



理 事 会
大 会

仅供工作使用

GOV/INF/2021/32-GC(65)/INF/6

普遍分发
中文
原语文：英文

2021 年国际核电状况与前景

总干事的报告

仅供工作使用

大会临时议程项目 18
(GC(65)/1 和 Add.1)

2021 年国际核电状况与前景

总干事的报告

概 要

- 大会 GC(50)/RES/13 号决议要求秘书处从 2008 年开始每两年提供一份关于国际核电状况与前景的综合报告。2016 年 9 月印发的大会 GC(60)/RES/12 号决议要求秘书处从 2017 年起继续每四年出版一份《国际核电状况与前景》报告。本报告系为响应 GC(60)/RES/12 号决议而编写。

2021 年国际核电状况与前景

总干事的报告

A. 清洁能源有利于气候与发展：社会经济背景

A.1. 不断变化的背景

1. 自《2017 年国际核电状况与前景》（GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8 号文件）发布以来，重大的国家和国际发展都强调了核电在缓解气候变化和实现可持续发展方面的作用。本部分重点介绍影响核电状况与前景的一些最重要发展。

A.1.2. 国际发展

2. 全球越来越认识到，人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源（联合国“可持续发展目标 7”）对于实际实现所有其他 16 项“可持续发展目标”至关重要。全球领导人于 2015 年 9 月通过的“可持续发展目标”呼吁所有国家在 2030 年前动员各方努力，以消除一切形式的贫困，减少不平等并应对气候变化。与这些努力并行的战略则是拉动经济增长和满足社会需求，包括教育、卫生、社会保障和就业机会，同时应对气候变化和进行环境保护。据作为“可持续发展目标”秘书处的联合国经济和社会事务部认为，“可持续发展目标 7”对于实现几乎所有其他“可持续发展目标”都至关重要，“从通过卫生、教育、供水和工业化的进步消除贫困到缓解气候变化”，均如此。经济合作与发展组织国际能源机构也反复申明了同一观点，并在 2018 年 3 月表示，“能源是这些‘可持续发展目标’（从扩大电力供应，到改善清洁烹饪燃料，从减少浪费性能源补贴到遏制导致全球数百万人过早死亡的致命性空气污染）中许多目标的核心。”

3. 过去 50 年通过使用核电有效减排的二氧化碳估计在 70 吉吨至 78 吉吨之间，这取决于如果未建造核电厂则会部署的技术。计算目前已安装机组实现的减排比较复杂，因为可替代核电的能源可能从天然气到天然气与可再生能源的组合不尽相同。1970 年至 2010 年，可替代核电的显然是石油、煤炭和后来的天然气。大规模部署核电的国家，例如法国和瑞典，致力于在 20 至 30 年内使其电力结构成功脱碳。2019 年，核电占全世界电力的 10.4%，生产了 2657 太瓦·小时的低碳电力。如果用天然气生产同等发电量，将排放约 1.5 吉吨的二氧化碳。发电技术的寿期分析表明，核电是所有技术中

碳强度最低的技术之一，与水电和风能相当。未来几十年，核电与风能和太阳能光电技术等可变的可再生能源一起，仍然是电力部门脱碳的关键选择。

碳影响

核能贡献

核电帮助减排 **70-78** 吉吨的 **二氧化碳** 在过去 50 年期间。


4. 对核电在减缓气候变化方面以及在可持续发展方面发挥的重要作用的国际认可稳步得到强化。许多国家和国际组织按照实现“巴黎协定”目标的需要分析了能源系统脱碳的必要性；许多假想方案都要求大幅增加全球核电容量，包括政府间气候变化问题小组在其《2018 年全球升温 1.5°C 特别报告》中描述的所有四个说明性假想方案都提出了这一要求。事实上，为了实现 1.5°C 目标，政府间气候变化问题小组四个说明性假想方案要求在 2050 年前将核电容量增加 60% 至 500%。与此同时，核电越来越被视为发展中国家的一个重要选择，用于在不增加温室气体排放的情况下，满足不断增长的能源需求，提高生活水平。根据国际能源机构《2019 年世界能源展望》中的可持续发展假想方案，如果世界要有合理的机会实现气候变化目标以及其他与能源有关的“可持续发展目标”，核电需要大幅扩展到其历史市场以外的启动核电国家，包括发展中国家，以及扩展到电力部门以外。

IPCC 假想方案

核能贡献

为了实现 1.5°C 目标，IPCC 四个说明性假想方案要求到

2050 年增加容量

 **60-500%**。

5. 2019 年 10 月，原子能机构组织了首届“气候变化与核电的作用国际会议”。这次活动吸引了来自 79 个成员国和 17 个国际组织的 500 多名与会者，首次将处理能源和气候变化问题的主要国际组织（《联合国气候变化框架公约》、政府间气候变化问题小组、国际能源机构和联合国经社部）的负责人聚集在一起，讨论核电在应对全球变暖中的作用。会议主席、原子能机构负责核能部的副总干事米哈伊尔·丘达科夫在其总结中说，核电在能源部门脱碳以实现全球气候目标方面可以发挥重要作用，但需要有利的政策来充分发挥其潜力。

6. 国际能源机构在其 2019 年 5 月报告《清洁能源系统中的核电》中警告说，如果不能及时就核电作出决定，会提高清洁能源转型的成本，同时也会使实现净零排放目标更加困难。国际能源机构在其 2021 年 5 月发布的具有里程碑意义的报告《全球能源部门 2050 年净零排放路线图》中重申了同样的观点，报告描述了全球到本世纪中叶消除温室气体排放的潜在路径。报告预计，即使核电在全球发电量中的总体份额到 2050 年略降至 8%，但核发电容量到 2050 年会接近翻一番，某些年份的年度并网率达到约 30 吉瓦。根据该“净零”假想方案，2050 年电力结构的其余部分主要为可再生能源，特别是太阳能和风能。但国际能源机构也在最近的一份报告《关键矿物在清洁能源转型中的作用》中指出，风能、太阳能和电池技术非常依赖关键矿物，这些矿物的可用性可能会减缓这些技术的部署。另一方面，核电与水电一样，是矿物强度最低的低碳技术之一。

7. 2018 年 9 月发表的一份报告所载的麻省理工学院能源倡议呼吁大幅增加全球核发电容量，以实现净零排放目标。为了实现容量增加，报告概述了将为核电与其他低碳能源技术竞争建立一个更平等竞争的环境的政策，以及降低新建核项目成本所需的步骤。与国际能源机构的报告一样，麻省理工学院的研究结论认为，如果没有可调度核电的重大贡献，清洁能源转型将更加昂贵，更难实现。

