按时、按预算”交付核电站的必要性，也从 FOAK 项目的经验中获益，来优化设计和供应链，并可以更加有效地管理建设项目。对于很多特别是在欧洲、美国的反应堆供应商和设备供应商而言，第三代反应堆项目代表了这十多年来的第一批新建项目，而在二十世纪七八十年代巅峰建设时期得到的大部分经验对现在来说都已经过时了。

对第三代反应堆 NOAK 项目来说，四年到五年的建设周期是一个比较现实的目标，这与设计成熟的第二代反应堆公认的建设周期一样。日本已经超越了这一目标，日本柏崎刈羽（Kashiwazaki-Kariwa）核电站、滨冈核（Hamaoka）电站、和志贺町（Shika）核电站的第三代机组都在四年之内完成了施工建设。实现如此令人印象深刻的建设周期，其原因在于使用了超大型起重机进行模块化施工、对地板包装进行敞篷式并行施工，进行前装工程建设和详细的进度管理，同时采用了综合的施工管理系统。模块化施工是一种精炼高效的现场施工方法，而敞篷式施工和大型起重机的使用可以把大型模块直接安装到位。从施工建设中获得的经验教训也被整合到一套先进的计算机辅助工程系统之中，该系统依赖于核电站的工程数据库以及积累下来的经验和管理技术。在核电站交付以后，采用一套涵盖设计、生产、检查、安装和预防性维护等方面的质量保障体系对整体性能的提高也很有帮助。

2.4 现有反应堆的长期运营

除了需要提高新建机组的能力以外，还需要对现有的机组进行维护，并持续改善其运营以提高安全性。世界上大多数核电站运营商都在投入资金以确保核电站的运营时限能够超过其原设计寿命。在美国，超过 70% 的在运行反应堆都获得批复并得到 20 年的延长期限，使得这些反应堆的运行周期高达 60 年。在欧洲，通过定期进行安全检

查，很多运行了 40 年的核电站也都被允许再运行至少十年时间。在 40 到 60 年的时限范围内，长期运营符合一定安全标准的现有反应堆，是最具成本效益生产低碳电力的一种常用方式（NEA，2012a）。正如本路线图技术章节中详细描述的那样，人们目前正针对系统和材料的老化进行研发，以期解决超过 60 年的核电站的运营问题。然而在某些情况下，特别是对仅有一座反应堆的商业核电站运营商来说，市场条件会使核电站的持续运营变得困难。美国佛蒙特州扬基（Vermont Yankee）核电站和基瓦尼（Kewaunee）核电站分别于 2013 年和 2014 年关停，主要是由于经济原因。

对于拥有多个反应堆的运营商来说，他们可以通过在多个反应堆内开展现代化改造项目来获得规模经济。这既适用于安全升级，如福岛事故后的安全升级，也适用于对长期运营的投资。尽可能多地收集不同机组以及其他核电站反馈过来的经验（通过一些诸如 WANO 之类的机构），将有助于优化现代化改造项目并降低其成本。所返回的经验和教训对自身具备工程建设能力、可作为“建筑工程师”模式运行的核电事业单位来说大有裨益，有助于其优化在长期运营方面的投资以及安全升级（参见专栏 3）。

专栏 3：一体化建筑工程模型，这是一个被证明有效的工业模式，可用于优化核电站的设计、施工和运营（案例研究 3）

法国电力公司（EDF）开发了一个名为“一体化建筑工程模型”的工业模式——这个模式是法国核能发展规划成功的基础，其中包括运营中的 19 个核电站共 58 座反应堆以及一座在建核电站，他们供应了法国 75% 的电力需求。由于设计、采购和运营之间存在着很大的相互影响，运营商能够通过尽可能地使用经验反馈，借助该模型来提升核电站的安全性和业绩。从自己的核电站以及其他核电站收集反馈经验是这个过程的第一步，工程团队紧接着会对该反馈进行处理，并落实一些措施来不断提升核电站设施的安全性和运行能力。

EDF 在福岛第一核电站事故以后立刻采用了该方法，动员了 300 名工程师对其 19 座核电站逐个进行分析，并向法国核安全管理局提交了一份 7000 页的报告，将其作为后福岛时期“压力测试”评估的一部分。EDF 采纳吸收福岛第一核电站事故的经验教训以完善其核电站生命周期延长规划，目前正在投入资金做好运行 60 年的准备。通过整合运营经验不断增加投资和改善性能，福岛安全升级的成本已经低于生命周期延长规划成本的 20%。

第 3 章核能发展的区域性展望

不同国家的核电发展面临不同的发展机遇和挑战，这些依赖于背后的很多因素，包括：国家的能源及环境政策、电力需求的前景、能源资源的可获得性以及监管环境和电力市场。对拥有成熟核电运营技术的国家而言，挑战主要集中在核电站的现代化升级改造和长期运营方面；对于新兴新兴核电国家来说，面临的挑战主要是建设必要的核电基础设施和监管框架、获得公众的认可、培养熟练的工作人员；而对于其他某些特定国家来说，其主要问题是替换即将退役的核电站，以及提高扩大核能发展的可能性。

由于核电站的建设初期需要预先投入巨额资金，因此融资问题是许多国家发展核电所面临的主要障碍。另外，第三代核反应堆的规模巨大，一般都在 1000–1700 兆瓦（MW）范围内，这也对选择采用核电的国家产生了限制——根据“经验法则”，在一个电力系统中，任何一座核反应堆或其他单一发电机组的电量不应超过电网规模的 10%。因而欠发达的国家或地区通常会采用诸如小型模块化反应堆（SMRs）的小型反应堆。本节旨在强调未来计划大力发展核能的主要国家/地区将面临的一些区域性机遇和挑战。

表 1：不同地区核电发展特征总结

	发展现状和电力市场设计*	未来发展的机遇	主要挑战
OECD 欧洲	占 25%的发电量（833TWh），132 座反应堆（122GW）； 四台机组在建； 三个国家正逐步淘汰核能（比利时、德国和瑞士）； 机组的平均使用年限为 27 年，到 2050 年大约有 130 台机组将退役； 波兰和土耳其是新兴核电国家； 英国正计划一个在 OECD 成员国中最宏伟的新建核电项目； 拥有开放的电力市场和受监管的电力市场。	电力行业脱碳； 能源安全； 有竞争力的电力成本。	在自由化的市场进行融资； 制定与技术无关的低碳投资政策； 扭曲的市场（由可再生能源补贴导致）以及日益降低的电力批发价格； 公众接受度。
美国	占 19%的发电量（822TWh），100 座反应堆（105GW）； 五台机组在建； 成熟的核电机组，大多数反应堆的许可运行年限为 60 年； 拥有开放的电力市场和受监管的电力市场。	电力行业脱碳； 有竞争力的电力成本； 能源供应的安全； 重新开发核电工业。	在自由化的市场融资； 在与页岩气竞争的条件下进行长期运营的经济性。

	发展现状和电力市场设计*	未来发展的机遇	主要挑战
俄罗斯联邦	占 17% 的发电量 (172TWh)，33 座反应堆 (25GW)； 10 台机组在建； 开放的电力市场。	有政策支持，到 2030 年核电份额提升到 25%-30%； 大力支持核工业，包括核工业出口市场。	逐渐使用第三代水慢化水冷却动力反应堆 (VVER) 取代石墨慢化沸水冷却反应堆 (RBMK) (占近一半的当前发电量) 的工作管理。
日本和韩国	占 11% 的发电量 (148TWh)，有 71 座反应堆 (66GW)； 目前日本的所有 48 座反应堆处于闲置状态； 七台机组在建 (两个在日本，五个在韩国)； 受监管的电力市场。	能源安全； 电力行业脱碳； 有竞争力的电力成本； 大力支持核能工业，包括出口市场。	公众接受度； 重启日本的核电机组。
中国	占 2% 的发电量 (117TWh)，20 座反应堆 (17GW)； 29 台机组在建； 受监管的电力市场。	能源安全； 电力需求迅速增长； 未来稳定的电力成本； 当地的污染问题； 大力支持核能工业。	公众接受度； 在内陆兴建核电站； 国内供应链。
印度	占 3% 的发电量 (32TWh)，21 座反应堆 (5.8GW)； 六台机组在建； 受监管的电力市场。	能源安全； 强劲的电力增长需求； 未来稳定的电力成本。	公众接受度； 融资； 外国承建商进入市场 (印度的核责任机制)。
其他亚洲发展中国家	孟加拉国和越南正准备建设核电站； 泰国和印度尼西亚做出了计划但尚未给出承诺； 马来西亚正研究建设一座核电站的可行性； 菲律宾建了一个反应堆，被封存； 受监管的电力市场。	能源安全； 多样化和强劲的电力增长需求。	建立监管机制和其他基础设施； 培训专业技术人员； 融资； 公众接受度。
中东地区	伊朗有一座反应堆在运行 (1GW)，筹建两台机组； 阿拉伯联合酋长国正在建设两台机组 (计划 4 台中的两台)； 沙特阿拉伯计划的装机容量为 17GW； 其他国家 (约旦、埃及) 考虑发展核电； 受监管的电力市场。	强劲的电力增长需求； 未来稳定的电力成本； 节省石油/天然气储量，用于出口市场。	建立监管机制和其他基础设施，培训员工； 在非石油/天然气丰富国家的融资； 海水淡化。

注:括号中的数值表示 2013 年末的发电量 (以 TWh 表示) 和装机容量 (以 GW 表示)。

3.1 OECD 欧洲

在 OECD 欧洲成员国中，各国的核能发展政策各不相同。德国、比利时和瑞士正逐步停止使用核能（分别于 2022 年、2025 年和 2035 年）；而芬兰、匈牙利和捷克共和国则计划提高其核电装机容量；英国已经制定了一个重大的新建项目规划（到 21 世纪 20 年代末核电装机容量将达到 15GW 左右），用于取代即将退役的核电站；波兰和土耳其等新兴核电国家的第一座核反应堆预计将于 21 世纪 20 年代早期投入运行；法国现有发电量的 75% 来自核电，但是计划在保持现有核电装机容量水平的情况下于 2025 年将核电份额降低到 50%；核能发展大国立陶宛正计划于 21 世纪 20 年代早期建一座新的核电站。

对于 OECD 欧洲的许多成员国而言，其核能发展的重点在于老旧核电机组的长期运营和最终的更新换代。虽然目前全球正在运行的核反应堆中有 30% 位于 OECD 欧洲成员国内，但当下全球在建的 70 座反应堆中仅有 4 座（其中第三代 EPR 型反应堆 2 座，第二代 VVER 440 型反应堆 2 座）在这些成员国中建设。目前在 OECD 欧洲成员国中处于运营状态的 132 座核反应堆中，近半数的反应堆运营年限均超过了 30 年。在许多核电公司正计划对核电站的长期运营和升级进行进一步投资的同时，监管机构也在逐一评估这些核电站能否再运行 10 年或更长时间。在今后的几十年里，很多反应堆将停堆退役，这个速度可能比新建项目的速度更快，因此核电占总发电量的份额也将下降。这部分基荷容量将部分被可再生能源、日益增长的天然气以及煤炭的发电量所弥补，后两者会导致电力行业的 CO₂ 排放量的上升。

虽然在一些 OECD 的欧洲国家，核能的公众接受度比较低，但是在像英国这样的国家里，核电被视为保障能源和电力安全的重要选择，并且对电力行业的脱碳作出了重要的贡献。欧洲的核工业成熟，有完善且强有力的监管制度，有强大的研发能力和经验丰富、技术熟练的专业技术人员。这些优势使得该地区非常关注核能的发展。

在欧洲，因为可再生能源发电可以获得补贴，可再生能源发电的份额日益增加（尽管许多国家减少了对可再生能源发电的补贴，因为事实证明可再生能源的发电成本非常高）。所以在对需求的灵活性及负荷响应能力方面，发展核电所面临的挑战将更加复杂。法国和德国多年的经验证明，核电站在一定程度上具备负荷跟踪能力、其新型的设计也能满足灵活性的要求。与基荷运行相比，负荷响应会影响核电站的经济效益并降低其盈利能力，除非运营商向电网经营者支付足够多的服务费用。大规模引入可再生能源电网导致电力批发价格降低，影响包括核电站在内的可调度技术的利用率。

因此，许多燃气电厂（即那些具有最高边际成本的电站）已被闲置，这使得欧洲公用事业单位的市场资本化在过去的十年中不断退化。这些都是对可调度技术的投资和盈利提出的难题。政府可以通过政策机制来帮助管理此类风险，这有助于电价的预测。

3.2 美国

美国是世界上核机组数量最多的国家。南加州沃格特勒（Vogtle）和佐治亚州萨默尔（VC Summer）的两个项目（每个项目都拥有两台第三代 AP1000 机组）是美国 30 多年来的首批新建项目，预计首台机组将在 2017 年底投入运行。美国所有的新建项目都在监管框架下的电力市场中进行，因为这种市场更有利于为诸如核电站这样的资本密集型项目提供长期稳定的政策框架，同时它允许公共事业单位通过电价的调整将建设成本转嫁给消费者。

1977 年至 2012 年间，虽然美国没有新建核机组，但通过一系列提升功率的举措将核电装机容量提高了 6GW 以上。然而，这种在原有基础上的电力升级潜力十分有限，要发展新一代的核电技术归根结底还是需要依靠新建核电站。页岩气的开发致使能源价格走低，同时也给核电的发展带来了新的挑战，因为廉价的天然气使得天然气联合循环电站的数量迅速增加。在 2013 年有四个核反应堆被关闭，它们是水晶河（Crystal River）、基瓦尼（Kewaunee）和圣奥诺弗雷（San Onofre）的 2 号、3 号机组。基瓦尼反应堆是因为经济原因，水晶河反应堆是由于安全壳的维修成本过高，而圣奥诺弗雷的 2 号和 3 号机组则是因为更换机组蒸汽发生器时遇到了一系列监管不确定性问题。而另外一个反应堆，即佛蒙特州扬基（Vermont Yankee）核电站在运行了 42 年以后于 2014 年 12 月关闭。尽管该核电站已经获得了延期牌照，但仍然选择关闭，其对外声称的原因是缺乏竞争力。明年可能会有更多的反应堆因为经济不景气而被关闭，但是从中长期来看，天然气的价格可能会逐渐上涨，尤其是在政府执行更加严格的 CO₂ 排放标准之后，这会使得核能的吸引力逐步增强。

美国非常关注其核工业的重新发展问题，近年来美国能源部特别重视 SMRs 的发展。针对空气污染问题，美国环境保护署新颁布了更加严格的监管条例，这将进一步促使燃煤发电厂的关停，因此 SMRs 拥有替代燃煤发电厂的潜力。但是，由于近期美国没有对 SMRs 作出发展规划，一些在这个领域拥有领先技术的设计企业调整了 SMRs 的发展计划，减少了在这方面的努力。

3.3 日本和韩国

在建设核电站方面，美国和欧洲通常都在努力赶工期和控制预算，而日本和韩国凭借过去数十年持续的施工计划、先进的模块化设计以及管理良好的供应链，以令人惊叹的速度成功地完成了多个新核电站项目的建设。这与美国和欧洲的情况形成了鲜明的对比，美国和欧洲完成的最近的核电站建设项目分别启动于 1977 年和 1991 年。在日本，除了近期正在施工的两座反应堆以外，日本境内新建核电站的前景不甚明了，甚至很可能会受到限制。受福岛第一核电站事故的影响，核电的公众接受度下降，新建核电站将面临等待监管审批和地方政府批准等方面的挑战。日本政府希望能够在 2015 年初重启数座核反应堆。

韩国目前的核电装机容量为 20.7 GW，占其 2013 年发电量的 27%。为了降低对进口化石燃料的依赖，并提升能源供应的安全性，该国制定了一个长期战略目标，以提升核电的份额。然而，在福岛第一核电站事故发生以后，一个更加温和的政策出台，即到 2035 年将核电装机容量提升到总发电量的 29%，而非之前 41% 的目标。韩国的年平均设备利用率为 96.5%，拥有丰富的运营经验和强大的运营能力。2009 年韩国从阿联酋获得了首个出口合同并希望将出口扩大到其他中东国家和非洲。

根据韩国与美国合作协议（123 协议）中的条款，韩国目前被禁止从事铀浓缩和后处理活动，该协议限制了其发展完整的核燃料循环。如果韩美之间达成协议，韩国在拥有核废物后处理方面的能力之后，将可以让其进口的铀材料所开发出来的能量提高 30%，并减少高强度放射性废物的量。

3.4 俄罗斯

由于日本的核电机组闲置，俄罗斯目前成为了继美国和法国之后，世界第三大核电生产国。其在役的核反应堆有 33 座，总装机容量达到了 25GW。俄罗斯国家原子能公司（Rosatom）是一家拥有全球领先核能技术的供应商，具有丰富的行业经验。该公司帮助大多数俄罗斯的核反应堆延长使用年限，迄今为止共有 18 座总装机容量为 10GW 的核反应堆获得了 15 到 20 年的延寿。俄罗斯的反应堆中有一半是 VVER 型反应堆，这些反应堆或许也可以通过升级增加 7%到 10%的装机容量。最早期的 VVER 型核反应堆以及所有处于运营状态的 RBMK 型核反应堆预计到 2030 年退役。

俄罗斯未来核能发展的主要驱动因素包括：更换老化的、待退役的核反应堆，增加新反应堆装机能力，到 2030 年实现将核电的份额从今天的 17%提高到 25%-30%。增加核能发电将有助于节省本国的天然气以用于出口。俄罗斯目前在建的核反应堆有 10 座，总装机容量为 9.2GW（其中的 Rostov 3 号机组实际上已经于 2014 年 12 月 29 日并网）。计划到 2030 年还要再建 24 座（大约为 29GW），其中包括先进的第三代 VVER 型反应堆、钠冷快中子增殖反应堆以及 1 座于 2014 年 6 月到达临界点的 BN-800 型反应堆。俄罗斯在核能技术方面的研发投入巨大，拥有先进的快中子增殖反应堆以及小型浮动式反应堆技术，小型浮动式反应堆可以为偏远地区提供核电。目前，俄罗斯的“罗蒙诺索夫（Lomonosov）号”浮动式核电站正在建设中，它由两个 KLT-40S 反应堆组成。

3.5 中国

中国是世界上核能市场发展最快的国家。根据 2012 年颁布的《核电中长期发展规划（2011-2020 年）》，中国的目标是到 2020 年实现 58GW 的在运行装机容量（净装机容量），以及 30GW 的在建装机容量。中国的核能发展规划始于 20 世纪 80 年代，首座核反应堆于 1994 年正式实现商业运行。目前在建的 27 台机组中，8 台机组采用了第三代核电技术（4 台 AP1000 机组、2 台 EPR 机组以及 2 台 VVER 机组），18 台机组采用了第二代核电技术，而有 1 台原型反应堆具备了第四代的技术特征。中国的核电机组以本国开发的技术为基础，并采用了从加拿大、法国、日本、俄罗斯联邦和美国转让的技术。

福岛第一核电站事故后，中国将其 2020 年的核能发展目标进行了调整，运行装机容量从 70-80GW 降低至 58GW，在建容量调整为 30GW。同时，也加强了对核电站的安全要求，现在只允许建设符合三代标准的核电站。华龙一号和 CAP1000 设计代表了新的发展方向，其中 CAP1000 技术以美国西屋公司设计的 AP1000 为基础。中国将推广 CAP1000 技术，并期望实现正在设计中的升级版本---CAP1400 的出口。随着其国内反应堆设计和国内供应链的快速发展，中国的核能发展规划在过去的十年中发生了翻天覆地的变化，已经从核能技术进口国转变成为了本地技术开发国，并已经开始出口相关技术。

目前，燃煤发电厂带来空气污染是中国发展核电的主要驱动因素之一。其他主要的动因还包括提升能源安全以及保持稳定的、经济的发电成本。随着中国令人瞩目的经济发展和持续的城市化进程，对于电力的需求也将快速攀升。经济性优势、稳定的

负荷运行能力、满足东部沿海地带的电力需求外加核电的环境效益，使得核能成为了一种能够替代煤电的、极富吸引力的能源。

要满足中国核电发展的宏伟目标，最大的挑战是持续培养和发展在核安全文化方面熟练的技术人员。此外，如果在内陆地区部署核电站，中国还必须解决河水冷却可能带来的水污染问题，以及水流速度过低所产生的影响。

3.6 印度

印度自 20 世纪 50 年代开始发展核技术，该国首座核电站于 1969 年开始投入运行。由于印度没有签署核武器不扩散条约（NPT），印度的核工业基本上是由本国自行发展的，其远期目标为开发能够使用钍增殖循环的核电反应堆，这是因为该国有丰富的钍资源储量但天然铀的储量非常少。印度很早就进行了核能的研究和开发，目前正在建设一座可以运行钍增殖循环的钠冷快堆。印度政府期望到 2020 年使其核电装机容量达到 20GW，还宣布了自己雄心勃勃的目标，要在未来的几十年内提升核电的份额。据估计，印度可能会在 2040 年成为世界第三大核能国家。

快速增长的经济和人口，不断推进的城市化进程，印度将会出现强劲的电力需求。以极具竞争力的成本获得可靠的基荷电力供应成为印度核能发展的主要驱动因素。其他驱动因素还包括提升能源安全、关注当地污染。进行融资和提升公众接受度是印度扩大核能供电份额需要解决的难题，而向国外投资商和技术供应商开放印度的核电市场是其面临的另一个挑战。虽然印度根据政府间合作协议框架在库丹库拉姆（Kudankulam）建立了两座第三代俄罗斯 VVER 型反应堆，但目前还没有其他的承建商能够进入该市场。印度已经签署了很多合作协议，还有许多工程公司和供应链公司建立了合资企业，这为未来核电项目的高度国产化奠定了基础。印度核电的发展还面临着一些其他的困难，包括在 2010 年通过的《印度核责任法》——具体来说就是看印度是否符合国际公认的核责任原则，以及引进国外核能技术的成本较高。

3.7 中东地区

伊朗布什尔（Bushehr）核电站于 2013 年 9 月正式投入商业运营，这是在中东地区第一座投入运营的核电站。阿拉伯联合酋长国（UAE）是目前该地区具备最先进核电技术的新兴国家，如今 Barakah 地区在建的四台核电机组中，有三台为韩国设计的 APR1400 型机组（第三座机组于 2014 年开始建设），总装机容量将达到 5.6GW。第

一台机组预计将在 2017 年开始投产发电，最后一台机组定于 2020 年开始投入运行。到 2020 年，阿联酋的电力需求量估计将超过 40GW，接近 2010 年电力需求量的两倍。阿联酋已经将核能确定为未来电力供应的重要来源。尽管阿联酋目前的电力需求仅靠天然气就可以满足，但事实证明，核能具有成本上的竞争力，并且是一种低碳能源，核电将成为阿联酋地区重要的基荷电力。

在未来的几十年，随着电力需求的快速增长，该地区的一些国家正考虑采用核能来提升能源安全，通过能源的多元化来减少国内石油和天然气的消耗，以节省更多的资源用于出口。除了上升的电力需求以外，该地区日益增加的淡水需求使得用核能淡化海水从中长期来看具有很大的吸引力。沙特阿拉伯宣布到 2032 年要建造 16 座总装机容量为 17GW 的核反应堆，并期望第一座核反应堆能在 2022 年投入运营。约旦也计划最多建造两座核反应堆，并于 2013 年 10 月与俄罗斯签订了合同。

中东地区发展核能所面临的主要问题是建设核电基础设施、人员培训，以及培育高水平核电技术人才。为修建必要的基础设施，该地区正与 IAEA 紧密合作；而严格执行 IAEA 制定的时间表，也使得阿联酋成为了公认的榜样（参见专栏 4）。由于该地区拥有丰富的石油和天然气，这些重要的能源将会吸引外国专家来帮助他们解决上述问题。这些专家可以通过培训和提出建议将他们的专业知识和能力传授给当地的员工，以提高他们的专业水平和能力。但是如果该地区内的核能发展规划项目密集，那么人们会担忧具有丰富经验的高水平核能专家的数量能否满足需求。

专栏 4：关于国家核能基础设施建设 IAEA 里程碑方案—阿联酋经验（案例研究 4）

为了帮助指导新兴核电国家发展核能项目，IAEA 在 2007 年出版了一份刊物，提纲挈领地介绍了发展核能需要修建哪些必要的基础设施，以及建造这些基础设施的主要时间表。该指导方针被称为《IAEA 里程碑方案》，其中罗列了对核能发展规划极为重要的 19 项要素。每一项都罗列出了在 3 个里程碑事件中必须满足的具体条件。阿联酋在发展本国的核能项目中与 IAEA 紧密合作，并且在法律法规框架制定、许可证发放、基础设施和能力建设、安全保障的执行及同行评审方面都得到了 IAEA 的支持和帮助。应阿联酋的要求，IAEA 在 2011 年 1 月对其开展了“综合核基础设施审查”（INIR）工作。

审查小组的结论是阿联酋已经满足了所有的条件，可进入第二阶段。审查小组认为阿联酋有 14 项良好的经验，值得其他国家在建设核基础设施时参考和借鉴。阿联酋建设国内核基础设施方面的经验以及其设立的监管框架和体系令人印象深刻。然而，

需要指出的是，阿联酋在如此短的时间内成功地完成了其核能发展规划——从发布其核能发展政策到首台机组试运行只花了 9 年的时间（而不是 IAEA 预计的 10-15 年），这主要归功于阿联酋联邦核能管理局（FANR）和阿联酋核能管理公司（ENEC）长达十年的合作。阿联酋核能管理公司是阿联酋未来核电站的所有者和运营商。另外，政府投入巨额的财政资源，也使得核能的发展成为可能。建议新兴核电国家在制定他们的核能发展规划之时与 IAEA、其他相关组织以及具有丰富运营经验的国家进行密切合作。

*更详细的 IAEA 里程碑信息请登录：

www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1305_web.pdf

3.8 亚洲其他发展中国家

在亚洲其他发展中国家里，越南在核能发展规划方面最先进。该国制定了坚定的核能发展规划，目前正在制定其法律和监管基础，计划到 21 世纪 20 年代末实现核电装机容量至少达到 8GW，同时首座核电机组能在 2023 年投入运营。孟加拉国同样也计划在 2015 年开始建设首座核反应堆。泰国和印尼制定了成熟的计划，但是都尚未得到验证，而马来西亚目前正在研究建设核电站的可行性。菲律宾在 20 世纪 70 年代后期就已经开始建设核电站（一直没完成建设），目前正面临电力短缺和电力成本过高的困境，因此马来西亚依然将核能视作未来可用能源的选项。新加坡目前正密切关注核能开发的进展情况，以确保其未来可以在能源使用方面多一个选择。在这些国家中，SMRs 可以用来代替容量较大的第三代机组，因为 SMRs 更容易被整合进小型电网。

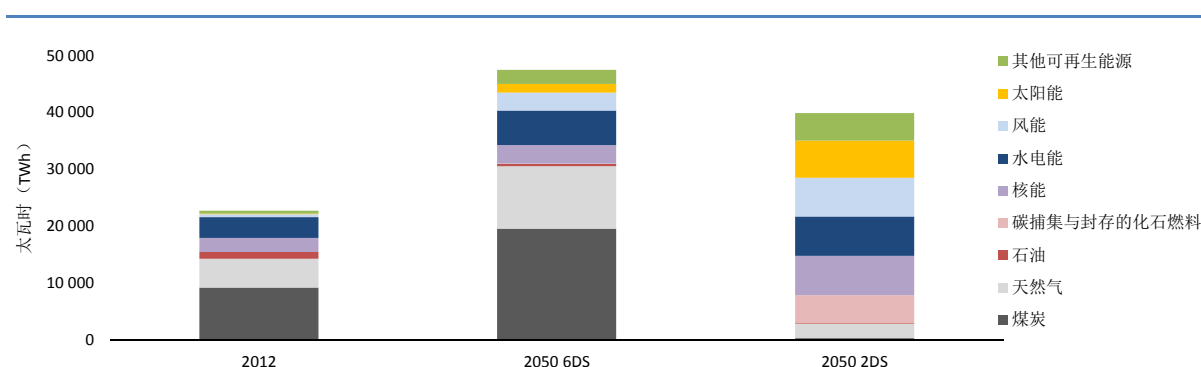
强劲的电力需求增长预期及稳定的电力生产价格是该地区发展核能的主要驱动因素。对于越南、泰国和菲律宾这些大量进口能源的国家而言，核能或许能够帮助他们提升能源安全状况，并减少对化石燃料进口的依赖。对这些新兴核电国家来说，制定必要的核监管框架、培养训练有素的核能专业技术队伍、进行融资和提升公众接受度是它们在核能开发中要面临的主要难题。这些国家需要开展国际合作来支持监管基础框架的制定，并通过培训和开展能力建设来培养当地的专业技术人员。

第 4 章至 2050 年核能发展愿景

本路线图中提出的愿景以 ETP 2015 中 2D 情景为基础，在该规划中呼吁电力行业到 2050 年前实现脱碳（参见专栏 5）。为了达到这个脱碳目标，将需要综合采用一系列技术，包括核能技术、碳捕集与封存技术以及可再生能源技术。在能源技术展望 2D 情景中，核电占全球发电量的份额预计将从 2011 年的 11% 上升到 2050 年的 17%；可再生能源将占据发电量最大的份额，达到 65%，其中不稳定的可再生能源（风能、太阳能等）供应的电量将占据全球总发电量的 29%（参见图 3）。可再生能源的份额在某些国家将超过 40%，如此高的份额将显著改变核能的运营环境。虽然核电能够在负荷跟踪模式下运行，但其运营一般来说是为了满足基荷要求，要比燃气峰值发电站的灵活性差一些。

核能对电力行业脱碳的作用存在着很大的地区性差异，像芬兰、俄罗斯和南非之类的很多国家，在 2D 情景中都计划到 2050 年将核电份额提高到 20% 或以上。韩国和一些东欧国家的核电份额最高，分别达到近 60% 和 55%。根据全球范围内的报告，核电的份额在三个主要核电生产国——中国（18%）、印度（19%）和美国（17%）——都类似，或稍微高点。

图 3：6D 情景和 2D 情景各种技术对应的发电量



专栏 5：《2015 能源技术展望》6D 情景和 2D 情景

本路线图以 IEA 《2015 能源技术展望》的分析为基础，该文件中描述了 2050 年全球能源系统多种不同的未来情景。作为基础情景方案，6°C 情景（6DS）方案在很大程度上来说是对当前发展趋势的一个延伸，突出表明了能源需求在这段时间内的增长接

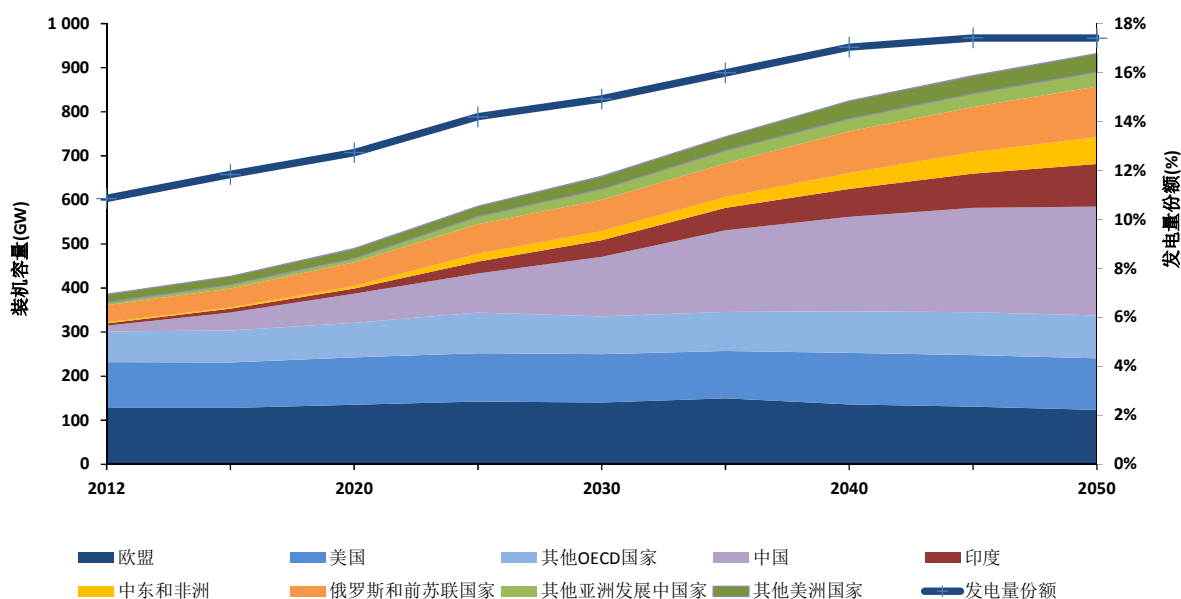
近一倍（相较于 2009 年而言），并且相应的 CO₂ 排放量将以更快的速度增长，使得全球平均气温上升高达 6℃。

IEA 的《能源技术展望》2D 情景描述了到 2050 年整个能源领域的技术要如何发展，才能使得人们有 80% 的机会将全球平均气温增长限定在 2℃ 以内。根据其中设定的目标，到 2050 年 CO₂ 的排放量将削减一半（相较于 2009 年而言），并保证此后 CO₂ 排放持续下降。在 2D 情景中也承认，能源领域的变革至关重要，但不是唯一的解决方案：只有非能源领域（如农业和土地使用方面的变革）的 CO₂ 和温室气体排放量也降下来，才能实现该目标。2D 情景与《世界能源展望》中所描述的到 2035 年的 450 情景基本一致。