8. 根据国际能源机构和经合组织核能机构联合编制的 2020 年 12 月报告《发电成本预测》，延长现有核电厂的运行寿期是低碳发电最具成本效益的投资。该报告指出，水电虽然能够以相当的成本做出相似的贡献，但仍然高度依赖各个国家的自然资源。

9. 联合国欧洲经济委员会 2021 年 3 月的一份报告指出，核能是实现“可持续发展目标”的一个“不可或缺的工具”，在提供负担得起的能源、缓解气候变化、消除贫困、实现零饥饿、创造经济增长以及提供工业创新和清洁水方面发挥着重要作用。根据这份题为《联合国资源分类框架和联合国资源管理系统的应用：利用核燃料资源促进可持续发展 — 进入途径》的报告，对于寻求实现气候变化和“可持续发展目标”的国家，可靠的核能可以成为脱碳能源系统的一个关键组成部分。

10. 欧盟委员会的科学和知识服务机构 — 联合研究中心在 2021 年 3 月的一份技术评定中表示，没有“科学证据表明核能对人体健康或环境的危害大于作为支持减缓气候变化的活动列入[欧盟]分类法的其他[低碳]电力生产技术”。评定系根据欧盟“分类法条例”的“无重大危害”标准进行，该条例建立了促进可持续投资的框架，最终将为在整个欧洲联盟范围内扩大低碳能源投资提供依据。联合研究中心的报告引用了 2016 年的数据，其中用残疾调整寿命年数衡量了以因健康不佳、残疾或过早死亡累计丧失的年数表示的总体疾病负担，显示核电较之于其他能源，在健康影响评价方面表现非常好。

11. 国际货币基金组织 2021 年 3 月发布的题为“重建更美好：绿色支出乘数有多大？”的一份工作文件称，对太阳能、风能和核能等清洁能源的投资对国内生产总值的影响是天然气、煤炭和石油等化石能源支出的 2—7 倍。该文件认为，核电在所有清

洁能源中产生的经济乘数效应最大，并补充认为，核电每单位电力产生的就业人数超过风能的约 25%，核电部门的工作人员收入比可再生能源行业的工作人员多三分之一。



B. 当今核电

12. 2020 年底，全球核电总容量为 392.6 吉瓦（电）¹，由 32 个国家的 442 座在运核动力堆生产。各国通过采取有效措施，展示了对冠状病毒病（2019 冠状病毒病）大流行的适应能力，体现了强大的组织文化。2020 年初大流行开始时，原子能机构就建立了“核电厂 2019 冠状病毒病期间运行经验网”，以共享关于为减轻大流行及其对核电厂运行的影响而采取的措施的信息。32 个有在运核电厂的国家中，无一国报告大流行引发了影响核电厂安全可靠运行的运行事件。



13. 2020 年，核电提供了 2553.2 太瓦·小时的无温室气体排放电力，约占全球总发电量的 10%，占世界低碳发电量的近三分之一。

¹ 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。截至 2021 年 6 月 1 日向原子能机构动力堆信息系统报告的所有核动力堆数据。

14. 约 5.5 吉瓦（电）的新核电容量并入电网，分别来自五座新的压水堆：白俄罗斯的白俄罗斯 1 号机组 1110 兆瓦（电）、中国的田湾 5 号机组 1000 兆瓦（电）和福清 5 号机组 1000 兆瓦（电）、俄罗斯联邦的列宁格勒二期 2 号机组 1066 兆瓦（电）、阿拉伯联合酋长国的巴拉卡 1 号机组 1345 兆瓦（电）。白俄罗斯的白俄罗斯 1 号机组和阿拉伯联合酋长国的巴拉卡 1 号机组的启动标志着两国首次实现核能发电。

15. 2020 年，世界首座先进小型模块堆、唯一一座浮动核电厂罗蒙诺索夫院士号开始商业运行。这座核电厂位于俄罗斯联邦，临近北极海岸，有两台 35 兆瓦（电）的 KLT-40S 小型模块堆机组。

16. 全球在运核电装机容量中，约有 89.5%属轻水慢化冷却堆型；6%属重水慢化冷却堆型；2%属轻水冷却石墨慢化堆型；2%属气冷堆型。剩余 0.5%便源自这三座液态金属冷却快堆，总装机容量为 1.4 吉瓦（电）。

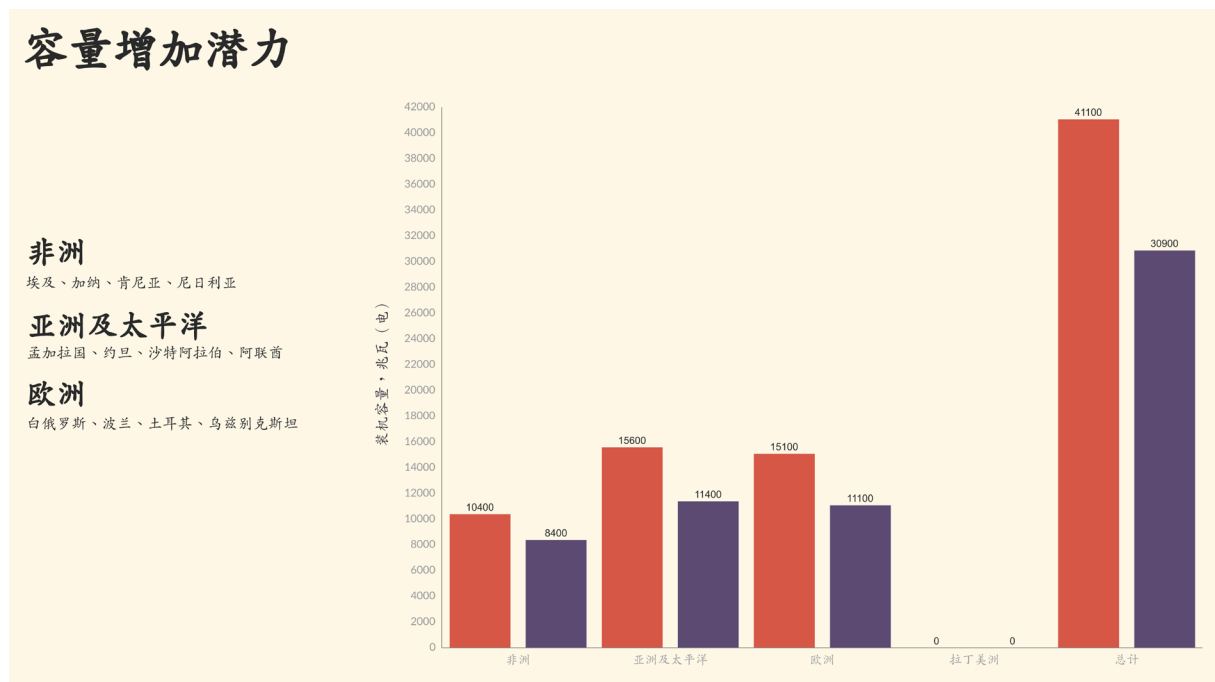
17. 2020 年期间，随着六座核动力堆永久关闭，5.2 吉瓦（电）核电容量退役：法国费桑海姆 1 号机组（880 兆瓦（电）压水堆）和费桑海姆 2 号机组（880 兆瓦（电）压水堆）、俄罗斯联邦列宁格勒 2 号机组（925 兆瓦（电）石墨轻水堆）以及美利坚合众国杜安阿诺德 1 号机组（601 兆瓦（电）沸水反应堆）和印第安角 2 号机组（998 兆瓦（电）压水堆）。瑞典的灵哈尔斯 1 号机组（881 兆瓦（电）沸水堆）在服役超过 46 年后，于 2020 年的最后一天被关闭。