在本次分析中使用的模型是一种自下而上的 TIMES（综合 MARKAL-EFOM 系统）模型，在设定一些约束条件如自然资源可用性后，该模型可以给出满足当前能源需求所需要的技术和燃料最优化组合，使成本降到最低。ETP 全球 28 个地区模型可以让人们对整个能源系统内不同燃料和技术的选择进行分析，在整个能源系统内包含 1000 种独立的技术。TIMES 模型可以根据工业、建筑和交通领域的最终具体需求进行修改。

4.1 修订后的核能发展目标（与 2010 年版路线图比较）

图 4：2D 情景中各区域的核电装机容量



自 2010 核能技术路线图发布以来，有两个主要原因致使《2015 能源技术展望》的 2D 情景中对全球范围内核电装机容量增长预测进行了下调。第一个原因是福岛第一核电站事故，它使许多国家开始重新评估核电在电力供应结构中的角色，另外一个原因是太阳能光伏和陆上风电的汇流条成本⁴下降速度超过预期。福岛第一核电站事故发生后，各国纷纷提升核电站安全标准、这同时也增加了原材料成本、核电站设计的复杂程度以及对供应链质量的要求，因此未来的核电成本相较于 2010 年估计会上升 20% 左右。以上原因再加上太阳能光伏和风电的预期成本的下降，都对核能的竞争力造成了威胁。因此，在《2015 能源技术展望》2D 情景中将 2050 年核电装机容量的预测修改为 930GW，而在 2010 核能技术路线图中为 1200GW。尽管对该数值进行了下调修订，但相对于 2014 年近 396GW 的规模，2050 年核电装机容量的增长依然超过了一倍。

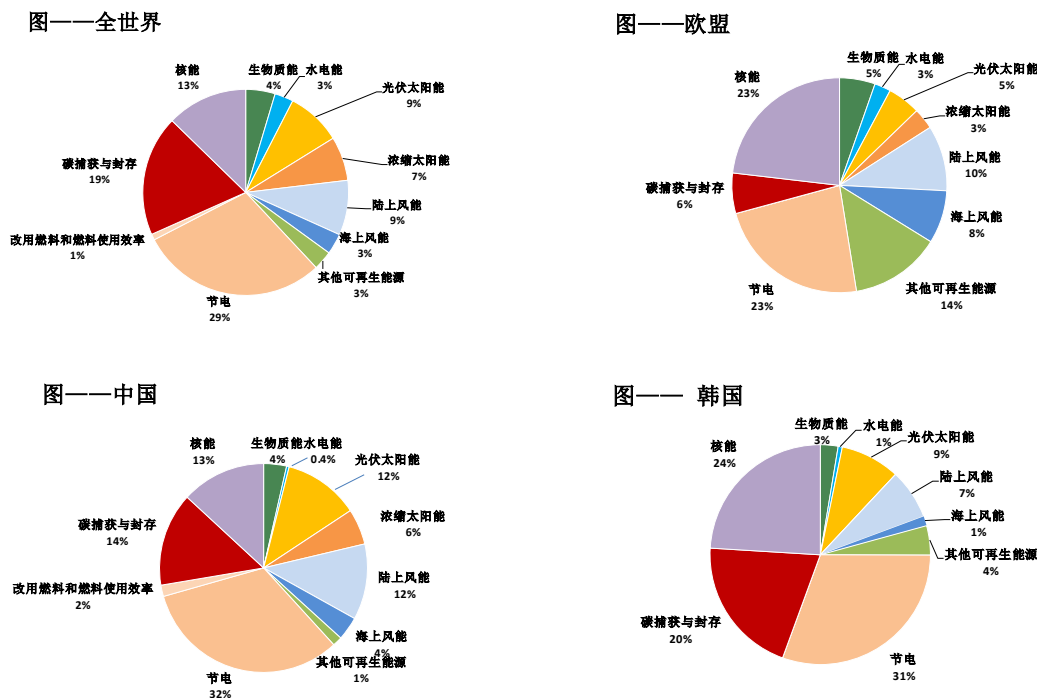
根据《2015 能源技术展望》2D 情景，非经合组织成员国将推动核电装机容量的增长（见图 4）。目前，经合组织成员国、俄罗斯和乌克兰在总装机容量中的份额超过 90%。到 2050 年，这些国家的总装机容量仅有少量增长，从 350GW 到 400GW。目前有很多国家正计划逐步淘汰核能，并且在未来的数十年内，年久的核电站会逐渐接近使用年限，因此欧盟国家的核电装机容量将从 2040 年开始下降，而俄罗斯和韩国将出现最大的核电装机容量增长，到 2050 年增长将超过一倍。

中国将引领核电装机容量的增长势头，根据 2D 情景，中国的核电装机容量将在 2030 年超过美国，而到 2050 年，伴随着 250GW 的核电装机容量，可能将会超过美国的两倍。印度紧跟其后成为增速第二快的核能市场，到 2050 年其装机容量大约为 100GW，成为继美国之后第三大核能国家。其他核能增长市场还包括中东、南非和东盟国家。

⁴ 汇流条成本俗称为发电均化成本，指的是发电的总成本，包括燃料成本、运营和维护成本以及融资成本。

4.2 核能对减排的贡献

图 5：2D 情景中电力行业的减排情况



如果用核能取代天然气或煤炭发电的话，核能当前对电力行业 CO₂ 减排的贡献为大约每年 13~26 亿吨 (0.1Gt)。据估计，自 1980 年以来，核电减少了 600 亿吨 (60Gt) CO₂ 的排放。与 6D 情景相比，2D 情景中核电对电力行业的脱碳贡献更大，每年将减少 25 亿吨 (2.5Gt) 的 CO₂ 排放量 (参见图 5)。在全球范围内，核能占电力行业减排的平均值为 13%，但存在地区差异，在韩国的贡献高达 24%，在欧盟为 23%，中国为 13%。很明显，在世界上大部分地区，核能在提供可靠的低碳电力方面发挥着重要的作用。

4.3 至 2050 年全球核能投资情况

根据 ETP2015 中 2D 情景，要使 2050 年的核电装机容量达到 930GW，预计需要投入 4.4 万亿美元。其中 OECD 国家会投入超过该预算 40% 的资金 (即 2 万亿美元) 用于延长现有核电站的使用寿命，更换退役的核电站，并建设新的核电机组。到 2050 年，中国将占全球核电装机容量的三分之一，需要投入该预算的四分之一、大约 1 万亿美元用于建设新的核电机组。

表 2：2D 情景中需要的投资（以十亿美元计）

国家/地区	2012-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2010-2050
美国	90	216	288	118	713
欧盟	113	168	259	164	704
其他 OECD 成员国	83	153	178	162	577
中国	209	309	350	157	1025
印度	21	120	114	158	412
中东和非洲	18	70	82	133	303
俄罗斯和前苏联国家	96	94	176	182	548
其他亚洲发展中国家	14	68	40	31	153
其他美洲国家	12	5	3	6	25
全世界	656	1210	1493	1115	4473

4.4 区域核电成本假设

中国的核电装机份额较高，而占总投资的比例却较低，表明核电的隔夜成本⁵存在着地区性差异。中国的平均隔夜成本大致为 3500 美元/千瓦，还不到欧盟 5500 美元/千瓦的三分之二。美国的隔夜成本要比欧盟的低 10%，但是依然比中国和印度高出 30%，比韩国高出 25%。与亚洲相比，欧盟和美国的隔夜成本偏高的主要原因在于缺乏建造新核电站的最新经验，以及工程和建筑方面更高的劳动力成本。在 2D 情景中，到 2050 年美国 and 欧盟的预估核电隔夜成本将下降，接近韩国的水平，而亚洲其他国家的成本则将保持不变。

⁵ 隔夜成本包括场地准备、建设成本和应急措施成本。

第 5 章核能技术的发展：行动和里程碑

5.1 反应堆技术

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
各国政府需要意识到，在满足安全标准的情况下，长期运营核电站在维持低碳发电能力和保障能源供应安全方面的价值。需要制定更明确的政策，以鼓励运营商投资长期运营以及新核电站的建设，从而替代即将退役的机组。	2015-2030
需要对核电运行系统和材料的老化进行研发，以保障现有核电站的安全长期运营，使其安全运行 60 年甚至更长时间。	正在进行中
承建商对第三代设计进行优化，以提升施工可行性并降低成本。通过对首堆建设中的经验教训（设计优化、项目管理、供应链、与监管机构的协调）进行整合，加快对新建项目的学习速度，确保后续同种类型机组按时按预算建设。	正在进行中
为了打开 SMRs 的市场，各国政府和核工业界应当通力合作，以加速小型模块反应堆原型堆的部署，并且在建设项目启动（每个设计大约 5 个项目）之前要先验证模块化设计以及工厂组装的优势。	2015-2025
让各国政府认识到发展第四代系统在提高资源利用率和核废物管理方面的长期益处，并且让它们支持研究并开发至少 1-2 个第四代快中子增殖反应堆原型堆。	2015-2030
需要在政府和核工业界间建立公私合作伙伴关系，以开发海水淡化或制氢领域的核热电联产示范项目。	到 2030 年完成
结合第四代原型机组的运行经验反馈，开发首批第四代商业核电站。	2030-2040

截至 2014 年 12 月底，全世界共有 438 座在运行的核反应堆，装机容量约为 396GW（总容量）。其中近 82% 的反应堆是轻水堆(LWR)，而轻水堆中 63% 为压水堆(PWR)，19% 为沸水堆（BWR）。全世界 11%的反应堆为重水堆（PHWR），主要位于加拿大（CANDU 技术）和印度。全世界大约 3%的反应堆机组由气冷反应堆（GCR）组成，

全都位于英国。大部分这些反应堆都将在未来的十年内退役。另外刚刚超过 3%的为石墨慢化轻水冷却反应堆（LWGR），其俄语缩写 PBMK 更广为人知。仅俄罗斯还在运行这种反应堆，并且很可能在未来十年内退役。最后，在这 438 座反应堆中有 1 座钠冷却快中子增殖反应堆（FBR），是未来第四代核反应堆主要技术的范例之一，预计在 2015 年还有两座此种反应堆将并网。

图 6：世界范围内在建反应堆的类型（2014）

建设中的不同类型反应堆的数量（2014）



资料来源：IAEA/ PRIS。

更有意思的是目前正在建的 70 座反应堆的技术类型（见图 6）：近 89%为轻水堆，其中大部分为压水堆，而重水堆是次选技术（7%），所有的重水堆都在印度以该国的技术建造。有两座快中子增殖反应堆在建设中，一座在俄罗斯（BN-800），另外一座在印度（PFBR），这两座反应堆都将于 2015 年并网。最后，还有一座高温气冷反应堆在建，这种反应堆目前正在中国施工建设中。

从这些趋势中我们可以看到，反应堆技术主要朝着轻水堆的方向发展。目前近半在建的反应堆为轻水堆，相对于第二代反应堆而言，其安全性能比较高（比如配备有缓解严重事故风险的各种系统），燃料的经济性也相对较好。由于印度持续发展本国的核计划，因此重水堆还有一定的发展空间，但是空间有限。其他国家也会使用重水堆，通过开发回收铀（RU）和 MOX 先进的核燃料循环，从压水堆和沸水堆的乏核燃料中提取出额外的能量。中国和印度目前都在考虑使用重水堆设计来实现钍燃料循环。快中子增殖反应堆或高温气冷堆等先进的反应堆同样将得到发展，但是会朝着小型化的方向发展。虽然小型模块反应堆预计在 2030 年之前不会有大规模的部署，但是这种反应堆同样会得到开发，尤其是那些依赖于轻水堆技术的小型模块反应堆。到那时，

随着所有年久的气冷反应堆（英国境内）和石墨慢化轻水冷却反应堆（俄罗斯境内）退役，在反应堆技术方面全世界的核电机组将显得更加一致。

那些将对未来核电机组发展产生重大影响的技术趋势包括：通过管理现有核电机组以实现安全经济地长期运营；持续发展第三代水冷技术，重点放在简化、标准化和降低成本上；加大在小型模块反应堆、第四代核反应堆以及核能非电力应用等反应堆技术方面的创新力度，以解决在低碳热处理工艺、锕系元素管理、集中供暖或海水淡化方面的需求。在未来的几十年中，核聚变方面的研发依然不会停止，但是还有许多难题有待解决，在本世纪前半叶核聚变反应堆估计还无法投入商用。

5.1.1 安全升级和长期运营

全世界的核反应堆运营商目前都面临两大挑战，其中一个挑战是反应堆的安全升级。这些升级措施是在后福岛时代安全评估中被确定并被推荐执行的（目前大部分运营商已经开始执行这项工作）。虽然通过检查得出的结论是这些反应堆依然安全并继续运行，但运营商们仍被建议采取一些措施并开展一些升级活动，以提升核电站应对重大地震灾害、洪涝灾害、多重外部事故影响多机组厂址以及严重事故的紧急应对能力。在核监管机构的监督下快速开展这些升级活动，并且宣传一些核电站安全性方面的正面信息，以减少公众的对核能的担心。

另一个挑战是如何继续经济地运营这些核反应堆，特别是要考虑到核电机组平均使用寿命。这意味着运营商必须解决核反应堆长期运营方面的问题。在满足了所有安全要求的条件下，核电站需要通过长期运营来维持低碳发电容量，只有长期运营才能将生产低碳电力的成本降到最低。要达到这一目标，就必须加大核电站的老化管理、提升安全性。并且加大如何对运行时间超过 60 年的核电站进行更新的研究力度。长期的运营维护和安全升级可以使核电站的升级在性价比方面变得更加经济和划算。

2013 年全球 434 座在运行的核反应堆中，有 316 座（73%）的运行时间都超过 25 年，其中很多都可能在未来的几十年中退役，使得核电装机容量出现大幅下降。因此，延长反应堆的工作寿命可以让它们在超过原设计寿命的时间内安全地运行，直到它们被新的反应堆所替代⁶，这项工作非常有必要，因为这样能够保持低碳电力的装机容量。2012 年，NEA 发布了一份名为《核电站长期运营经济性（NEA，2012b）》的报告，

⁶ 《2015 能源技术展望》假定在美国的核电站运行年限为 60 年，在其他国家的为 55 年，除已经安排关停的核电站以外。

其结论是继续运营核电站超过原设计寿命十年或者更多年，在任何情况下都是合算的，即便是考虑了后福岛时代安全升级所需的成本。然而这种发展趋势遭到了市场条件的影响。在美国，核电站在放松管制的市场中，其竞争力受到了低成本天然气的严重削弱。在欧洲，大量可再生能源的引进也拉低了电力批发价格，从而影响了包括核能在内的可调度技术的竞争力。

在过去的二十年中，新建机组数量偏低，但通过功率升级，装机容量可以得到大幅提高，例如瑞典目前的十座反应堆机组的装机容量通过提升弥补了两台机组关停所带来的损失。目前，美国及其他很多国家在进一步升级方面的潜力有限，但是其他欧洲国家和俄国境内升级开发的潜力依然存在。

各国批准延长在运行核电站使用寿命的监管程序各有不同，但主要分为两类：定期安全检查（例如每十年一次）或续发牌照。在美国，2013年100座在运行的核反应堆里面就有93座的工作年龄超过了25年，根据所谓的《美国联邦法规》（CFR）第10条第54部分中名为《核电站运营牌照续发要求》的法规，美国制定了核反应堆的续牌监管程序，该法规于1991年发布，并于1995年进行了修订。由于商用核电站牌照的续发可能会对环境造成影响，因此还需要在此方面进行环境影响评估。截至2014年12月，美国已经对74座核电站续发了牌照，使得这些核电站能够运行长达60年，当时美国还在对其他19座反应堆的续牌申请进行审查。

在延长现有核电站使用寿命的过程中，通常还会进行大范围的整修和设备更换。此外，还有必要开展大量的技术和科研工作，以评估如压力容器或安全壳厂房等不可更换设备及系统的完整性和安全性。欧洲网络组织第二代和第三代核电生产协会（NUGENIA），美国的电力科学研究所和核能研究所（参见专栏6）等机构目前已经围绕以上问题开展了相关研究工作，并且针对运行时间在60年以上的反应堆，进行材料的性能和老化方面，监测和设备鉴定方面的研究。

当前，只颁发长期运营牌照无法激励运营商投入资金对核电站进行翻修，以满足安全和运行需求。还需要制定明确的国家长期发展政策，不管该政策是从政治的观点来看，还是从设定现有反应堆使用寿命周期的角度来说都是必要的。一些国家已经制定了一些明确的政策。比如加拿大的《安大略省核能长期运营计划》，已经决定对达灵顿（Darlington）和布鲁斯（Bruce）发电站的核电机组进行翻修，预计可在16年时间内增加8500MW的核电装机容量。

专栏 6：核电站延长运行（超过 60 年）研究（案例研究 5）

美国的核电站机组最初批准的运营年限为 40 年。迄今为止，有 74 反应堆已经收到 20 年的续牌，还有 19 份申请正处于审查状态中。其中有 24 座反应堆的运行时间已经超过了 40 年的年限，并且目前获得续牌以后在延长时限内正处于安全可靠的运行状态中。到 2040 年，预计有一半机组的运行时间会达到 60 年，如果这些反应堆退役的话，该国可能会面临电力短缺等问题，并且肯定会失去电力供应的多样性。因此，该国目前正在研究开发支持核电站运行超过 60 年、达到或超过 80 年所需的技术和科学知识。美国电力科学研究院、拥有大量国家实验室的美国能源部（DOE）以及数个大学正开展核电站老化管理研究，以理解、制定、确定和缓解核电站老化影响的一些策略。这项研究实质上来讲是研究在常规翻修过程中不可更换的长寿命部件的老化情况。这些部件包括安全壳厂房、反应堆容器，可能还包括管道和电缆。

5.1.2 新型反应堆的开发

在未来的几十年中，预计大部分核电装机容量的增长将来自于第三代“大型”反应堆（单机容量在 1000-1700MW 之间，可参见表 3）的部署，包括压水堆或沸水堆，也许还会有一些增长来自于小型模块反应堆、重水反应堆或第四代反应堆。相较于第二代反应堆而言，第三代反应堆的安全性能更好、效率更高，并且燃料的经济性也更好。

在 2050 年之前，第三代反应堆或许只会有渐进式地改变和革新，这些改变和革新主要反映在设计的简化和反应堆的标准化方面。这将有助于提高第三代反应堆的可建造性和模块化特性，从而降低成本并缩短建设周期。

福岛第一核电站事故发生之后，针对导致该事故发生的事件类型，监管机构对现存反应堆的安全性开展评估活动，同时对其他超设计基准事故的发生条件及提升核电站紧急事故应对能力的安全升级措施也进行了评估。对于第三代反应堆的设计而言，只需做少许变更，因为第三代核电站在设计之初就已经考虑到了严重事故发生的情况。在一系列评估中，监管机构更加关注严重事故缓解系统的功能，并且在严重事故管理方面，尤其对余热导出功能、堆芯熔毁机制和氢气风险管理方面做了更多地研究。

表 3：第三代反应堆设计范例

承建商	国家	设计	类型	净装机容量 (MW)	在运营数量	在建数量
法国阿海珐集团	法国	EPR	PWR	1600	0	4 座 (芬兰、法国、中国)
阿海珐/三菱重工	法国/ 日本	ATMEA	PWR	1100	0	0
加拿大 CANDU 能源公司	加拿大	EC6	PHWR	700	0	0
中核集团-中广核	中国	华龙一号	PWR	1100	0	0
通用日立-东芝 通用日立	美国/ 日本	ABWR	BWR	1400-1700	4 座 (日本)	4 座 (日本、中国台北)
		ESBWR	BWR	1600	0	0
韩国电力公司/韩国水力核能电力公司	韩国	APR1400	PWR	1400	0	7 座 (韩国阿拉伯联合酋长国)
三菱	日本	APWR	PWR	1700	0	0
ROSATOM	俄罗斯	AES-92 AES-2006	PWR	1000-1200	1	10 座 (俄罗斯、白俄罗斯、中国、印度)
中国国家核电技术有限公司	中国	CAP1000 CAP1400	PWR	1200-1400	0	0
西屋电气/东芝	美国/ 日本	AP1000	PWR	1200	0	8 座(中国、美国)

注:截至 2014 年 12 月 31 日。

降低第三代反应堆的成本是所有承建商和运营商的共同目标。这一目标可以通过一系列措施得以实现。这些措施包括简化设计、标准化、改善可建设性、模块化和优化供应链，以及充分利用首堆建设项目的经验教训。

在运营方面，基荷发电是运营核电站最经济的方式。如果可再生能源发电量份额较大，那么就需要更多的火力发电站来做后备以提供更大的弹性空间。因此，我们应该考虑到各项发电技术的特性，从电力系统和市场的角度来更好地整合核能、火电和可再生能源，避免发电量的损失，提升成本效益。在激烈的市场竞争中，供电总成本对运营商来说是一个非常重要的参数。

从长期来看，还有必要考虑可能发生的气候变化，以确保核电站能够在极端天气以及空气温度和冷却水温较高情况下，仍然能够正常运行。通过设计适当的屏障以及选择少受干扰的地点，解决诸如强降雨、暴雨或海平面上升导致洪涝灾害风险上升等问题。我们还应该关注核电站冷却水的可用性及质量问题，特别是对在内陆河边使用直流冷却法的核电站而言更是如此。冷却水温过高会降低核电站的热效率和电力输出，但可采用更高效的热交换器可以弥补这些损失。我们有必要推进闭式循环冷却技术或可降低用水量的先进冷却技术，以及使用非传统水源（如处理后的废水）冷却的技术的发展。

5.1.3 小型模块化反应堆（SMR）

小堆（小型模块化反应堆，SMRs）非常适合电网过小不足以支撑大型核电站的地区或国家使用，或者诸如集中供暖或海水淡化等非电力应用。但目前的经济性还有待考证。人们对小堆产生兴趣，主要是由于降低资金成本的需求及为小型或离网系统提供电力和热源的需求。一些小型模块化反应堆中设计使用了非能动安全系统，该系统有一个非常吸引人的特点，就是可以在发生事故时无需操作员干预的非能动地导出余热。要建立一个小堆的市场，首要条件是供应商在自己国家首先成功地建造了第一座小堆，然后其他国家才会考虑在本国推广该技术。除非各国政府和核工业界能够在未来的十年中通力合作，加快首座小堆原型的部署，以证明模块化设计和建设的好处，否则小堆的市场潜力在中短期内无法得以实现。

小型模块化反应堆类型多样，目前在建的有阿根廷（CAREM）、中国（HTR-PM）和俄罗斯（KLT-40S），其他在近期有部署可能的类型如 mPower、NuScale 电力公司和西屋公司的小型模块化反应堆，在美国设计的 Holtec 小型模块化反应堆和韩国的 SMART；其他一些具有远期部署前景的类型（液态金属冷却反应堆技术）包括专用焚烧炉概念设计，该设计适用于需要处置钚库存的国家。在罗蒙诺索夫号（Lomonosov）驳船上安装了 KLT-40S 型小型模块化反应堆（可用于发电、热处理以及可能的海水淡化），该反应堆适用于孤立的沿海区域或岛屿。

表 4 中显示了在建的或近期有可能部署的小型模块化反应堆的大致情况。小型模块化反应堆可以进入互补性市场（比如适用于电网较小和/或受地域限制，亦或应用热电联产的国家），并且与其他适用于这些市场的发电形式相比更具竞争力，但这要取

决于小型模块化反应堆制造和建设速度。要想知道小型模块化反应堆与大型核反应堆哪一个更有竞争力，就应该在可以同时建造两种反应堆的国家内，用一种系统的方法对两种反应堆做出评估。该系统方法能够计算出两种反应堆在发电和电网需求方面所占的比例。

表 4：小型模块化反应堆设计范例（在建或近期有部署可能）

承建商	国家	设计	类型	净装机容量 (MW)	在运营数量	在建数量
巴威公司 (B&W)	美国	mPower	PWR	180	0	0
阿根廷原子能委员会	阿根廷	CAREM-25	PWR	25	0	1
中国核工业建设集团公司	中国	HTR-PM	HTR	210	0	两台机组
中核集团	中国	ACP-100	PWR	100	0	0
韩国原子能研究所	韩国	SMART	PWR	110	0	0
NuScale 电力公司	美国	NuScale SMR	PWR	45	0	0
俄罗斯下新城机械试验制造局 (OKBM)	俄罗斯	KLT-40s	浮动式压水堆	2x35	0	两台机组 (一艘驳船)

注:截至2014年12月31日。

美国在过去数年中制定了一个非常积极的小型模块化反应堆发展项目。该项目的目标是通过与核工业界合作伙伴签署成本分摊协议，为美国本土的小型模块化反应堆项目制定认证和许可要求，加快这些技术的商业化进程和部署，同时解决小型模块化反应堆一般性的问题。在美国，小型模块化反应堆可用来取代那些不符合新颁布排放法规的燃煤发电厂。目前，美国能源部选择了两种小型模块化反应堆技术，包括巴威公司 (B&W) 的 mPower 设计和努斯卡尔 (NuScale) 电力公司的小型模块化设计。尽管核工业界曾希望在美国找到客户，在近期部署他们的小型模块化反应堆设计，但似乎美国的客户还没做好发展 SMR 技术的准备。因此，巴威公司(B&W)缩小了其 mPower 发展计划的规模，同时西屋电器公司也开发了一款小型模块化反应堆设计，目前正专注于 AP1000 型反应堆的研发工作中。

5.1.4 第四代反应堆

四代核能系统国际论坛（GIF）是对第四代核能系统进行研发的国际组织，是 2001 年由阿根廷、巴西、加拿大、法国、日本、韩国、南非、英国和美国发起成立的。之后，瑞士、欧洲委员会、中国和俄罗斯联邦也随即加入该组织。该论坛发展第四代反应堆的目标是：提高第四代反应堆的可持续性、安全性和可靠性、提高第四代反应堆的经济竞争力、抗核扩散能力以及实物保护能力。GIF 在 2002 年发布了一份《第四代核能系统技术发展路线图》，其中描述了被认为最具前景的六种先进的创新型设计，以及推动六种设计发展的研发的必要性。这六种设计分别是：气冷快堆（GFR）、铅冷快堆（LFR）、熔盐堆（MSR）、钠冷快堆（SFR）、超临界水堆（SCWR）和超高温反应堆（VHTR）。2014 年，GIF 发布了一份新的《第四代核能系统技术发展路线图》（GIF, 2014），评价了在组织成立的第一个十年内的工作进展，明确指出了目前面临的技术挑战以及不同技术可能的部署阶段。其中还描述了 GIF 在制定第四代反应堆具体安全设计标准过程中所采用的方法，这些标准主要是根据福岛第一核电站事故的经验教训制定的。

根据 GIF2014 年版《第四代核能系统技术发展路线图更新》，钠冷快堆、铅冷快堆、超临界水堆和超高温反应堆技术将很有可能成为首批被验证的第四代反应堆技术。快中子反应堆的优点是更好地利用核燃料（通过核燃料的多重回收利用，在铀含量相等的条件下，快中子反应堆产生的能量要比第三代轻水堆多 60 倍以上）和改善核废物管理，减少最终废物的长期放射性毒性。超临界水堆的主要优点在于与轻水堆相比它更经济，因为这种反应堆构造简单，工作效率更高。超高温反应堆的好处是具备高温反应堆的非能动安全特性，具备超高温热处理能力，可用于某些包括氢气大规模生产在内的热电联产应用之中。

图 7：核裂变反应堆技术的发展演变



资料来源：第四代核能系统国际论坛 www.gen-4.org

从图 7 中我们可以看到，在 2030 年以前，我们将无法看到第四代反应堆的部署。在其后的数十年中，第四代反应堆很有可能与先进的第三代反应堆一起发展，但其数量会远小于第三代。由于第四代反应堆能带来诸多潜在效益，因此需要开展一些研发活动和验证项目来推动其商业化应用，尤其是在核燃料及材料更加耐高温、较高中子通量或更耐腐蚀环境方面。原型机组的开发和测试尤为重要。如果想在 2030 年之前将第四代技术商业化，那么就必须在 2020-2030 这个时期段内建造出第四代反应堆原型，并投入运行。

目前有很多国家已经开始推动这些反应堆原型的设计和/或建设工作，为将来的第四代设计奠定基础。在快中子反应堆技术方面，俄罗斯有长期运营钠冷反应堆的经验，其 600MW 的 NB600 型反应堆于 1980 年并网，是全球在运的最大的钠冷反应堆。俄罗斯目前正在调试 800MW 的 BN800 型反应堆，并且正计划在 2030 年修建一座名为 BN-1200 的更大型的反应堆。法国目前正在推进作为产业示范的先进钠冷技术反应堆 (ASTRID) 方面的详细设计研究工作，预计将于 2019 年完成。中国目前正在运营自己的实验快堆 (CEFR)，一个装机容量为 20MW 的研究用反应堆在 2011 年并网，另

外正计划建立一座装机容量为 1000MW 的原型堆。印度虽然不是 GIF 成员国，但在钠冷快堆方面已经进行了数十年的研究工作，并具备使用钍增殖循环的潜力，因此印度计划在 2014 年年末之前要试运行一座 500MW 的原型快中子增殖反应堆（PFBR）。PRISM 型反应堆是美国在 20 世纪 80 年代基于一体化快堆技术开发出来的，因此一些国家正考虑将模块化钠冷快堆纳入钚（从乏燃料中通过再处理获取）回收策略之中。

就高温反应堆而言，中国目前正在建造首座 HTR-PM 原型堆，这是一座用于发电的双机组 210MW 反应堆。中国已经有一座运行时间超过十年的 10MW 研究堆（HTR-10）。高温反应堆的发展从本质上将主要依赖于如海水淡化或工业用热（参见以下章节）等的非电力应用的发展。

5.1.5 核聚变反应堆：2050 年以后

本路线图涵盖核电站技术至 2050 年的发展情况，以及这些技术在 2D 情景下对全球电力生产行业脱碳的贡献。对目前所有的核电站，无论是占现有机组主要部分的第二代技术核电站，还是待发展的全新的第三代核电站，都是通过核裂变作为热源。还有其他一些更具创新性的核能技术，例如 SMRs 或第四代核能系统，同样也依赖于核裂变。核聚变反应堆要比第四代反应堆有更长远的部署前景，而第四代反应堆预计会在 2030-2040 年左右与更先进的轻水堆设计一起发展。根据最近发布的核聚变能源路线图（EFDA，2012），在本世纪上半叶将不会看到工业核聚变反应堆的部署（参见专栏 7）。

专栏 7：核聚变——远期低碳电力来源。

核聚变发生在太阳核心内，在超过 1000 万℃ 的温度条件下氢被转化为氦的一个过程。核聚变的原料（氢的同位素氘和氚）事实上可以说取之不尽用之不竭，通过核聚变生产基荷电力几乎不会产生 CO₂ 的排放，并且只会残留少量的短寿命放射性废物，因此也基本不可能发生重大外部事故。但是，核聚变发电站的发展道路依然漫长，还需要主要的国际研发机构的进一步努力。国际热核实验反应堆（ITER）是世界上最大和最先进的核聚变实验，注入 50MW（用于加热等离子）能量的情况下能获得大约 500MW 的净盈余的核聚变能。ITER 还将验证核聚变发电站的主要技术。根据核聚变电力路线图（EFDA，2012），在 ITER 之后还会建设一座名为 DEMO 的原型发电核聚变反应堆。在 2021 年到 2030 年期间主要工作是开发和利用 ITER，以及设计和建设一座名为 DEMO 的原型发电核聚变反应堆。

DEMO 将用来验证净发电量为数百兆瓦的发电情况，还应产生足够数量的氚来闭合其自身的核燃料循环。事实上，尽管在自然环境中氚的数量非常丰富，但是氚在自然界不存在，需要生产。因此，有必要在 ITER 中测试氚增殖技术，然后在 DEMO 中进行更大规模的验证。DEMO 在除热和材料等其他关键领域也需要大量的创新。除了验证核聚变发电以外，要成功地用该技术作为供电来源，还需要其相对可再生能源或核裂变等低碳技术具有一定的竞争力。需要通过大量努力优化设计和材料，降低核聚变反应堆的投资成本。

5.1.6 核能非电力应用

核能的热电联产，特别是但不仅限于高温反应堆的热电联产，蕴藏巨大的潜力，并且核能可以针对电力生产以外的其他市场，提供低碳的热源，用以替代化石燃料的热生产。这将带来许多好处，比如可以减少工业热应用的温室气体排放，提高那些为此应用进口化石燃料的国家的能源供应安全。虽然核能热电联产的发展没有普及，但也不是一个成熟的概念。事实上，在核能集中供暖方面已经有了很多行业经验，比如在俄罗斯联邦和瑞士。瑞士的 Beznau 核电站（2x365 MW）已经为该国提供集中供暖服务超过 25 年。每年，大约有 142GWh 的热量被卖给约 2500 名客户，从而大约减少了 42000 吨 CO₂ 的排放。在芬兰或波兰的一些新建项目会考虑到核能集中供暖这个问题。

根据整个市场的电价（比如大量风电流入电网时）波动，核电站的热电联产还能在保持核电站基荷负载运行情况下，将核电站所发电力转换为热或用于制造氢气，提供“储能”服务。被制造出的氢气可以通过使用燃料电池将其再次转化为电力，或者注入天然气管道，这些做法可以给核电站运营商带来额外的收入。以上描述只是所谓的“核能混合系统”概念的一部分，在未来低碳能源系统中核能和可再生能源技术可以得到更充分地利用。