18. 总体而言，在过去十年间，核电容量呈现逐步增长的趋势，其中包括通过新建反应堆或对现有反应堆升级改造而增加的约 23.7 吉瓦（电）新容量。核电生产呈现持续增长态势，自 2011 年以来已扩大 6%以上。

19. 在目前 52 座在建反应堆中，有九座在启动核电国家。共有 28 个国家表示对核电感兴趣，正在考虑、计划或积极努力将核电纳入其能源结构。另有 24 个成员国通过技术合作计划参与了原子能机构的核基础结构相关活动，或参与了能源规划项目。10 至 12 个启动核电成员国计划在 2030—2035 年之前运行核电厂，这意味着在运国家数目可能增加近 30%。若干启动核电国家，特别是爱沙尼亚、加纳、约旦、肯尼亚、波兰、沙特阿拉伯和苏丹以及南非等扩大核电国家也表示对中小型反应堆或模块堆技术感兴趣。原子能机构基于其“里程碑方案”，向启动核电国家和扩大核电计划的国家提供综合核基础结构评审服务，协助确保以负责和有序的方式发展和落实安全、可靠和可持续利用核电所需的基础结构。



20. 综合核基础结构评审仍然是原子能机构一项受欢迎的服务，支持成员国以系统和综合的方式审查其国家核基础结构的状况并确定差距。迄今，已对 22 个成员国开展了 32 次综合核基础结构评审工作组访问。



C. 核电前景

21. 根据 2015 年“巴黎协定”目标进行的假想方案模拟整体表明，核电通过向电网全天候提供可靠的低碳电力，成为电力部门成功脱碳的关键。随着满足全世界人口需要和确保其在 2050 年前用上电的全球电力需求的增加以及经济电气化水平的提高，大幅增加低碳发电势在必行。虽然大部分电力将由风能和太阳能光电技术等可变的可再生

能源提供，但核电将保持其 8%至 10%的全球份额，并提供低碳电力系统所需的必要灵活性和可调度性。根据原子能机构到 2050 年的高值预测，核电装机容量将增至 715 吉瓦（电），但这有赖于现有机组广泛长期运行，以及三十年内新建 500 吉瓦（电）容量。根据低值估计，到 2050 年，全球核发电容量将减少 7%，降至 363 吉瓦（电），占全球发电量的 6%，而 2019 年的这一数值约为 10%。然而，即使根据低值估计，假设现有核动力堆大约有三分之一在 2030 年前退役，同时新反应堆增加近 80 吉瓦（电）的容量，那么预计也要大量建造新核电厂。2030 年至 2050 年期间，预计新反应堆的新增容量将与退役容量几乎相当。

原子能机构高值预测

核电装机容量增至 **715 吉瓦（电）** 

但有赖于现有核电机组的广泛长期运行，

以及三十年内新建 **500 吉瓦（电）** 装机容量。

22. 为了从 2019 冠状病毒病大流行的影响中恢复过来，世界各国政府正在考虑经济复苏一揽子计划。这些措施是使公共投资与清洁能源转型的需求保持一致的独特机会。因此，正在关注绿色技术投资效应。2021 年 3 月，国际货币基金组织发表了一份工作文件，显示绿色技术投资对国家国内生产总值的影响大于化石相关资产投资。此外，投资核计划的影响比任何其他绿色技术投资的影响都更大（国内生产总值乘数更高）。原子能机构的宏观经济分析也表明，核电项目可创造大量高薪工作，并对经济产生其他积极影响。