工艺热应用，尤其是以生产氢气（用于交通运输或石油化学行业或用于液化煤炭）为目的的工艺热应用是核能非电力应用的主要应用之一，而高温反应堆，特别是第四代超高温反应堆的理念非常适合应用于此。韩国目前正在推行一个项目，并且该国一家重要钢铁制造商对此非常感兴趣。其他方面，欧洲、日本和美国都在积极吸引工业界对核能热电联产的支持。目前这一应用面临的主要问题是缺乏具备工业热应用的高温反应堆原型示范项目。公私伙伴关系可能是启动这种项目以及验证核反应堆作为低碳电力和工业用热来源的优势的一种有效方式。

海水淡化同样有潜力成为核能应用的一个新市场。在非高峰时段生产淡水可以让核电站在基本负载水平基础上提高运营的经济效益。全世界近半的海水淡化能力（使用天然气和石油发电处理）集中在中东地区，如果能与海水淡化相结合，那么该地区的核能发电可能出现巨大的增长。许多 SMRs，例如韩国的 SMART、中国的 ACP-100 或俄罗斯的 KLT-40S 等，都是针对海水淡化市场设计的，但目前还没任何明确的项目落地。其主要原因是目前需要建立一个强有力的商业模式，其中涉及了核电站运营商、海水淡化装置运营商、用户以及使用热电联产发电站生产的淡水等各方面问题。

5.2 核燃料循环

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
在兼顾环保条件下，对铀矿开采进行投资，以满足远期需求预期。	2015-2035
各国政府应继续开展合作，讨论国际核燃料服务，将其作为巩固核电发展的一种方式。	正在进行
各国政府应确保制定好长期储存和处理核废物的政策，包括高强度放射性废物的地下深埋处理，不得推迟核废物规划的推出——“等等看”要不得。	2015-2025
必须开展相关研究，以确保乏燃料（SNF）的延期（干式）存储满足最高的安全和保障要求。	正在进行
各国政府应继续支持先进回收技术的研发工作，以减少高强度放射性废物的数量和毒性。	正在进行

全世界的反应堆每年大约会产生含 11000 吨的重金属（tHM）的乏燃料。由于反应堆数量的增加，每年乏燃料卸载数量还将不断增加。铀燃料当前的供应量完全能够满足到 2035 年及以后的需求（NEA/IAEA，2014）。但是，由于矿业项目的周期都较长，因此建议对这种项目进行持续地投资并推广最佳实践范例以推动环境安全的矿业开采工作。

当前世界核燃料服务市场（天然铀供应、转换、浓缩服务、燃料制备）具有很高的安全可靠，这为核能的进一步发展方面起到了重要的支撑作用。通过政府间或国

际协议处理核燃料租赁和存储问题，同样也可以提高核燃料的供应安全性。供应商将核燃料送至客户的过程中，保证最高水平的核安全是至关重要的。

激光浓缩技术在降低铀浓缩成本方面颇具潜力，但这有待于大规模运用的验证。目前尚无明显的加快这种技术部署的推动力。自福岛第一核电站事故发生以来，业界对能抵御事故的核燃料的开发重新产生了兴趣，使用这种燃料可以在出现严重的冷却剂丧失事故时给运营商提供额外的应对时间。但是，开发这些核燃料并保证其质量的可靠性还有很长的路要走，这取决于项目组对这项研究的投入预算。

专栏 8：瑞典地下深埋处置场安装启用的进展情况（案例研究 6）

关于现有核电站反应堆产生的乏燃料的地质最终处置，瑞典几十年以来一直积极主动地从事相关研究工作，以推动长期安全概念和技术的发展。瑞典不仅打算在乌普萨拉市（Östhammar municipality）的福斯马克（Forsmark）修建一座最终处置库，而且要在奥斯卡港（Oskarshamn）修建有一座封装厂。瑞典将在 2019 年和 2029 年之间对 DGD 进行建设和测试，而将乏燃料从 Clab 转移到 DGD 设施内则大约从 2029 年开始，直至 2075 年结束。KBS-3 地下深埋处置场的特征如下：

- 多屏障地质最终处理系统，使用铜质存储容器、缓冲器和基岩。
- 通过垂直隧道将存储罐下沉到地面 470 米以下做处置。隧道和竖井将采用膨润土缓冲层、粘土和岩石碎块填充。
- 在退役和关闭以后，无需因安全原因而进行巡查或监控。
- 表土区域将得到恢复，在运营期间及以后的时间内对土地使用的有限影响。

为了成功实施 DGD 项目，除了有专项基金的支持外，还应制定一个角色清晰及责任明确的工作进程规划。除此之外还需要时间、连贯性、耐心以及开放透明地听取意见。推荐为所在地市政当局制定附带明确退出可能性/条件的自愿参与程序。在最开始的时候，就在该程序中纳入并解释一些替代性选项（例如处置选项、场所的选择等）同样也是非常重要的。

对先进核燃料循环方面的研究，特别是在分离和嬗变方面的研究正在进行中。本研究的目的在于考虑从乏燃料中回收可重复利用的材料，并分离那些会导致热负荷和高强度放射性废物毒性的次锕系元素等元素。这些元素可以被整备和处置，或在快中子反应堆中被焚烧掉——因为这些反应堆符合某些第四代概念，或者会在专用的焚烧炉，如加速器驱动系统（ADS）中被消耗掉。

推荐采用地下深埋（DGD）来处置高强度放射性废物，但是这种方法实施需要长期规划、政府的政治承诺以及当地社区的积极参与。到 21 世纪 20 年代，芬兰、瑞典（一次通过式）和法国（闭式循环路线）将成为首批具有可运营 DGD 的国家（参见专栏 8）。欧盟在 2011 年采用了放射性废物指导方针，要求所有的成员国制定国家计划，管理乏燃料和放射性废物。该指导方针建议在地质处置库处置高强度放射性废物，并使区域性处置库成为可能。

虽然区域性处置库为那些计划发展小型核能项目，并且受地理条件限制的国家提供了整合资源及找到最佳 DGD 场所可能性，但是根据地质情况、安全性和国家的经济情况，区域性处置库的概念还有待更仔细的评估。

最后，对于中短期内没有 DGD 场所的国家来说，应该开展研究以确保乏燃料的延期（干式）存储满足最高的安全和保障要求。但是不能将这种方式视为 DGD 的替代选择。

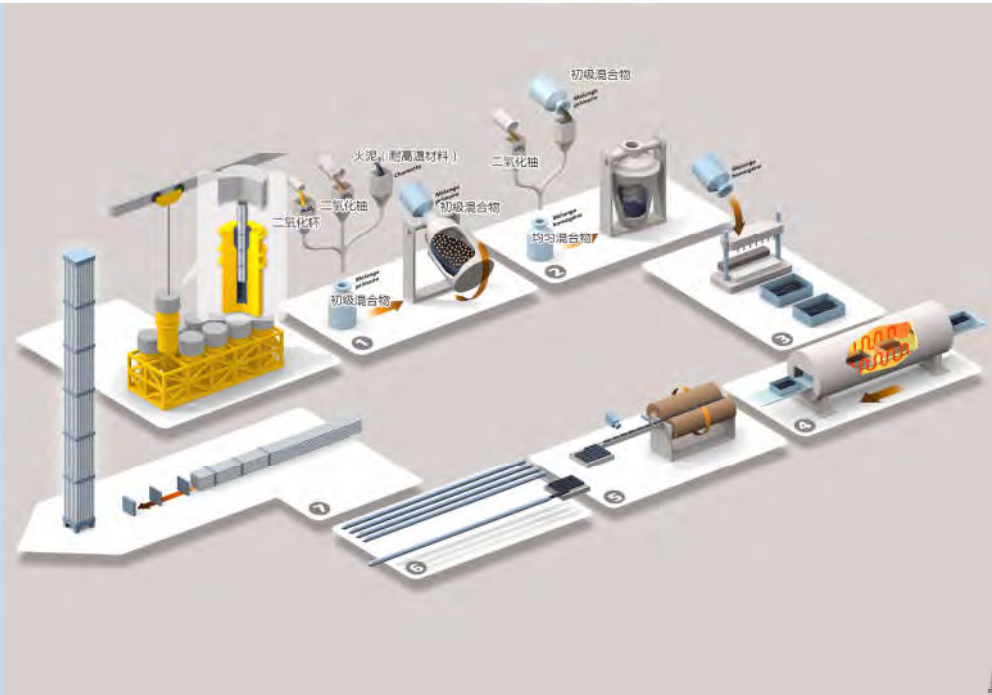
在资源管理（例如通过使用铀钚混合氧化物（MOX）燃料）、高强度放射性废物的隔离限制、以及未来 DGD 的规模方面，乏燃料的回收利用都具有许多优势（参见专栏 9）。随着快中子反应堆（FNR）核燃料多次回收利用的发展，以及随后次锕系元素耐受性核燃料的工业级验证，或快中子反应堆目标的工业级验证，可以预见乏燃料的多次回收利用将得到进一步的发展。

其他乏燃料回收利用的方法还包括重水堆和轻水堆的协同运营，目前该方法正在中国进行验证，其中核燃料由回收贫化铀组成，在秦山核电站 CANDU 一号机组得到成功使用（NEI, 2014）。

专栏 9：乏燃料回收利用（案例研究 7）

目前，回收乏燃料是一个已具有 45 年历史的完整工艺过程，通过该工艺可重新利用铀和钚来制造新的核燃料，同时将不可用部分整备成稳定形态。迄今为止，仅法国就重新处理过 30000 吨以上的乏燃料燃料，其中 20000 吨来自法国的核反应堆。这种做法有效地将乏燃料的临时贮存量降低了 50%，同时每年还节省了高达 20%天然铀消耗。这个过程的主要步骤包括分离可重新使用的和不可重新使用的材料、整备不可重新使用的材料以及制造新的燃料。

图 8：铀钚混合氧化物燃料（MOX）的制备



资料来源：法国阿海珐集团。

5.3 退役

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
各国政府应为核电站的退役活动留出一部分专项基金，而核电站运营商在运营期间也需要积攒足够的资金用来支付未来这些设施退役所需的费用。运营商应当定期检查这些积累的资金是否充足。	正在进行的
运营商应确保核电设施在及时、安全并以高性价比的方式退役或关闭。	正在进行

在未来的几十年中，核电站的退役将成为核电行业活动中越来越重要的一部分，因为在这段时间内将有数十座反应堆停堆。核工业界必须提供更多证据，表明其可以安全地以低成本拆除这些核电站。进一步发展相关技术（例如机器人技术）以及修改监管条件（例如，可以将核电站的非放射性物质作为普通垃圾或城市垃圾进行清理）将有助于实现这些目标。配备足够的资金支持退役活动非常重要，并且，政府有责任

确保这方面的财务安全。大多数国家都要求运营商拨出专项资金，而这部分资金成本将被转嫁到核电成本之中。

一旦核设施被永久关闭，无论是由于技术、经济或是政治原因，必须确保该设施不会对公众、工作人员和环境造成伤害。要做的工作包括移除所有的放射性物质、清污和拆卸设备，并最终彻底拆除以及清理工地。这个过程被称为核电站退役，包含数个阶段，可能需要很多年的时间来完成。普通民众通常不太了解核电站的退役活动，并且无事实根据地相信核设施的退役还未得到妥善解决，是导致核电公众接受度较差的因素之一。

由于未来数十年内有大量的核电机组退役，本路线图认为核设施的退役将成为一个巨大的挑战。然而，这种挑战同样也是一个全新的商业机会，并能推动许多技术的发展。证明停堆的核电站可以被安全经济地拆除，是顺利推进新建项目的关键因素。如今，在核燃料循环中，核电站退役活动受到了良好的监管，有具体的安全指导和标准（例如，IAEA、西欧核监管协会[WENRA]）。截至 2014 年 12 月，已有 150 座反应堆被永久停堆，并处于退役的不同阶段。在国际信息交流论坛上，可以评论这些流程，分享经验教训和最佳实践措施。除此以外，该论坛同样还是一个专业技术领域，运营商和新兴产业可以在此展开竞争（参见专栏 10）。

核电站的退役有两个主要策略：（一）立即拆除，包括关闭核设施，移除设备、建筑物和放射性物质，或净化到允许排放的水平，并在 10 到 15 年内终止运营许可。（二）延后拆除，保持核设施的存在，并进行监督，让放射性废物衰变——一般来说要 30-40 年，然后再拆除核电站，并净化厂址。还有一种被称为埋存的第三策略，即将核设施整体或部分封包在长寿命结构材料中。我们不推荐这么做，虽然在特殊情况下可以把它当做一个选项（例如在出现严重事故以后）。

得益于核电站专业技术人员的专业知识，公共事业单位越来越多地选择直接拆除，这也减轻了子孙后代的负担。

虽然如今已有了核电站退役所需的技术和程序，但是进一步发展技术和改进工艺将有助于加快未来核电站的退役活动，并降低成本。例如（E.ON, 2014）：

- 提升设计的标准化；
- 提高自动化；
- 开发更灵活的远程控制工具；

- 开发工具，测量拆除过程中的污染消除情况；
- 提高去污技术。

专栏 10：德国核电站的退役（案例研究 8）

在过去的 15 年中，德国公共事业公司 E.ON 从拆除 Stade 核电站（630MWe 压水堆）和 Würgassen 核电站（640MWe 沸水堆）的工作中得到了大量的经验。在 2011 年，E.ON 公司的 Isar1 号核电站（878MWe 沸水堆）和 Unterweser 反应堆（1345MWe 压水堆）都因核淘汰政策而停堆，此时该公司已经开始准备这些机组的退役工作了。E.ON 的专业性有赖于其开发掌握的大量技术，以及有合格的员工和制定好的程序及操作措施，包括辐射防护、检测、材料和表面去污，以及项目和团队管理。

在所有核电站退役项目之中核电站的规划是一个重要方面，规划通常是从项目后端开始往前设置的，特别是在放射性废物的处置方面。规划要求做关键路径分析，以避免项目中出现瓶颈（其中包括容易使用的核电站退役技术，并行拆除工作的相互干扰、以及许可授权或人事方面的问题），并确保所有阶段的工作顺利进行。应仔细规划和控制核废物存储和运输用存储容器，以及贮存桶的购买和交付。

除了规划方面，财务和人力资源管理也面临挑战：因为资金是根据目前的退役成本估算的，因此，确保在预算内完成项目的管理工作至关重要。从人力资源的角度来看，如何激励员工继续留下来维持核电站的运营也是一个重要课题。由于退役是核电站生命周期的最后一个阶段，因此公司应为员工规划好职业发展，以激励员工自愿参加退役项目，并在核电站被拆除以后会继续留在公司工作。

第 6 章推动核能技术的部署:行动和里程碑

在本章中确定了到 2050 年能够促进核能技术部署的一些行动。这些行动涵盖领域广泛，如许可授权和监管、核安全、融资、培训和能力建设、规范和标准、供应链和本地化问题、沟通和公众接受度问题。在促进政府和专家进行信息交流方面，国际合作发挥了重要作用，以确保希望使用核电的国家能够充分部署核能，并且能够满足最高的安全、防护和核不扩散标准。比方说，这就是国际核能合作框架（IFNEC）的任务。

6.1 许可授权和监管

本路线图建议采取以下行动	拟定时间安排
各国政府应保证监管机构具有强大的能力和良好的独立性，其工作人员应具备能够胜任相关工作的专用技能和知识，并得到合理的薪酬以确保他们能完成相应的任务。	正在进行
继续促进核工业界（例如世界核电运营者协会[WANO]或世界核协会[WNA]）、监管机构（IAEA、西欧核监管协会[WENRA]、多国设计评估项目[MDEP]、NEA 核管理活动委员会[CNRA]）或技术组织之间的国际合作。	正在进行
制定先进反应堆的许可授权机制，包括小型模块化反应堆和第四代反应堆。	2015-2030
在发展新的核能项目之前，必须彻底进行场地分析，包括环境影响评估以及对利益相关者进行咨询，要考虑从福岛第一核电站事故中得到的经验教训，以及可能造成的中长期环境变化影响，以确保项目得到公众普遍的支持。	正在进行

无论是新兴核电国家还是成熟的核电国家，都必须有强有力且独立的监管机构。这些监管机构的工作人员数量充足、并且有足够的实力能很好地完成他们的工作任务（NEA，2014a）。国际组织在促进有效监管、协调需求和分享经验方面发挥着重要的

作用（参见专栏 11）。特别地，不管是运营商之间或是监管机构之间的同业审查程序，都被视作一个提高核能安全总体水平的有效方法。

有时候，核能行业会担心过度监管的风险，比如监管要求大量增加或翻倍。为了实现对工业界进行有效地监管，就需要更好地对这些需求进行协调和统筹。

最后，为了加快新技术的应用，许可授权机制应有足够的灵活性，通过风险告知方式来对这些技术进行监管。目前，美国正通过能源部的许可技术支持项目来解决这方面的问题，该项目为美国本土小型模块化反应堆项目的认证发展和许可需求提供支持。其他国家也应对小型模块化反应堆和第四代设计之类的先进技术的发展提供类似的支持，一旦这些技术得到验证以后便可加快这些技术的部署。值得注意的是，目前在英国和加拿大已经有类似的监管制度出现，其框架中已涉及到以上所说的灵活性，以便于解决小型模块化反应堆和第四代技术方面将遇到的问题。一般来说，为了尽可能地减少重复的劳动和时间，最好的方式将一个核能大国已经成型的设计直接用于其它国家，因此有必要进行更深入的国际合作。

专栏 11：监管机构间的国际合作：多国设计评估项目（案例研究 9）

多国设计评估项目（MDEP）成立于 2006 年，是一个推动新技术发展的多国组织，该组织整合利用各国监管机构的资源和知识，其成员国均为正在或将要审查核反应堆设计的国家。MDEP 的业务已从主要为 EPR 和 AP1000 这两种新型反应堆做设计评估，扩大到多国共同参与合作设计新型反应堆并解决这些新反应堆所面临的相关问题。

MDEP 由 14 个国家的核监管机构组成，拥有五个专业设计工作组（EPR、AP1000、APR1400、ABWR 以及 VVER）和三个特定问题工作组（数字化仪控、机械规范和标准检验以及供应商的检查合作）。MDEP 会发布一些共同立场和技术报告，供公众使用。针对具体设计的共同立场描述了工作组成员在设计评审期间达成的共同结论。同时还鼓励国际组织在统一标准方面进行合作。MDEP 在推动他们开展合作方面起着决定性的作用，并将继续鼓励他们开展此类合作，包括标准开发组织的代码融合董事会和 WNA/CORDEL 的工作组。

选址和规划

核设施的选址是核能项目规划中重要的一部分，需要进行全面地分析，并应在做任何决定之前与当地社区积极交流沟通。虽然项目在设立之初已经进行了场址适用性分析，但在核设施的整个生命周期内都必须定期重新开展这项分析工作，以确保场址特征变更时，当初的设计依然满足其要求。并且场址特征有可能因为新的分析方法而发生变化。在如何开展选址活动方面，已经有很多的指导方针（IAEA，2012）。核电站建设适宜场址的评估和选择标准包括：

- 健康、安全和安保因素；
- 场址的地震活动情况，受极端自然事件或人为事故影响的程度；
- 工程和成本因素（例如冷却水的易用性、电力基础设施、与用电负荷中心的距离）；
- 社会经济因素；
- 环境影响因素。

在选址和分析中必须进行环境影响评估（EIA）（参见专栏 12）。必须提到的是，如果运营商想要在延长原始设计寿命或设计条件发生改变时（例如由于电力升级）继续运行核设施，考虑到新的运营条件和环境因素，应当重新进行环境影响评价工作。同时有必要让利益相关者参与到选址的整个过程中。

福岛第一核电站事故发生以后，人们更加重视无论是海啸还是其它原因（大坝破坝、极端降水事件）造成的大地震或洪水灾害给现有或未来核电站场址产生的影响。由此可能会减少国家在其核能发展规划中可选择的新场址的数量。另一方面，多机组场址这种特殊情况也受到更多关注，例如那些建设了多个核反应堆的场址。

到 2050 年，如果要新建数百 GW 的新装机容量，就需要扩展现有场址，建设额外的机组（如果场址合适的话），还要评估和选择新的场址。已经有核电站的国家通常更愿意考虑在现有的场址上建设新的核电设施，因为当地社区都已经了解了核能的风险和好处。

专栏 12：芬兰的环境影响评价（案例研究 10）

在芬兰，环境影响评价是核能设施许可授权过程中不可分割的一部分。环境影响评价这一过程可以保证在确定建设核能设施之前就考虑了设施对环境的影响。

在芬兰，环境影响评价贯穿核能设施的整个生命周期，以及核燃料循环的前后端。对冷却水的使用（需要大量的水来冷却核电站，并且释放的热量会非常庞大）、对动物、植物和生物多样性的影响，以及核事故及其后果等方面尤为重要。一次环境影响评价工作大约会持续一年。通过公众听证会与公民社会磋商是环境影响评价的基本部分。

2008 年，芬兰公司 TVO 对 Olkiluoto 核电站（有两台机组在运行，一台机组在建）的扩建进行了环境影响评估，在这次扩建中，该核电站增加了第四台机组 OL-4。在报告中，TVO 指出了在出现与气候变化有关的事故或现象等异常情况下，进行建设和运营可能会产生的影响（包括对土地使用、空气质量、水系统和渔业的影响）。

6.2 核安全

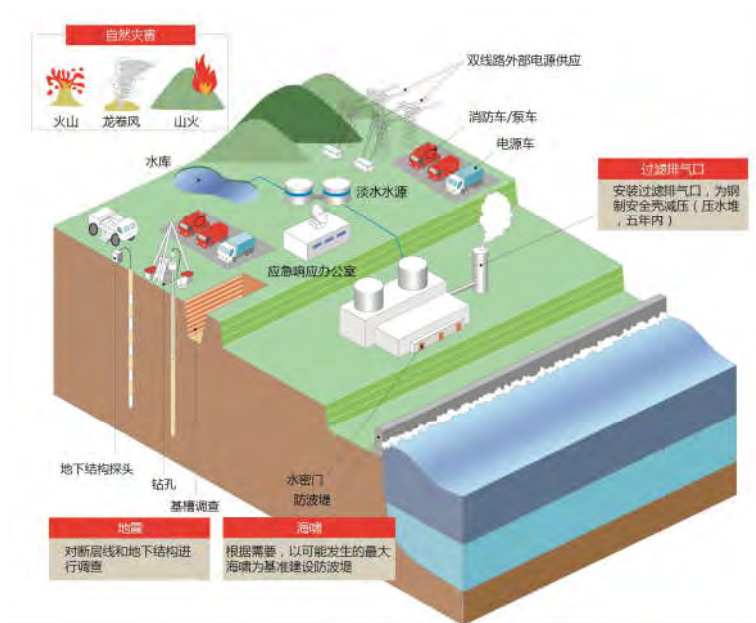
本路线图建议采取以下行动	拟定时间
核电站运营商应及时执行后福岛时代的安全升级。	2015-2025
应加强整个核电行业及各级工作人员的安全文化意识和监管力度（运营商和核工业界，包括供应链和监管机构）。	正在进行
各国政府应支持安全研究工作，并确保将结果传达给广泛的受众。	2015-2025

福岛第一核电站事故发生后，除了要求开展安全升级工作以外，监管机构还将加强的安全要求落实到位，以确保核电站以更加高的安全标准运行。特别地，日本对其监管系统进行检查和重组，确定其独立性，制定出新的安全要求（参见专栏 13）。目前，在允许重启之前，该国将根据这些新的安全标准对其 48 座反应堆进行重新评估。在 2014 年末，日本监管机构批准了四座机组的重启。在 2014 年 7 月，欧盟根据福岛第一核电站事故的经验教训、欧盟的“压力测试”以及西欧核能管制者协会和 IAEA 的安全要求修改了《核安全指令》。

专栏 13: 日本增强的新安全标准（案例研究 11）

福岛第一核电站事故发生之后，日本检查了其核监管结构，并进行了一系列重大改革，目的在于提升核能工业的监管水平，加强安全要求。日本将核监管机构从核能促进机构中分离出来，成立了日本原子能规制厅（NRA）这一独立委员会。除了改革核监管机构的行政体制以外，日本还采用了新的安全标准，以防止发生大量放射性物质释放的事故（图 9）。原子能规制厅根据最新的安全标准，目前正对日本的 48 座核电站机组中的 17 座进行检查。预计仅有少数几个可以完成检查，并被视为已经准备好可以在 2014 年底重启。日本核电站的重启可帮助该国大大减少电力行业 CO₂ 的排放。

图 9: 日本的新安全标准



资料来源: 日本电力企业联合会, 2014 年

俄罗斯联邦目前正在升级其监管机制，其中纳入了“压力测试”结果以及福岛核电站事故的经验教训，特别是在关于超设计基准事故和严重事故管理的特殊程序要求方面。俄罗斯同时还考虑了核电站设计和选址阶段外部的、自然的和人为的影响（也包括这些方面的综合影响），以及对安全分析报告内容的要求。

概率安全评估（PSA）等安全评估方法也处于改进和进一步发展中。监管机构修改对外部事故或火灾和水灾二级和三级概率安全评估的建议，鼓励将它们用作提升场

内和场外应急规划的工具。总体来说，政府应加大安全研究（包括严重事故的研究）的投入，并将研究结果传达给更广大的受众。

福岛第一核电站事故强调了在整个组织中提升安全文化建设的重要性。安全文化可定义为存在于单位和个人中的种种特性和态度的总和，这种概念超出一切之上，那就是核电站的安全问题由于它的重要性必须保证得到应有的重视。必须在整个核电行业（运营商和工业界，包括供应链和监管机构）加强各级工作人员的安全文化建设。

6.3核能发展融资

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
政府应支持核电，制定明确的政策和长期稳定的核能发展战略。	2015-2025 年及之后
政府应确保电价透明，并有稳定的政策可以保障对大规模资本密集型长期基荷电力供应方面的投资。政府所制定的政策应保障所有低碳发电项目之间的公平竞争。	2015-2020 年及之后
承建商的国家政府和东道国政府都应提供贷款担保，以降低融资成本。	正在进行
政府应通过碳交易计划、碳排放税或低碳电力委托管理等方式来促进投资者对低碳发电的投资。	2015-2035
工业界需要制定交流策略，针对机构投资者和其他金融机构进行教育，告知其核电站投资的经济效益。	2015-2025
制定再融资策略，将其作为项目融资计划的一部分，一旦核电站可运行且不再有施工风险，就应当实施该策略。其他策略应包括扩大融资来源，将其发展成为为长期融资来源，例如养老基金和其他机构投资者。	正在进行
工业界需要提升其“按时按预算”交付的能力，从而减少与建设相关的投资风险，这也需要有政府的担保。	2015-2020

为了达到 2D 情景中 930GW 装机容量的目标，在 2011 年和 2050 年期间，预计可能需要在核能行业投入 4.4 万亿美元。核电站的建设时长平均为五到七年，并且每座核电站大约需要花费 35 到 55 亿美元，核电项目的融资存在其自身独特的挑战。在核电站的融资过程中，要着重考虑施工延误和成本超支的风险。目前，政府通过国有企业或通过贷款担保大力参与大部分在建核电站，并且政府经常会主持或资助这些在建核电站项目。现今很少有公共事业单位有能力通过自己的财务支出独自建立核电站，而不需要某种意义的政府担保，或不需要以可预测的价格签署长期购电协议。

在为核电项目融资的时候，在国家层面上制定明确的核能发展承诺和长期策略至关重要。在理顺电力市场法规，确保这些法规可以有成效高效率地运行，从而限制融资成本相关风险的影响方面，政府能够发挥至关重要的作用。核电站的投资成本巨大，其总体经济性以及融资的可行性在很大程度上取决于其资金成本。通过对各种风险因素进行评估，可以确定其资金成本，并且，成功融资的关键在于首先尽量减少融资风险，其次使用恰当的所有权和承包模式来确定项目的资本架构，将剩余的风险恰当地分摊给项目参与各方。

不同利益相关者的角色和责任需要明确，如承建商、公共事业单位、东道国、国际承包商、地方供应链参与者和监管机构，以及投资人和融资机构。这样将有助于在利益相关者之间更好地分摊风险。核电站建设的主要风险包括建设风险（成本和建设周期）、电价风险和监管风险，这些风险会对规划和建设时间（核安全监管）以及负荷因子（电力市场监管）造成影响。另外，国家（政治稳定性）和汇率风险同样重要，但是可以通过不同的规避或保险机制或通过政府担保来规避此类风险。

6.3.1 电力市场

在稳定投资者信心，建设新核电站项目方面，政府可以发挥重要的作用。制定明确可预测的长期电价，让投资者获得足够的投资回报非常重要，这也可以提升银行对项目担保的意愿。在受监管的电力市场中，受控制的电价有助于提升投资者的信心。如果在合同内加入了明确的诉讼条款，投资者一般都会相信，在受监管市场中运营核电站的公共事业单位能够通过卖电收入偿还债务。这些卖电收入由能源市场的监管机构确定，一般都用来支付燃料成本、运营和维护成本、核废物管理和退役费用、折旧

成本、债务偿还和投资者的资本回报。受监管的电力市场能够有效地帮助规避建设和市场风险，从而促进大型资本密集型项目的融资（参见专栏 14）。

而在自由市场中，由于长期电力价格的不确定，导致利息成本增加，会造成核能行业的融资变得困难。资金成本的上升，使得大部分项目对投资者来说毫无吸引力。要克服这些不确定性，让投资者有信心投资核电站项目，就需要与投资者签订类似英国差别电价合同（CfD）的长期购电协议。英国的差别电价合同通过立法将核电站的供电价格固定下来，根据市场参考电价和履约价格之间的差额的情况，让用电客户根据“履约”价格支付费用。差别电价合同的设计初衷是为了帮助投资者规避电力市场的波动，尤其是在预计可再生能源间歇性供电水平较普遍的情况下，在某些极端情况下电力价格会降到 0 或 0 以下。这种约定还有助于投资者应对未来的政治风险或政府核能政策的转变。在风险分摊方面，核能项目开发商将承受所有的项目风险，而承建商则通常需要承担大部分的建设风险。

目前所有的低碳政策依然以碳价为主要依据，无论是碳交易计划、碳排放税，还是强制公共事业单位使用低碳能源，都需要鼓励投资者对低碳能源进行投资以加快核能的部署。碳价格能够反映化石能源发电的外在性，因此，在缺乏足够高碳价格的情况下，政府有必要继续提供政策支持，提高低碳投资的净现值，并降低项目开发者和金融投资者所面临的市场风险。

专栏 14：美国佐治亚州 Vogtle 核电站新机组的融资情况（案例研究 12）

美国南方核电运营公司目前正在佐治亚州的 Vogtle 核电站内建设两台新核电机组，该核电站内已有两台处于运行状态的西屋公司压水堆。这是美国近 30 年来首次建设新的核反应堆，该项目由两台 AP1000 型机组组成，每台机组的装机容量为 1200MW。Vogtle 核电站由美国南方核电运营公司运营，其所有权属于以下四家公司：佐治亚电力公司（45.7%）、奥格尔索普（Oglethorpe）电力公司（30%）、佐治亚州市政电力管理局（MEAG）（22.7%）和道尔顿（Dalton）电力公司（1.6%）。为了加快新型先进核设施的发展，美国政府根据 2005《能源政策法案》制定了两种形式的激励政策。首先，在核电站运营的前八年中给予 18 美元/MWh 的生产税减免。其次，提出了一个贷款担保体系，贷款额度可以高达新型先进核设施建设成本的 80%。

在成功开发 Vogtle 核电站新建核能机组的过程中，佐治亚州的市场和监管条件发挥了重要的作用。佐治亚州有受监管的电力市场，项目参与者有限，因此整体的市场竞争强度有限。佐治亚州电力市场的结构特殊，可以确保电力需求的稳定性，保证发电公司的低风险环境，这对核电项目的发展来说非常有利，因为核电项目是高度资本密集型项目，但是从长远来看，核电项目能够提供一个较低较稳定的发电成本。在 Vogtle 核电站的建设过程中，监管机构允许佐治亚电力公司向客户收取建筑工程建设（CWIP）费，即将电力价格提高了大约 7%。通过收取建筑工程建设费，佐治亚电力公司能够更有效地满足新建核电站融资的需要，反过来降低了客户的长期用电价格。Vogtle 核电站的两个主要股东都有类似的公司结构和电价安排，可以有效地帮助它们规避建设风险和市场风险。

6.3.2 支持核电开发的融资计划

自 2010 年《IEA/NEA 核能技术路线图》发布以来，有两个事件给核能发展的商业银行融资带来了新的课题。首先是银行业采用了第三代巴塞尔协议，该协定限定了银行的贷款金额上限，并有效地降低了银行长期债务的可能性。其次是福岛第一核电站事故导致许多银行开始重新评估自己的核能项目贷款政策。但是，也有一部分银行在该事故发生前就已经融资给了核能项目，目前他们表示还是会考虑继续给核能项目贷款。不幸的是，在很多有兴趣发展核能的市场中，因其批发电价都过低，使得这些资本密集型项目的融资更加困难。

政府和运营商应对与核事故相关的损失预估方法及相应的成本评估方法进行考核，还需要考虑这些方法对现有债务制度的影响。通过分享课程帮助利益相关者了解企业在技术领域、组织管理、规划和预算编制等方面存在的风险，让投资者更容易接受。在核能项目融资方面，还要考虑信誉风险、环境责任和对国际制度的承诺以及相应的标准。福岛第一核电站事故以后，很多银行制定了与核能产业有关的贷款政策，有些政策采用了一些环境和社会指导方针，根据项目的环境和社会影响对项目进行分类。