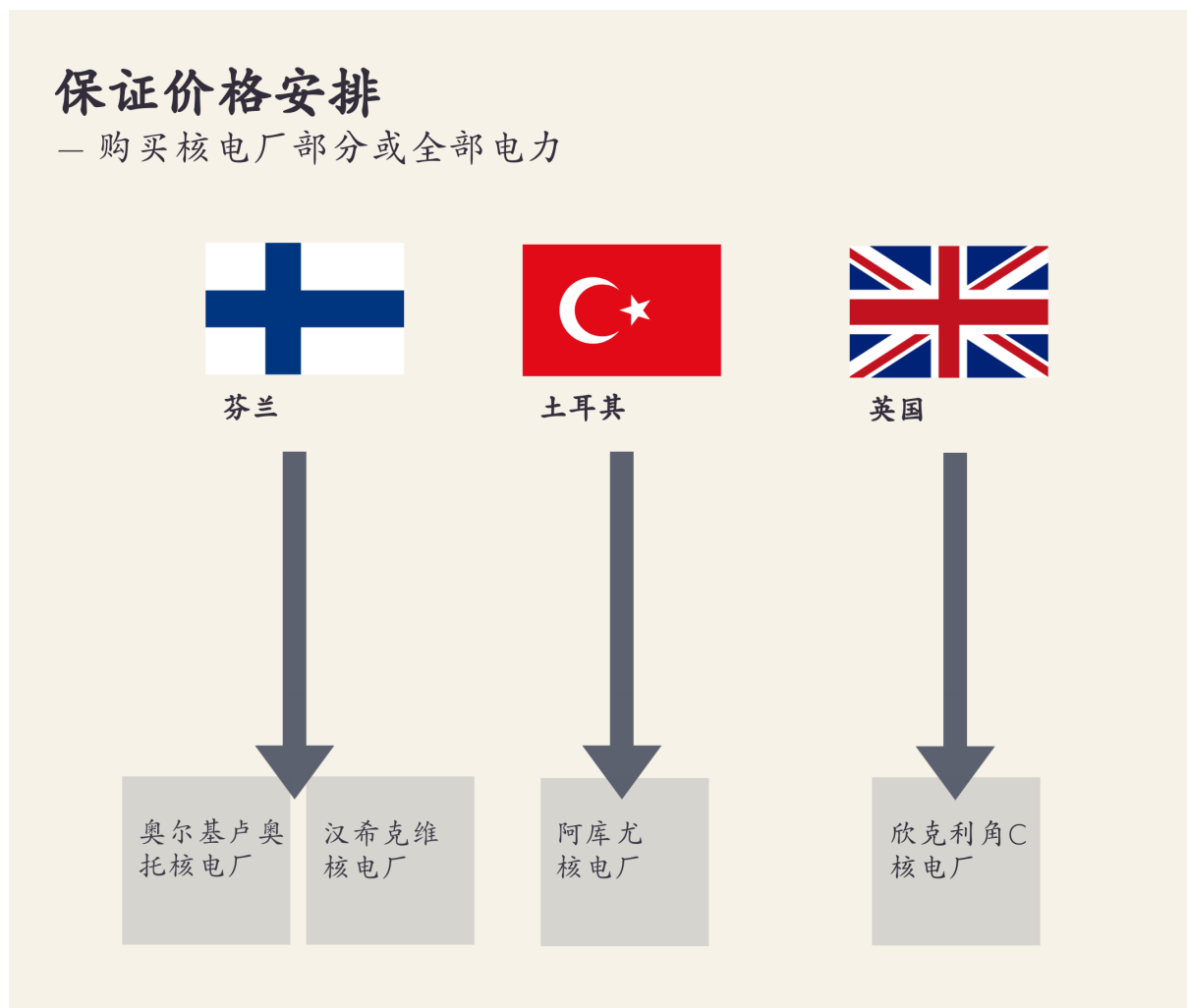
D. 未来核电部署的影响因素

D.1. 供资与筹资

23. 开发新核电厂相关的资本费用十分巨大，可能占核电平准化成本的四分之三左右。这些与利息相关的负债要在核电厂整个寿期内清偿，由发电产生的收入抵消。然而，高度资本密集型项目对利率变化和建造周期以及这些不确定因素的性质非常敏感。现已开发各种可能的筹资模式，以解决其中一些不确定性，特别是项目开发商 — 及资金提供方 — 在电厂寿期的运行阶段可能面临的市场风险。可通过以担保固定价格购买核电厂生产的部分或全部电力的安排（可能得到核电厂所在国政府的支持）来降低这类风险。此类安排已成为开发芬兰的奥尔基卢奥托和汉希克维核电厂、土耳其的阿库尤核电厂和英国的欣克利角 C 等项目的核心。

保证价格安排

— 购买核电厂部分或全部电力



24. 降低核电厂寿期早期阶段的风险 — 建造延迟和相关费用超支的风险，可以通过多种方式来实现，比如通过东道国政府向贷款机构提供直接主权担保，或通过核蒸汽供应系统供应商同意持有项目股权。阿拉伯联合酋长国的巴拉卡项目就采取了后一种方式，韩国电力公司持有纳瓦能源和巴拉卡一期公司 18%的股权；在芬兰的汉希克维核电厂项目中，俄罗斯联邦的国家原子能公司获得了 34%的股份；在英国欣克利角 C 项目中，法国电力公司和中国广核集团分别持有三分之二和三分之一股权。对于最近在孟加拉国、白俄罗斯、埃及、匈牙利、伊朗和巴基斯坦等启动核电和扩大核电国家的新建项目，供应国和东道国政府选择签订政府间协定以及提供政府贷款。

25. 与大型反应堆相比，中小型反应堆或模块堆可能有些优势，例如施工期更短，前期资本费用更低，适用于较小型电网，以及逐步满足需求的模块扩展可能性。这些优势可能促成对目前用于大型核电厂的财务模式进行重新审视。中小型反应堆或模块堆在未来十年左右的成功示范可能鼓励更多扩大核电和启动核电国家对其加以考虑。私人投资者对小型模块堆技术的开发、示范和部署越来越感兴趣。

26. 另一项重要的责任涉及设施运行寿期结束时产生的费用，例如与设施退役和高放废物长期管理有关的费用。与“前期”费用情况一样，也必须从运营收入中提取准备

金来支付这些“后端”费用。后者占核电平准化成本的比例可能高达 10%。管理核能使用的立法通常规定了在核电厂运行寿期的盈利阶段预留支付后端费用的资金的要求。可采取多种不同方案，从要求业主在公司账簿中留出适当的准备金，到要求将相关资金转移给一个独立的组织，由该组织负责这些资金管理和最终付款，以支付后端负债。

D.2. 电力市场与政策

27. 自 2017 年以来，全球电力市场的主要发展包括：大量可再生能源（风能和太阳能光电技术）的持续部署，其成本不断下降；由于各行业电气化程度的提高，电力需求从经合组织国家向非经合组织国家的转移；政策导致碳定价大幅提高；以及排放交易机制的改变。随着可持续投资的“分类法”或更普遍的环境、社会和治理标准的制订，以及许多成员国对在本世纪中叶实现净零排放的更多承诺，煤炭资产已成为一种负债，金融机构也不再投资煤炭。核电生产持续增长，2019 年达到有史以来第二高水平。2020 年，2019 冠状病毒病相关的封锁动摇了电力市场；几个月内，需求大幅下降，但化石燃料发电量也进一步减少，这反而有利于可再生能源和核能等低边际成本技术。随着经济复苏，排放量随后出现了反弹。除了关注减少碳排放之外，决策者还不得不解决对供应保证、空气质量和适应力的需要。

28. 如果核电作为低碳能源的潜力得到更广泛认可，“巴黎协定”应该会对核电发展产生积极影响。政府间气候变化问题小组 2018 年发布的《全球变暖 1.5°C 特别报告》和国际能源机构最近推出的《全球能源部门 2050 年净零排放路线图》均显示，实现净零排放的大多数途径都包括核电，需要核电生产在未来三十年内翻番。到目前为止，最近根据“巴黎协定”更新的国家自主贡献似乎并未表明希望核电为国家缓解气候变化战略作出贡献的要求有任何转变。然而，在一些国家，气候变化问题是支持继续运行核电厂的一个激励因素，或者是制订新建造计划的部分正当理由。核电的一个明显潜力在于它有能力帮助不易电气化且“难以废除”的部门脱碳。现有反应堆和先进反应堆产生的低碳热或氢可能会成为各国成功实现净零目标的关键，前提是这项技术未来十年左右会在商业上可行。同时，通过现有反应堆和新核电厂的长期运行，强化核电在低碳电力生产以及一定程度上的热力生产方面的作用仍然至关重要。