政府通过出口信贷机构或以政府担保贷款的形式参与融资对核能工业来说依然非常重要，因为政府的参与能够降低总体融资成本，规避包括地缘政治、监管和建设等方面的大量风险。

鉴于最近发生的事件的影响，比如，公共事业单位在获得大额长期贷款的可能性越来越小，或者这种贷款变得不具有经济性的情况下，可以通过参股的形式吸引承建商融资。俄罗斯国家原子能公司 Rosatom 的“建造-拥有-运营”（BOO）模式就是这种潜在融资方式的一个典型案例（参见专栏 15）。大多数承建商本来就不太愿意参与核能项目的融资，而当前的融资环境使得没有这种支持，核能项目融资会更加困难。承建商融资能够解决短期资金紧缺的问题，但是从长远来看，还需要一个更可持续的模式，使得公共事业单位能够从市场中为这些项目获得资金。在某些地区，伊斯兰债券也可作为支持核电项目投资的一种潜在融资工具。

在芬兰使用的 Mankala 原则就是最初使用的一种方法，这种方法将那些有电站（可以是水电站或核电站）股份的电力消费者（一般来说是能量密集型工业，如纸浆和造纸工业，以及市政当局）联合起来。这些利益相关者支付全部的成本，获取电站相应的发电份额。Mankala 型项目不会受到电价风险的影响，并且它的股东可以从长期供电合同和稳定的电价中获益。

开发银行目前在核电站融资方面所能起到的作用尚不明确。尽管目前这些银行并不为核电站融资，但它曾经为以前的项目提供过该项服务，并且具备帮助对核能感兴趣的发展中国家发展核能的潜力。由于政治因素以及核能项目所需要的资金量十分巨大，因此对多边开发银行来说，要独立支持整个核电项目是非常困难的。但是这些开发银行可以通过提供规避政治风险的保险，在推动更高水平的私人融资方面发挥重要作用。

通过在碳市场、碳排放税和排放指标或无碳电力供应委托管理等方面等低碳能源领域提供投资激励措施，也能够鼓励投资者对核能行业进行投资。我们还应当将核能的重要性提高到与其他低碳能源相同的高度。

最后，为了降低总体融资成本，一旦核电站建成并开始运行后，就应推动和实施再融资策略。由于此时已不存在建设风险，且核电站能够产生大量的现金流，项目风险大大降低，因此融资成本也会降低。而承建商或公共事业单位可以将通过再融资得到的资金投入到其他项目中。

专栏 15: 阿库尤 (Akkuyu) 核电站的“建造-拥有-运营”模式 (案例研究 13)

阿库尤 (Akkuyu) 核电站项目将成为土耳其的首个核电站项目，也是采用“建造-拥有-运营”融资模式建设的首个项目。俄罗斯国有能源公司 Rosatom 负责该核电站的工程设计、施工建设、运营和维护，并将持有 100% 的原始股份。阿库尤 (Akkuyu) 核电站的总装机容量将达到 4.8GW，由四座 VVER1200 型机组 (AES-2006 设计) 组成，采用了第三代设计，符合先进的安全要求以及非能动安全系统和能动安全系统。

Rosatom 公司提供项目的启动资金，并在后期会将高达 49% 的项目股份出售给投资者。项目总成本预计为 200 亿美元，该项目签署了一份 15 年的购电协议作支撑，以均价 12.35 美分/kWh 的价格出售前两台机组 70% 的发电量以及后两台机组 30% 的发电量。

阿库尤 (Akkuyu) 核电站的建设得益于俄罗斯和土耳其双方政府的强力支持，突出了大型核电项目开发过程中政府间关系的重要性。对专业技术和资源有限的新兴核电国家来说，Rosatom 公司的“建造-拥有-运营”模式是一种具有非常吸引力的全方位服务模式。通过“建造-拥有-运营”模式，Rosatom 将为核电站提供工程设计、施工、运营和退役服务。

6.4 培训和能力开发

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
各国应承担起国家技能评估的职责，培养充足的核能高级技术人才，以满足现有核电站运营、未来核电站退役，以及新核电站建设对高级技术人才的需求。这项评估还应包括对核监管机构和研究人员的培训，为替换退休人员做好人才储备。	正在进行，持续到 2020 年
在核电站的施工和运营阶段，新兴核电国家都应评估核能熟练技术人才的需求量，包括核监管机构将来可能需要雇佣的人员数量。	2015-2025
新兴核电国家应制定当地的培训项目，有针对性地发展具有核能意识和核竞争力的专业技术队伍。	2015-2025

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
成熟核工业国家的企业和政府也需要开展一些项目，以保护未来几十年内即将退休的人员经验和知识。可以开展指导项目来确保核能知识、经验教训和最佳实践案例在运营商、监管机构、核废物管理和核电站退役专家之间能够有效地传递。	2015-2030
开展国际合作，将有核国家的核培训项目转移到新兴核电国家。新培训/教育的技术人员在其国内核能机组投入运营之前，需要给他们提供实践机会学习并掌握技能。	2015-2030
具有核能研究生培训项目的有核国家应针对新兴核电国家开展国际交换生项目。如果可能的话，在这些项目中应包含在核设施内有一段时期的实际工作经验，并有可能在新兴核电国家内制定相同的培训项目。	2015-2030
落实政策，吸引和留住高水平的监管人员。	正在进行
需要开展国际合作来统一这些培训项目，以实现国际水平资格的互认。	正在进行

核能及核燃料循环的不同特性决定了其对教育和培训的特殊要求。在所有制定了核能发展规划的国家中，都有大量的核电机组需要安全地运行、维护和最终退役。除了核能技术的研究和开发以外，配备熟练的专业技术队伍是保障所有核设施的使用和安全运行的一个重要因素。所有有核国家都应把维护安全的教育和培训放在首要位置。虽然我们通常把教育和培训视作两个独立的过程，但是在建立和维持一个有能力的核能专业技术队伍时，这两者是相互联系的。

未来全球与核能相关的项目对核能专业技术人才的需求将达到数万人（NEA，2012c）。核技术的需求与劳动力的老龄化的趋势相比，更加凸显了培养年轻的合格的技术人才，以及吸引这些人才长期服务于该行业的紧迫性。今天需要做出决策，以确保在未来的几十年内有足够的基础设施用于核能教育和培训。

图 10：核能部门及其职能的说明性分类



资料来源：NEA(2012c)

NEA 在 2012 年发布了《核教育和培训:从关注到能力》，其中对 NEA 成员国当前的核能教育与培训状态进行了评价，并指出成员国在技术发展中需要采取的行动以及需要填补的技术空白。建立核工作简介或“工作分类法”的分类系统是这项工作的一部分。这种分类法囊括核反应堆从新建到运营和退役的整个生命周期，也包括研究和核监管，并根据功能对它们进行分类（图 10）。每个部门的各项职能都包含一份工作规范，其中明确定义了所要求的职业水平和能力，以及一系列初始资质，并通过对人员的咨询性培训和连续的专业训练来支撑这个工作规范。由于只有少数几个国家会涉及整个核燃料循环，因此该分类里面没有涉及到核燃料循环的事项。

6.4.1 人力资源评估

在未来几十年内，核能行业将会面临大批工作人员退休的局面，因此必须落实评估政策，以保证未来有充足的合格人员和技术工人可以支撑核能规划的发展及所需的监管功能。一些国家优先考虑吸引和留住高水平的监管人员。现在很多国家已经意识到了这种需求，它们正在促进教育和培训项目，以增加核电行业的人力资源储备。在维持现有核电站、新核电站建设和运营配备员工所需的人力资源方面，法国、日本、韩国和英国等国家已经展开了相关的国家评估（参见专栏 16）。

专栏 16: 英国的核技能评估（案例研究 14）

英国政府承认发展核技能是推动新核能项目发展的关键因素，因此为了解决英国核能发展规划所需的当前的和未来的核技能问题，英国政府还专门成立了一个核能技术联盟。该联盟汇集了政府、专业技术机构、高等教育和研发团队，他们除了提供核能劳动力市场的信息外，还给出干预和缓解方案，以确保英国的核能工业拥有足够的能力去应对当前和未来的核能规划的需要。据该技术联盟估计，到 2025 年，如果新建装机容量要达到 16GW，除去制造环节，大概每年需要 110,000 到 140,000 人来完成该计划，并且在 2020-2022 这一时期内会达到年度雇佣高峰，达 14,000 人。

该联盟制定了一份介绍全球技术进步状况的风险登记册，并对这些技术展开持续性评估工作。该风险登记册划分了 34 个技能领域，其中 13 个的优先级别很高。《核劳动力市场情报》发布于 2012 年 12 月，其中概括描述了一份普通技能的输送计划。该计划列举了 22 个要优先输入到英国核项目的技能领域，并确定了 100 项以上的关键行动。随着国家核能规划的不完善，可将定性评估与定量评估结合起来支持国家技能评估，定期对国家技能评估进行监督和升级。

对新兴核电国家来说，为核计划的启动培养人才是一笔非常重要的投资，国家要提供激励政策吸引并培养青年人才，以确保本国核项目启动时，他们能合格上岗。由于核能项目的发展和实施筹备期较长，并需要工作人员具备一定的实际操作经验，因此其培训项目中还应包含在国外实践的内容。培训结束后，新兴核电国家的还应出台极具吸引力的激励政策，以确保这些经过培训的核能技术人才愿意返回自己的国家参加工作。可将研究用反应堆的研发工作视为发展并保持核能与能力的一种有效途径。

6.4.2 核技术培训和教育的国际化

在核工业全球化不断加快的同时，其研发的国际化程度也在不断地提升。这主要是因为各国不断缩减国家级研发经费，并促使各科研机构只能通过国际交流平台来寻求资源、共享实验设备和开展项目。目前，许多国家通过这些平台在科研、教育、培训和知识管理合作等方面已经开展了许多的国际或双边活动。这些平台包括欧盟可持续核能技术平台，该平台将核工业界、研究和学术领域集中到了一起；还包括第四代

核能系统国际论坛，该论坛为第四代核能系统的国际研发工作提供了一个良好的平台。NEA 本身会支持诸如规范验证标准或安全实验的国际项目。

全球核工业界清醒地意识到，他们需要有核国家和新兴核电国家的核技能得到高水平的发展，并且应该通过提供重要的核技术培训资源将优秀的培训项目分享给这些国家。此外，世界核大学（WNU）和欧洲核教育网络（ENEN）已建立了全球合作伙伴关系，共同致力于提高核能发展的国际教育和培训。

在 IAEA、OECD/NEA、WANO 和 WNA 的支持下，世界核大学于 2003 年成立，为下一代核能工业领袖的培养提供全球性指导，提高全球范围内的核教育水平。世界核大学包括夏季学院（为期六周的未来核能领袖强化课程）、辐射技术学院（为期两周的辐射和放射性同位素领域未来领袖课程），以及为期一周的当前核能工业核心问题课程。这些课程一般由对核能发展非常感兴趣的⁷国家主办。来自核工业界、政府部门和学术界的其他组织和培训机构也会参与合作，举办培训活动。世界核能协会为世界核大学提供了行政支持。迄今为止，已有近 900 名专业人士参加了夏季研究所的培训，有 200 人出席了辐射技术学院的课程，并且大约有 6000 人从为期一周的培训课程中受益。

核能专家的跨国流动，对于提供充足的核专业技术人才（例如核工程师和焊工）与将专业的核能知识传递给新兴核电国家都非常重要。英国的技能护照和法国的票务系统为不同国家之间资格互认提供了良好的基础，有助于支持技术人才的流动。

6.5 规范和标准、供应链的开发和国产化等事项

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
核工业界应继续努力，统一规范和标准，以加强全球供应链的整合。	正在进行
新兴核电国家对核项目国产化的合法要求应适当平衡，考虑对总体成本有效的合格供应链的需要。还应认真制作全球和当地供应链平衡的指导指南。	2025

⁷有关世界核大学的其他信息可以访问：www.world-nuclear-university.org。

目前有 70 座反应堆在 15 个国家进行建设，并且还有数个新兴核电国家处于核能发展项目规划的各个阶段（例如印度尼西亚、约旦、马来西亚、波兰、土耳其、沙特阿拉伯、越南），或者还有一些已经开始建设核电站（白俄罗斯和阿联酋）。为了实现到 2050 年核电装机容量达到 930GW 这一目标，还需要启动更多建设项目，并且，如果想要以性价比的方式实现这一远期目标，那么核工业界将需要解决两个特别的挑战：（一）通过统一规范和标准增强反应堆设计的标准化；（二）确保本地和全球核供应链的合格性，并确保没有会导致项目延误的瓶颈存在。

加强标准化以及增强规范和标准的统一被视为改善新建项目性能以及降低成本的有效途径。但是，考虑到不同设计和国家监管机构的数量，期望在短期内出现国际许可授权程序，或国家间相互接受对方的审批是不现实的。通过信息交流，以及吸取在许可授权和安全检查中学习到的教训，将有助于简化监管流程，统合监管要求（这个是多国设计评估项目（MDEP）行动的目标）。核工业界已经开展工作推动核反应堆设计的标准化——这是世界核能行业协会的 CORDEL 行动的主要焦点。

在供应链方面，获取大型重型锻件以前被视为潜在的障碍，但现在不再是一个问题，因为很多中国、法国、日本和韩国的工厂都能够生产这些大型部件，并且这些工厂的工业生产能力能够满足大型部件的中短期需求。核电项目供应链的资格认证，以及在满足不必发展核工业国家的国产化需求和建立一个成熟合格的全球供应链之间寻求平衡，是核项目开发人员所面临的主要问题。

在新兴核电国家启动新核电项目的时候，本地化可能会成为一个挑战，特别是如果新建核电站合同规定了很高的自主化要求。有大型核电项目的国家可以取得成功的本地化，有助于降低未来核电站的成本（参见专栏 17）。

专栏 17：建立合格的第二代和第三代反应堆技术供应链：中国的重型部件生产制造案例（案例研究 15）

在 2014 年年底，中国有 26 座反应堆在建，其新建项目占全世界核反应堆建设项目的 40%。其中一半反应堆为二代加 CPR-1000 型反应堆，它源自供应商法国法马通公司（现在的法国阿海珐集团）的大亚湾核电站，以及岭澳核电站的 900MW 反应堆，目前的国产化率超过了 80%。1995 年，法国阿海珐集团与中广核在岭澳一期项目中开

始启动设备国产化计划，但是该计划直到十年后中国核能项目加速发展才得到实质性的进展。为了启动供应链本地化计划，同时尽量减少项目的进度和成本风险，中广核与法国阿海珐集团制定了一项现实的国产化计划，并将该计划纳入了供应合同。在项目实施期间，中广核和法国阿海珐集团建立了严格的监督跟踪制度，以确保设施部件按项目进度表交付。

对巴西、印度、南非共和国、沙特阿拉伯和英国等计划在新建项目中进行部分供应链本地化的国家来说，中国的成功经验将有助于它们解决本地化方面的问题。

表 5：本地化方面的进展

设备	岭澳一期 900MW 反应堆(1994)	岭澳二期 CPR-1000(2004)	台山核电站 2 号机组, EPR 1600MW(2009)
蒸汽发生器	1 个 (总共 3 个)	3 个 (总共 3 个)	4 个 (总共 4 个)
反应堆压力容器	0	1	1
稳压器	1	1	1

供应链的本地化和全球化需要得到很好的平衡，该平衡取决于该国本地化过程中过去和将来的核能发展规划的程度。为此提供指导将有利于实现这一平衡。但是，新供应链的资质认证依然是一个挑战。在曾经拥有核工业的国家建立核工业供应链，也会是一件很困难的事情。十年或二十年内不进行核相关活动足以让这个国家失去宝贵的先进技术和制造能力。意大利最近考虑重新启动核计划，组织了一次对其核能工业的综合调查，确定哪些公司能够参与新建项目（参见专栏 18）。英国目前正在积极推进其新建项目，在 2012 年发布了“供应链法案计划”，并在 2013 年发布了一份名为《核工业战略》的文件，推动英国核工业供应链的发展。同时，通过核工业协会，核工业界建立起了一个供应链门户。意大利国家电力公司、英国政府和核工业界所采取的行动就是为核电项目打下坚实工业基础的好例子。

专栏 18：在工业发达国家为新建项目做准备：供应链调查（案例研究 16）

在对未来新建项目的准备中，意大利政府于 2009 年要求意大利国家电力公司为意大利的公司制定一个核能认知和资格认证程序。意大利政府的目标是让意大利的工业界能够在新建项目规划中发挥很大的作用（例如，最后一台机组的建设达到 70% 的国产化目标）。2009 年 10 月，在意大利工业协会的支持下，意大利国家电力公司（Enel）和法国电力公司（EDF）启动了一项有针对性地筛选意大利工业界的市场调查。不幸的是，在福岛第一核电站事故发生以后，意大利放弃了该行动，决定暂停核活动。

然而，通过这项准备工作，意大利国家电力公司（Enel）总结出，要提高本地化水平，就需要采取一系列措施，例如提供政府刺激计划、与合格的国际核工业供应商建立合作伙伴关系，以及获得国内工业界专家的支持。在这项市场调查中发现，关键在于核蒸汽供应系统设备，以及与核工业质量管理有关的一些方面。在调查中，还特别确定了核设备资质证明的执行计划的必要性，以及加强核工业规范和标准管理的必要性。根据确认，目前有六家意大利公司还在核能领域内活动，具备核能技术供应商的资质。另外，还有 60 到 70 家公司以前有过核工业方面的经验，一旦出现新的机遇，这些公司就可以在合理的时间范围内以相对较小的代价重新获得这些处于“休眠状态”的核技能。从定性的角度来看，这项调查广泛而详细地展示了意大利工业界现有的能力和将来的潜力，让工业界意识到其拥有的力量，以及需要改进的领域。

6.6 交流沟通和公众认可

引进核能，扩大核能的作用，需要得到包括公众在内的所有利益相关方的支持，还要以风险和收益评估做基础。对能源安全以及气候变化带来的威胁来说，核能在这方面的优势往往被一些核担忧所遮盖，这些担忧包括核安全、发生事故的风险、放射性废物的管理和处置，以及潜在的核武器扩散。

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
建立教育和信息中心，支持有效透明地交流沟通，让公众了解核能工业相关的事实情况。在新兴核电国家，确保公众更广泛地了解核电发展尤其重要。	2015-2030

本路线图建议采取以下行动	拟定时间
<p>在很多国家，在出现事故时，核设施运营商应带头与利益有关者进行实时沟通。在这种情况下，在批准涉及核设施的活动之时，监管机构应该检查运营商的策略和计划，并进行认证。监管机构同样还应定期评估计划的执行情况。</p>	<p>正在进行</p>
<p>需要有针对性地开展一些沟通项目，比如与政治家、媒体人、教师和地方领导等有影响力的利益相关人士进行沟通，增强他们对核能利弊的理解。应通过一系列人员、媒体和在线资源，定期开展透明的沟通活动。</p>	<p>正在进行</p>
<p>采取措施，及时分享国家监管机构所提出的所有安全事件的信息。</p>	<p>正在进行</p>
<p>国家监管机构需要提供交流的机制和工具，方便有关各方和监管机构之间的交流探讨。</p>	<p>正在进行</p>
<p>定期与所在地市政当局进行明确的交流，讨论地下深埋处置场的确认和开发。推荐制定附带明确退出条件的自愿参与程序，并在制定之初就纳入替代性场所。</p>	<p>2015-2030</p>

应因地制宜制定成功的核能交流策略。要制定成功的交流策略，理解当地社区的担忧和需要，并对此做出反应是成功制定交流策略的关键。项目开发需要时刻关注利益相关者的担忧，并对此做出反应。以提高公众对核能认可为目的的交流策略必须清楚透明，并以事实信息为基础。教育的重点在于交流。需要制定一些公共教育项目，清楚地解释核能的风险和好处，并将这些项目作为国家核能发展决策的一部分。必须使用通俗易懂的语言，简单明了地解释核安全以及放射性保护的情况，还要在核能公众认可项目中突出核能的积极方面（例如提供就业岗位以及加速地区和区域经济的腾飞）。

在 2009 年，欧盟委员会在 27 个成员国内开展了一项欧洲意向调查，以了解公众对核安全的感受（EC，2010）。该调查的结果发现，总体来说，在一定程度上欧洲公众舆论普遍接受将核能开发作为降低能源依赖性的一种手段，并且，对核能发展的反对主要是跟公众对核能风险的感受有关。研究发现，大部分欧洲人认为自己核安全了解不够，他们主要是通过大众媒体来了解这方面的信息，他们认为这样是不够的。

受访者认为，如果他们能够了解更多关于核安全的信息，那么很明显他们会更愿意支持核能发展的价值，并且更愿意接受核能。

芬兰和法国就是成功开展核能交流和公众认可项目的例子。芬兰投入了大量的时间和资源来教育当地社区，告知他们核废物处置库或新型反应堆等核设施给当地带来的利益和风险，法国的地方信息委员会已经在核设施周边开展了数十年的工作。它们为利益相关者提供了有效的沟通交流平台，让公众能够了解这些信息。

监管机构开展透明的交流并发布透明的信息非常重要，有助于他们建立信心监管核设施运营，并获得公众对他们能力的信任。如果某个国家机构发布的信息不一致的话，将会影响到人们对其他地方监管机构的信心。必须与国家监管机构保持密切联系，并及时地分享安全事件方面的信息。

最后，在与公众交流沟通，告知核能现在和将来在电力行业温室气体减排方面的积极贡献之时，政府、政府间组织，尤其是致力于改善气候变化的单位应发挥重要作用。本路线图及附属的 2D 场景突出了核能在世界能源体系脱碳方面能够发挥的重大作用。

第 7 章结论:利益相关者应采取的短期行动

本路线图设计了一些里程碑，国际社会可以用其来衡量和评估工作进展，以确保核能发展达到 2050 年减排目标。

以下内容总结了核能利益相关者所要求采取的一些短期行动，指出了在具体工作中应该起带头作用的单位。在大多数情况下，每个行动都需要更广泛的参与。IEA 和 NEA 将与政府、核工业界和非政府组织利益相关者一起报告核能发展的进展情况，如有需要还可建议调整本路线图。

主要利益相关者	行动
政府	<ul style="list-style-type: none">• 明确承诺发展核能，并制定长期战略。• 认识到长期运营对维持低碳发电能力和能源供应安全的重要性；提供明确的前景，鼓励运营商投资翻修核电站。• 支持安全研究工作，确保研究结果传达给广泛的公众。• 继续开展合作，讨论国际核燃料服务，将其作为巩固核电发展的一种方式。制定好长期储存核废物的政策，包括高放废物的地下深埋处置• 继续支持先进回收技术的研发工作，以减少高放废物的数量和毒性。• 确保建立保障核电站退役活动的专项基金，并确保运营商在运营核电站期间向基金投入足够的资金，定期检查所累积的基金是否足够。• 小型模块化反应堆原型能够验证模块化设计和建设的好处，与核工业界展开合作，加快小型模块化反应堆原型堆的部署，打开小型模块化反应堆的市场。• 支持第四代系统的研发工作和原型堆开发，确保第四代技术能够在 2030 年至 2040 年期间部署。• 确保监管机构具有强大的能力和良好的独立性，并配备有足够技术娴熟的合格员工，以确保他们能完成相应的任务。• 鼓励先进反应堆许可授权机制的开发，包括小型模块化反应堆和第四代反应堆的许可机制。• 扩大核工业界的公私合作关系，以开发海水淡化或制氢等领域的核热电联产示范项目。建立教育和信息中心，支持有效透明地交流沟通，让公众了解核能工业相关的事实情况。

核工业界	<ul style="list-style-type: none"> • 核电站运营商及时开展后福岛时代安全升级活动。 • 优化第三代设计，改善可建设性，降低成本。 • 吸取当前首堆建设的经验教训，确保第 N 个（NOAK）核电站的建设按时按预算完成。 • 投资环境可持续铀矿的开采，以满足远期需求预期。 • 确保停堆的核设施以及时、安全并以成本有效的方式退役。 • 在整个核电行业加强各级员工的安全文化建设。 • 加强与机构投资者和其他金融机构的沟通，更好地告知这些投资者核电站投资的经济效益。 • 继续统一规范和标准，加强全球供应链的整合。
大学和其他研究机构	<ul style="list-style-type: none"> • 对核电站的老化进行研发，提高安全性，以保障现有核电站的安全长期运营，使其能够安全运行 60 年或以上。 • 开展相关研究，确保乏燃料的延期（干式）存储满足最高的安全和保障要求。 • 加强安全研究工作，将结果传达给广泛的公众。 • 开展国家技能评估，量化熟练的核能职工队伍的需求。 • 开展国际合作，将核培训项目从有核国家转移到新兴核电国家。 • 针对新兴核电国家制定国际交换生项目，如果可能的话，这些项目应包含在核设施内有一段时期的实际工作经验。
金融机构	<ul style="list-style-type: none"> • 出口信贷机构应继续通过提供贷款担保支持核融资。 • 养老基金和其它机构投资者应该考虑投资核电站。 • 开发银行可以支持新兴核电国家所需的核培训和能力开发。

附件

核能案例研究

www.iaea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-nuclear-energy.html

在众多核能利益相关方的帮助下，本路线图给出了案例研究，以帮助解释说明核能发展过程中得到的经验教训。这些案例研究旨在为本路线图中所给出的建议和所提议的行动提供额外的视角和实践上的支持。

主题	案例研究描述
核能新建项目	第三代技术建设项目的经验教训：日本建设第三代反应堆的经验。
	关于国家核能基础设施建设的 IAEA 里程碑方案：阿联酋经验。
	环境影响评价：芬兰的经验教训。
	在中国建立供应链。
	意大利为新建项目做准备。
核电站退役	德国核电站退役：E.ON 在 Stade 核电站和 Würgassen 核电退役方面的经验。
核废物管理	乏燃料的回收利用：法国乏燃料回收利用的经验。
	在瑞典的地下深埋处置：安装启用 DGD 设施的经验教训。
运营	世界核电运营者协会的同业审查程序：世界核电运营者协会把世界上所有国家的运营商集合到一起，目的在于实现最高水平的运营安全和可靠性。
	综合建筑工程单位模式：法国经验，通过最大化地使用经验反馈，使用该模式提升核电站的安全性和运行性能。
	核电站延长运行研究：美国研究，主要研究延长核电站运行生命周期，至 80 年或以上。
	监管机构间的国际合作：多国设计评估项目旨在开发具有创新性的方法，来利用国家监管机构的资源和知识。
	日本增强的新安全标准：总结福岛第一核电站事故发生后实施的新措施。
融资	美国佐治亚州 Vogtle 核电站新机组的融资情况：美国所使用的促进融资的措施。
	阿库尤（Akkuyu）核电站的“建造-拥有-运营”模式：俄罗斯国家原子能公司 Rosatom 这一模式促进了核项目的开展部署。
教育和培训	英国的核技能评估。

缩写、首字母缩略词和计量单位

缩写和首字母缩略词

2DS	《2015 能源技术展望》2 摄氏度情景。
6DS	《2015 能源技术展望》6 摄氏度情景。
ADS	加速器驱动系统
ASEAN	东南亚国家联盟
ASTRID	工业示范先进钠冷技术反应堆
BOO	“建造-拥有-运营”模式
BWR	沸水堆
CANDU technology	加拿大重水铀反应堆技术
CEFR	中国实验快堆
CGN	中国广核集团有限公司
CNRA	核管理活动委员会
DGD	地下深埋处置
EDF	法国电力公司
ENEN	欧洲核教育网络
FANR	联邦核能管理局
FBR	快中子增殖反应堆
FNR	快中子反应堆
FOAK	首堆
GCR	气冷堆
Gen II	第二代
Gen III	第三代
GFR	气冷快堆
GHG	温室气体
GIF	第四代核能系统国际论坛
IAEA	国际原子能机构
IEA	国际能源署
IFNEC	国际核能合作论坛
INES	国际核事件等级表
INIR	综合核基础设施审查
ITER	国际热核实验反应堆
LFR	铅冷快堆
LWR	轻水反应堆
MDEP	多国设计评估项目
MOX	铀钚混合氧化物燃料
MSR	熔盐堆
NEA	核能署
NOAK	第 N 座反应堆
NPP	核电站
NPT	《核武器不扩散条约》

NRA	核监管机关
NSREG	欧洲核安全监管机构集团
NUGENIA	第二代和第三代核电协会
OECD	经济合作与发展组织
PFBR	快中子增殖原型反应堆
PHWR	重水反应堆
PSA	安全概率评估
PV	太阳能光伏
PWR	压水堆
R&D	研发
RBMK	大功率管道式反应堆——石墨慢化沸水堆
RU	回收铀
SCWR	超临界水冷堆
SFR	钠冷快堆
SMR	小型模块化反应堆
SNF	乏燃料
UAE	阿拉伯联合酋长国
VHTR	超高温反应堆
VVER	水慢化水冷却动力反应堆
WANO	世界核电运营者协会
WENRA	西欧核监管协会
WNA	世界核协会
WNU	世界核大学

计量单位

°C	摄氏度
Gt	十亿吨
GW	十亿瓦
GWel	十亿瓦电量
GWh	十亿瓦时（10 ⁹ 瓦时）
kW	千瓦
kWh	千瓦时（10 ³ 瓦时）
MW	百万瓦（10 ⁶ 瓦特）
MWh	百万瓦时（10 ⁶ 瓦时）
tHW	重金属公吨
TWh	太瓦时

参考文献

- Alkaabi, H. (2014) “UAE nuclear power programme”, presentation made at the IEA World Energy Outlook Workshop on Nuclear, Paris, 31 March 2014.
- Cogent (2010), “Next Generation: Skills for New Build Nuclear”, Cogent, United Kingdom.
- EFDA (2012), *Fusion Electricity: A Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*, European Fusion Development Agreement, United Kingdom.
- E.ON (2014), “Best practice in E.ON decommissioning projects”, presentation by A. Ehlert at the IEA/NEA Nuclear Technology Roadmap Update Workshop, 23-24 January 2014, Paris.
- EC (2010), *Europeans and Nuclear Safety*, Eurobarometer 324, European Commission, Brussels.
- FEPC (2014), *Electricity Review Japan*, The Federation of Electric Power Companies of Japan.
- GIF (2014), *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, Generation IV International Forum, Paris.
- IAEA (2007), *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2011), “Report on the Integrated Nuclear Infrastructure Review Mission in the United Arab Emirates”, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2012), *Managing Siting Activities for Nuclear Power Plants*, IAEA Nuclear Energy Series, No. NG-T-3.7, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IEA (2015), *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*, OECD International Energy Agency, Paris.
- IEA (2014), *Tracking Clean Energy Progress 2014*, OECD International Energy Agency, Paris.
- IEA/NEA (2010), *Technology Roadmap: Nuclear Energy*, OECD/IEA/NEA, Paris.
- IGA Russia/Turkey, company information.
- ITER (2014), ITER & Beyond (web page), www.iter.org/fr/proj/iterandbeyond.
- NEA (2008), “NEA regulatory communication with the public: 10 years of progress”, *NEA News*, Volume 26, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2012a), *Nuclear Energy Today*, 2nd edition, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2012b), *The Economics of Long-Term Operation of Nuclear Power Plants*, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2012c), *Nuclear Education and Training: From Concern to Capability*, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2013), *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2014a), *The Characteristics of an Effective Regulator*, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA (2014b), *Nuclear Energy Data*, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEA/IAEA (2014), *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*, joint NEA/IAEA publication, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- NEI (2014), *Demonstration of a New Recycled Fuel for CANDU*, Nuclear Engineering International, United Kingdom.
- Nuclear Energy Skills Alliance Annual Review 2012/2013.
- NUGENIA (2013), *NUGENIA Roadmap 2013*, Nuclear Generation II and III Association, Brussels.
- Rosatom (2014), “World’s first nuclear power plant project implemented on BOO”, PowerPoint presented at the IEA/NEA Nuclear Roadmap workshop on 1 April 2014, Paris.
- UNSCEAR (2014), *UNSCEAR 2013 Report*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UAE (2008), *Policy of the United Arab Emirates on the Evaluation and Potential Development of Peaceful Nuclear Energy*, United Arab Emirates.

Online bookshop

www.iea.org/books

PDF versions at 20% discount

E-mail: books@iea.org

International Energy Agency



Secure Sustainable Together

Energy
Technology
Perspectives
series

World
Energy
Outlook
series

Energy
Policies
of IEA
Countries
series

Energy
Statistics
series

Oil

Medium-
Term Market
Reports
series

Renewable
Energy

Energy
Efficiency
Market
Report

Energy
Policies
Beyond IEA
Countries
series

Coal

Gas

此执行摘要原文用英语发表。
虽然国际能源署尽力确保中文译文忠实于英文原文，但仍难免略有差异。此中文译文仅供参考。

This document and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

IEA Publications 9, rue de la Fédération, 75739 Paris cedex 15
Printed in France by Corlet, January 2015

For further information on the Energy Technology Roadmaps project
and to download other roadmaps, go to www.iea.org/roadmaps.

© OECD/IEA and OECD/NEA, 2015

Please note that this publication is subject to specific restrictions that limit its use and distribution.
The terms and conditions are available online at www.iea.org/about/copyright.asp.

Cover design: IEA

Photo credits: © South Carolina Electric & Gas Company; © GraphicObsession (*front cover, top to bottom*).
© Atomic Energy of Canada Limited; © GraphicObsession (*back cover, top to bottom*).



2015

2020

2025

2030