29. 原子能机构对 2050 年的预测表明，要实现“巴黎协定”目标，到 2050 年现有核电容量水平至少需要翻番，这与国际能源机构的预测一致。促进包括核电在内的所有类型低碳解决方案的能源政策和电力市场激励措施，将在激励核电投资方面发挥根本作用，并将降低风险和筹资费用。这对于确保及时部署核电以缓解气候变化是必要的。与此同时，需要认识到核电的供应保证、可靠性和可预测性优势，以及核电对能源基础结构的气候适应力的贡献。在一个依靠越来越多的可变可再生能源技术（例如风能和太阳能光电技术）的电力环境中，这一点显得更加迫切。最近的政策实例有助于强调电力市场在核电发展中的作用：在英国，为确保投资回报，新的核电项目考虑了“差价合同”或“受监管资产基础”机制；美利坚合众国若干州（纽约州、伊利诺伊

州、康涅狄格州、新泽西州和俄亥俄州）为重视低碳核电生产和支持现有核电厂而颁布了不同类型的支持政策。

D.3. 适应力

30. 2021 年 2 月，北美冬季风暴加上各种因素共同作用造成的大停电，表明了能源系统适应力的重要性。据预测，由于全球变暖，发生极端天气事件的频率会增加，强度也会越来越大。这些事件可能包括冬季风暴、特大洪水或热浪和干旱等，都会影响发电资产和电网基础设施。虽然过去几十年核部门报告²的天气相关停电事件也越来越多，但由于核电厂的设计可以在极端天气条件下安全有效地运行，这些停电造成的发电损失相对有限。

31. 在一些可能最容易遭受水灾或因热浪和干旱而损失冷却效率的电厂，已采取特殊适应措施。然而，尽管始终在为确保最高安全水平而投资，但仅仅旨在改善电厂在气候相关事件中的运行绩效的适应措施会不会得到落实，还取决于预期的投资回报。这是电力公司根据电厂剩余寿期以及电厂运行绩效/发电改善所带来的利润估算适应措施费用与预期回报后必须作出的一项经济决定。在电力市场上出售电力的价格起着关键作用，而过去十年欧洲和北美市场上出现的低批发电价不利于这种适应性投资。对于新建项目，设备选址和规模应进一步考虑本世纪期间可能发生的气候事件构成的潜在风险。

32. 在 2019 冠状病毒病相关封锁期间，成员国的行动侧重于通过迅速采取行动，最大限度地降低大流行疫情蔓延的风险，从而确保工作人员的安全和福祉，同时保持核电厂的业务连续性和适当的安全、安保和可持续性水平。没有成员国报告称因 2019 冠状病毒病对其职工队伍或供应链等基本服务的影响而导致任何核动力堆被迫关闭。在大流行期间，监管机构通常采用分级方案，并根据监管视察或其他视察的安全重要性调整其范围。原子能机构收到了 32 个有在运核电厂的成员国中 26 个国家关于核电厂停堆影响的报告。有些核电厂通过取消非关键工作以尽量减少外部工作人员进厂，缩小了停堆范围。还有一些核电厂延长了停堆时间，以便能够以适应身体距离限制的慢节奏开展工作。还有一些核电厂将整个停堆工作都推迟到下一年。随着未来停堆计划得到修改以完成延期后的工作，全面的影响将至少在下一年才会显现出来。

D.4. 先进反应堆和非电力应用

33. 所有主要技术路线、功率范围、使用类别和部署类型的中小型反应堆或模块堆的技术发展都已取得显著进展。小型模块堆技术的主要驱动因素包括资本投资减少、施工期缩短、选址灵活和适用于广泛用途，包括替代退役的化石燃料电厂，以及能够在综合能源系统中与可再生能源和非电力应用（例如低碳热力生产和氢产生）协同运作。

² 原子能机构动力堆信息系统。

34. 第一座小型模块堆已部署在俄罗斯联邦的一个海上浮动动力装置中，从 2020 年 5 月开始商业运行，发电容量为 70 兆瓦（电）。关于陆基中小型反应堆或模块堆，首座模块高温气冷堆目前即将完成热功能测试，目标是 2021 年底在中国并入电网。另一个例子是阿根廷的一体化压水堆式小型模块堆已处于建造后期阶段（75%），目标是在 2024 年启动和实现临界，预期容量为 30 兆瓦（电）。

35. 中小型反应堆或模块堆有望通过高度模块化降低建造成本，缩短建造工期，以“批量生产经济性”为特征，而不是大型反应堆的“规模经济”，从而实现其技术竞争力。目前有 72 种小型模块堆设计，技术准备情况各不相同³，其中有 25 种计划在 2030 年前进行示范。如果全球部署环境（包括燃料循环）全面启用，那么中小型反应堆或模块堆的贡献将增加约 1.6 吉瓦（电）。然而，小型模块堆技术仍然需要克服部署问题并达到商业竞争力，为此必须满足几个条件：展示具有新颖设计和技术的同类首座反应堆的安全和运行实绩；订单的连续性、相对于可替代方案的成本竞争力、稳健的供应链、大规模可用的燃料循环及可行的筹资计划；以及必须统一建立监管框架（许可证审批路径）。应建立适当的核基础结构，以负责任地管理这种预期在新市场中更广泛的批量部署。

目前有

72 种小型模块堆 设计，技术准备情况各不相同，

其中，

25 种小型模块堆 设计已计划在 2030 年前部署。

36. 微型反应堆是另一种新兴技术，其功率范围在 1 兆瓦（电）到 20 兆瓦（电）之间，可以为工业偏远地区或远离电网的地区供电，提供电力弹性，作为柴油的替代品，在甚至“常规”中小型反应堆或模块堆都不适合的市场部署。

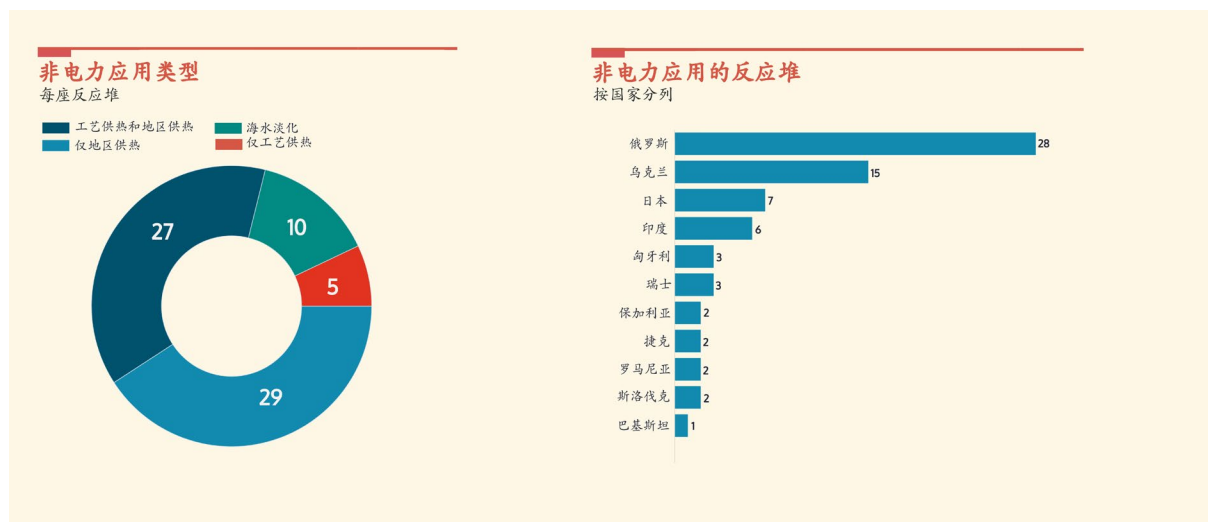
37. 目前已有五座在运快堆：俄罗斯的两座在运快堆（BN-600 和 BN-800）和一座试验堆（BOR-60）、印度的快中子增殖试验堆和中国实验快堆。2021 年 6 月，俄罗斯联邦开始建造 BREST-OD-300 快堆，这将是首座铅冷民用核能反应堆。由于铅不与空气和水反应，反应堆设计可以简化，因而与其他快堆相比更加经济。这座 300 兆瓦的反应堆是旨在示范完全闭合核燃料循环所需装置在一个场址稳定运行的 Proryv 项目的一部分。如果成功，它将成为进一步发展核能的重要一步，通过燃料再循环和减少废物足迹，提供更大的可持续性。其他国家也在这一领域取得进展。例如，中国正在建设两

³ 国际原子能机构，《小型模块堆技术发展的进步 — 对国际原子能机构先进反应堆信息系统的补充》，原子能机构，维也纳（2020 年）。

台大型示范快堆机组，并计划最终部署商用快堆。印度正在完成其钠冷原型快中子增殖堆的调试，这是该国正在计划的几座工业快堆的第一座。泰拉电力公司已宣布在怀俄明州一个即将退役的煤电厂原址上建造其首座下一代核反应堆 Natrium。作为其《快堆发展的快堆战略路线图》的第一阶段，日本正在其“核能×创新促进”计划中开展可行性研究。

38. 在福岛核事故之后，继续在安全、建造技术和经济方面进行水冷堆技术的创新。当今先进水冷堆设计中的安全系统具有不依赖电力的非能动特性，并包括更大的储水量，以便在非计划工况（如全厂持续断电）情况下能有数天而不是几小时的处理时间。先进水冷堆的其他优势包括：废物产生量更少、燃料利用率更高、可靠性更大、具有防扩散性以及能够与电力应用和非电力应用相结合。在提高热效率和经济性方面，作为先进压水堆和沸水堆设计的合理延伸，一些成员国正在开发的超临界水冷堆概念突出了这种设计在经济性、安全性和技术方面的有利特性。

39. 热电部门脱碳的需要使得人们越来越关注核能的利用，不仅用于发电，而且还用于其他能源密集型的非电力应用，例如海水淡化、地区供热、工业工艺热和燃料合成（包括氢生产）。常规反应堆的核热有很大的利用潜力，但目前 60%至 70%均被当作废物热排入环境并流失。这种废物热可以在热电联产模式（即电力生产和热力生产或热衍生产品生产同步）下得到再次利用。例如，2020 年底，中国山东海阳核电厂开始为周边地区提供地区供热，预计每年可避免使用 2.32 万吨煤，减少 6 万吨二氧化碳排放。



40. 包括中国、法国、日本、波兰、俄罗斯联邦、英国和美利坚合众国在内的许多国家越来越关注利用核能进行氢生产，核能制氢的实际实施将取决于以价格、竞争者、总需求和消费地理分布为表现的市场条件。在气候政策措施的背景下，如果广泛采取对甲烷蒸汽重整的有效抑制（通过税收），将为核能制氢创造一个巨大的机会窗口。

41. 核能和可再生能源是低碳发电的两个主要选择。核-可再生混合能源系统在向电网提供可靠、可持续和负担得起的电力以及向其他部门提供低碳能源方面，充分利用了每种技术及其运行模式的优势。核资源与可再生资源资源的这种结合可生产并酌情储存

热力、电力和其他能源产品或服务。除了电力之外，核-可再生混合能源系统可以为各种应用提供能源，例如氢和碳氢化合物生产、地区供热或供冷、三次采油、海水或微咸水淡化，以及包括热电联产、煤制油生产和提炼及化学原料合成在内的工艺热应用。然而，为了实现全面运行的紧密结合核-可再生混合能源系统，需要解决和消除一些现有的差距，包括核-可再生混合能源系统达到至少与目前单独的核电厂相当的必要安全水平；运行和维护这些系统的人力资本发展；核-可再生混合能源系统与电力市场和电网监管的互动；以及核-可再生混合能源系统的技术准备情况，这在很大程度上取决于每个子系统的技术准备情况以及结合与运行机制。

42. 过去几年，核聚变技术取得了重大进步，吸引了私营部门的大力参与，并创造了新的就业机会。国际热核实验堆正在稳步推进，这是朝着利用聚变能的目标迈出的关键一步。未来五年将取得重大进展，并一直持续到 2035 年，届时预计国际热核实验堆将实现其最终目标：证明核聚变能的可行性。除等离子体物理学外，聚变反应堆的主要挑战在于热源结构（面向等离子体的材料）的材料开发和高效冷却系统的设计。核聚变也许不是明天的能源，但它可能是本世纪末的解决方案。将 70 年和平利用裂变能的经验转用于即将到来的核聚变技术，将有助于在两种核能之间建立协同作用，为子孙后代提供可持续的能源。

D.5. 燃料可持续性和创新燃料循环

43. 到 2040 年，世界年度铀需求量在 56 640 吨铀至 100 225 吨铀之间，取决于新建核电厂数量和现有核电厂延寿情况。因此，在原子能机构的低值假想方案中，当前全球铀供应需要与 2019 年的数值保持一致。相反，在原子能机构的高值假想方案中，铀年产量需要增加约 41 000 吨铀。这将需要大量的勘探活动、创新和新铀矿开发。

到2040年,世界年度铀需求量
范围预计为

56 640 - 100 225 吨铀

取决于新建核电厂数量和现有核电厂延寿情况。

44. 自 2009 年以来，在运铀矿的初级产量平均占全球需求的 87%。缺口由二次供应弥补，但自 2010 年以来，二次供应在慢慢贫化。许多主要铀矿资源预计会在 21 世纪 30 年代中期贫化。在养护和维护中的运营、现有设施的增产和先进项目的最终开发可能都不足以填补供应缺口。考虑到建造和投产一座新矿平均需要 15 年至 20 年，业界对中长期的供应保证表示担忧。诸如 2019 冠状病毒病大流行之类的特殊事件可能会对供应造成额外压力：例如在 2020 年，一些主要铀生产国或暂停铀生产业务，或大幅减产。其结果是，在运铀矿的初级铀供应量减少，全球产量约为 46 500 吨铀。这约占全球铀需求量的 78%，为满足核燃料对铀的需求，二次铀供应面临更大的压力。

45. 继续改进技术，包括先进材料和核燃料，仍然是核工业成功的关键。核燃料工程领域的主要驱动力是通过为当前和新一代核电厂开发新型燃料以及循环利用核材料，增加燃料的运行安全裕度，降低核电厂的运行和维护费用，以及尽量减少核废物的产生。

46. 先进技术燃料作为替代燃料系统技术正在开发中，旨在进一步提高商业核电厂在当前和未来反应堆设计中的安全性、竞争力和经济性。欧洲、俄罗斯联邦和美利坚合众国开发的先进技术燃料包括用于燃料和包壳的新材料，有时需要更高浓度的铀-235 (^{235}U)，以补偿其包壳材料中子透明度的损失。因此，正在生产、开发和测试富集度高于 5%（但低于 20%）的高丰度低浓铀燃料。为了提高经济效益，还在开展工作，以提高卸料燃耗并延长核电厂的燃料运行周期，这也需要更高富集度的铀-235。然而，具有更高燃耗的新燃料概念将对燃料循环后端的各个方面产生影响，例如对燃料运输和乏燃料管理过程（从贮存到处置再到再处理）的影响。为部署先进燃料，需要大量投资来建造同类首座设施并进行许可证审批。

47. 由于中小型反应堆或模块堆有多种堆型（例如轻水堆、高温气冷堆、快堆和熔盐堆），因此正在开发具有不同设计、几何形状和富集度等特性的传统燃料和新型燃料。对于某些类型的中小型反应堆或模块堆，燃料设计和制造基于已知技术，但燃料可能需要具有低浓铀定义范围内的高富集度（铀-235 富集度高于 5%但低于 20%的高丰度低浓铀燃料）。

48. 闭合核燃料循环是确保核电可持续性的主要驱动因素。可以从乏核燃料中回收易裂变材料，以生产新燃料。对氧化铀燃料后处理并循环利用铀和钚，是当今轻水堆的一种工业实践，尽管目前很少有轻水堆获得使用再循环燃料的许可证。在 REMIX、CORAIL 和 MIX 燃料中多次再循环利用钚的工作正取得进展。这些再循环燃料将有助于过渡到在快堆中多次循环利用钚的战略，使自然资源得到更有效的利用，并减少产生废物的负担。为支持这种多次再循环技术的工业实施，将需要大量投资。

D.6. 放射性废物处置

49. 为所有放射性废物管理步骤提供解决方案（包括相关废物处置的解决方案）的能力，是不断可持续利用核技术的基石和关键推动因素。以全世界几十年的经验和发展为基础，各国家计划正在利用经过试验和验证的技术，在放射性废物管理的所有步骤中实施有效、安全、可靠以及在涉及核材料时防扩散的解决方案。所有这些步骤都通向并包括放射性废物处置，为此世界各地已建立并运行着许多处理极低放废物、低放废物和中放废物的放射性废物处置设施。

50. 通过处理高放废物（包括宣布为废物的乏燃料）的多个深部地质处置计划，已形成非常强大的国际知识库。正如世界一些深部地质处置库领先计划所表明的那样，过去十年中，一些国家计划在处置高放废物方面取得了重大进展——就芬兰具体情况而言，原子能机构总干事格罗西将这一里程碑称为“游戏规则改变者”。进展最快的国家计划有的到了即将正式提出处置场建议阶段（加拿大和瑞士），有的正在制订深部地质

处置设施的建造和工业运行方案（法国和瑞典），还有的正为在建设乏燃料安置准备许可证申请（芬兰）。目前，一大批这样的国家计划正在加强合作研究、发展和示范框架，即“放射性废物地质处置技术实施平台”，以进一步推进高放废物深部地质处置过程的工业化和最优化。

地质处置计划状况

为在建设乏燃料安置准备许可证申请



芬兰

制订深部地质处置设施建造和工业运行方案



法国



瑞典

具有先进国家计划，即将提出处置场址正式建议



加拿大



瑞士

51. 为了进一步规定对未来产生的放射性废物的及时和有效管理，各成员国正在改进对其所有核技术应用产生的全国废物流的估计，并制订国家放射性废物管理责任综合方案。综合方案在减少放射性废物管理责任相关费用方面拥有广阔前景，完全符合纳入所有步骤的“合理可行尽量低”方案，同时优化资源利用，使短期和长期规划更加明确。成员国的经验表明，制订和实施废物管理解决方案及其相关处置终点是可行的。然而，在许多情况下，源于过去国家实践和历史遗留问题的挑战依然存在。废物清单不完整和废物表征含糊不清，会妨碍进一步的有效处理并限制对适当处置的方案选择。过去对资源估计不足阻碍了能力和设施的必要发展，而过去的处置实践加深了人们认为放射性废物管理“无法完成”的普遍看法。这导致了人们对废物处置的负面看法，使决策者在承担这一责任和提供合理实施解决方案的明确国家框架方面犹豫不决。

D.7. 退役

52. 虽然推迟拆除在过去几十年里一直是设施业主采用的主要退役策略，但立即拆除方案也越来越受到青睐。另外，开始最终拆除退役电厂的时间表正越来越多地被提前，一些推迟拆除策略被改为立即拆除。这种变化是由于希望减少退役费用的不确定性所致。

53. 鉴于退役涉及将冗余设施改造为非能动安全状态，能否进行项目实施在很大程度上取决于是否有足够的财政资源和长期管理乏燃料和放射性废物的适当制度。尽管目

前还没有最终处置乏燃料的设施投入使用，但乏燃料可以安全地贮存在贮存水池或干法贮存设施中，因此几个永久关闭的电厂已在核设施场址附近建立了干法贮存设施，从而使拆除和拆卸作业取得进展。

54. 来自退役的很大一部分弃用材料的放射性水平可以忽略不计，因此在许多情况下可以解除监管控制（取决于国家法律制度），并重新用于其他用途。这种作法在一些国家行之有效，但并非在所有国家均如此。后一种情况包括公众不接受重新使用来自核设施的材料，无论其放射性水平如何，都可能阻止这种材料的重新使用或回收。鉴于这类活动不存在重大风险，从科学和技术角度来看，这种情况被视为次优方案。

D.8. 人力资源发展下一代

55. 为确保在核设施寿期所有阶段都有一支称职的职工队伍而获得和留住技能型人才是核能界的首要任务之一。然而，使在核工业工作成为一个有吸引力的选择的是在核设施和组织寿期各个阶段的长期职业前景。此外，核领域职业也提供了许多对社会有意义的工作机会，例如提供清洁能源和清洁用水，或帮助各国实现社会经济发展。

56. 对合格人员可能短缺的关切对不同国家构成了不同的挑战。新建核项目的一个特殊挑战是确定和发展专门知识和人力资本，因为这样的项目很少，而且往往间隔很多年（但中国、日本、大韩民国和俄罗斯联邦除外）。数字学习和混合学习等创新方案投入实践，使核培训、教育和能力建设更加方便运营核电国家和启动核电国家的新生代核职工队伍利用。对扩大核电计划的国家而言，面临的挑战是如何扩大其现有教育和培训规模，以便在需要时尽快拥有所需的合格职工队伍。

57. 计划提供核能技术的国家可以通过转让建设教育和培训基础设施的能力，支持受援国满足其国家人力资源需求。事实证明，运营核电国家与启动核电国家之间的合作有利于弥合经验差距。

58. 在不断变化的全球格局中，核领域的人才吸引和保留受到技术创新、流动性增加和人口结构变化的进一步挑战。同时，数字学习和混合学习等创新方案投入实践，使核培训、教育和能力建设更加方便运营核电国家和启动核电国家的新生代核职工队伍利用。

D.9. 许可证审批/监管框架/方案

59. 各国政府在为核电计划制订适当政策、计划和法律框架方面的作用，有助于为安全、可靠和可持续地引进或扩大核能创造有利环境。所有低碳能源都需要具体的政策来支持其部署。政策应体现在国家法律、制度和监管体系中，旨在确保拥有稳定和可预测的环境，并将其影响最大化。

60. 目前，全球核能部署由完善的国际法律制度管理。由于核能在缓解气候变化方面发挥着重要作用，因而进一步监管协调或新部署商业模式等问题可以纳入创新方案之中，以实现更清洁和更可持续的未来。

61. 核电厂许可证审批需要对其设计和技术特性进行广泛的安全、安保和保障评价。各国可以利用原子能机构的安全标准和安保导则支持其国家监管框架的发展。更广泛的国际合作被认为对知识转让、获得国家监管框架制订和适用能力以及进一步加速部署具有首要意义。

62. 在启动核电国家及时发展目前适用于大型核反应堆的有利核基础结构及相关核法律和监管框架，是加速市场准备的一个关键因素，以期部署中小型反应堆或模块堆。

63. 评定中小型反应堆或模块堆等先进技术的现有监管导则和程序相对滞后，在某些情况下尚不可用。未来，技术中立的稳健监管审查方法将有利于最大限度地减少采用新的核反应堆技术并使其商业化所需的时间。在任何情况下，监管机构和开发商都需共同努力，促进对这些同类首座反应堆的设计认证和示范的认可，从而使建造和运行之路安全和简化，同时使成本实现有竞争力的部署。目前，原子能机构正在主办小型模块堆监管者论坛，并以技术中立方案审查考虑中小型反应堆或模块堆时安全标准的适用性。

D.10. 公众认识

64. 核能可以有助于解决紧迫的全球问题；然而，对核电的误解继续影响公众接受和政策制定。公众对与核电相关好处和风险的认知，特别是对辐射风险、废物管理、安全和扩散的关切，依然是最能影响公众接受的几个方面。由于公众舆论在政府如何选择生产能源方面发挥着重要作用，了解利益相关方对核电的意见、认识和知识是决策和核电计划成功的关键因素。与利益相关方建立牢固、积极和长期的关系是现有、新的和未来核电计划的关键因素。

65. 经验表明，让利益相关方参与决策过程，即使是那些在决策中没有直接作用的利益相关方群体，也能增强公众对核科学技术应用的信心。这包括在从核工业和政府机构到媒体、当地社区和非政府组织的各个利益相关方之间建立互信的公开和透明对话。这种互动有助于建立对核燃料循环的各个方面，从铀矿开采到乏燃料和放射性废物管理的认识和理解，同时也为利益相关方表达其关切并对正在影响其社区的决策施加影响提供了机会。

66. 利益相关方参与现有核计划的公开和无障碍渠道已得到发展，这些策略也已成为废物管理设施选址和发展的许多领域的规范。新的核电计划顺应了这一趋势。事实上，利益相关方参与是原子能机构“里程碑方案”19个基础结构问题之一，而该方案是发展核电计划必要基础结构的一个合理的三阶段过程。

67. 在各国评价中小型反应堆或模块堆等新技术作为低碳电力和非电力应用选择的可行性时，及早让利益相关方实质性地频繁参与进来，也将有利于这些技术的开发和部署。运营核电国家和启动核电国家的经验以及从现有技术部署中吸取的经验教训都可以促进新核技术成功。

68. 最后，各利益相关方更好地理解核电在为电网特别是那些可变的可再生能源所占比例较高的电网提供稳定性方面的重要作用，可以加强公众对核电的接受。核电与可再生能源在复合能源系统中的这种结合有助于大幅减少温室气体排放，同时为社会经济发展提供可靠电力，解决许多利益相关方的关切。利益相关方对核能可用于海水淡化、低碳氢生产以及楼房和工业应用热力生产的认识有所提高，这可以进一步改善公众对这种低碳能源的支持，扩大其对气候行动和可持续发展作出贡献的潜力。



www.iaea.org

国际原子能机构
PO Box 100, Vienna International Centre
1400 Vienna, Austria
电话: (+43-1) 2600-0
传真: (+43-1) 2600-7
电子信箱: Official.Mail@iaea.org