



2050

2045

2040

2035

技术路线图

核能



如需了解能源技术路线图项目的进一步信息并下载其他路线图，请访问：

www.iea.org/roadmaps。

经合组织/国际能源署和经合组织/核能署，2010

请注意本出版物在使用和分发时有具体限制。相关条款请参照：

www.iea.org/about/copyright.asp。

本报告是国际能源署、核能署、其成员国以及世界各地的众多专家顾问合作努力的结果。本报告用户自行承担其独立商业决策的风险，特别是，不应对本报告过度依赖。本报告内容不构成专业意见，不对本报告内容的完整性或准确性方面做出任何明示或暗示的声明或保证。国际能源署和核能署不对任何使用本报告或其内容导致的任何直接或间接损失承担任何法律责任。广大专家对草案进行了审查，但是，所表达观点并不一定代表国际能源署、核能署或个别成员国的观点或政策。

前言

当前能源供应和使用的趋势在经济、环境和社会方面明显具有不可持续性。若无决定性行动，能源相关的二氧化碳排放到 2050 年将翻一番，能源需求增加将会加重对供应安全的关切。我们能够而且必须改变我们当前的发展路线，但这需要一场能源革命，低碳能源技术将会发挥关键作用。如果我们要达成我们的温室气体减排目标，就需要大范围推广节能技术、多种类型的可再生能源技术、二氧化碳捕集和封存技术、核电技术和新的运输技术。

迫切需要把政治声明和分析工作转化为具体行动，这一意识日渐增强。为推动这一运动，在八国集团的请求下，国际能源署正在为一些最重要的技术开发一系列路线图。这些路线图提供了坚实的分析基础，使国际社会能够在一些具体技术上向前推进。每一个路线图都为一种特定技术开发了一个从现在到 2050 年的增长路径，确定了要充分实现该技术潜力所需达成的技术、融资、政策和公众参与里程碑。路线图也包括对技术开发和向新兴经济体传播的特别关注。国际合作对于实现这些目标非常关键。

核能路线图由国际能源署和经合组织核能署共同制定。与其他大多数低碳能源不同，核能是一项成熟的技术，已经使用了 50 多年。

基于这种经验建设的最新设计核电站加强了安全，提高了性能，并准备在未来几年中进行更广泛的推广。一些国家正在重启休眠中的核计划，另外一些国家则首次考虑使用核能。尤其是中国已经开始着手快速发展核能。从长远来看，对于核能技术新发展来说，仍有很大潜力加强核能在未来可持续能源发展中的作用。

尽管如此，核能的快速扩张仍然面临很多阻碍。最重要的是，各国政府应该制定明确稳定的核能政策以鼓励私营部门的投资。获取更广泛的公众认可也很关键，放射性废料地质处置计划的早期实施以及核电站的持续安全有效运行将有助于获取公众认可。除此之外，还需不断提高工业生产能力，培养熟练的人力资源，以满足核能工业快速发展的需要。要想在 2050 年达到 1200 吉瓦的核电装机容量，需要政府，研究机构，产业界，金融领域以及国际组织间的通力合作。本路线图提出了未来需要采取的步骤。

田中伸男

Nobuo Tanaka
国际能源署总干事

路易斯·艾差瓦里

Luis Echávarri
经合组织核能署总干事

致谢

本出版物由核能署核能发展处和国际能源署能源技术政策处制作。可持续能源政策与技术部主任 Bo Diczfalusy，能源技术政策处处长 Peter Taylor，以及能源技术路线图项目协调员 Tom Kerr 提供了重要的指导意见和建议。

核能署的 Martin Taylor 和国际能源署的 Cecilia Tam 是本路线图的主要作者，国际能源署的 Steven Lee 以及核能署的 Stan Gordelier 和 Evelyne Bertel 也做出了贡献。Delphine Grandrieux，Corinne Hayworth 和 Bertrand Sadin 提供了排版和图形设计支持。

这项工作由国际能源署能源研究与技术委员会和核能署核能与核燃料循环技术经济研究委员会指导。两个委员会的成员提供了重要的反馈意见和评论，帮助改进了此文件。

来自行业、政府以及非政府组织的专家参加了研讨会，审核了草案，并提出了很多评论、观念与指导意见，让本路线图从中获益良多。我们对所有提供意见者表示感谢，由于人数太多，恕不一一列举。特别感谢世界核能协会举办其中的一次研讨会并组织行业专家参与，特别感谢 Prospex 的 Steven Libbrecht 以及 De Ruijter Strategy 的 Peter van Veen 为研讨会提供了便利。

如需了解该文件的更多信息，请联系：

Cecilia Tam，国际能源署秘书处
电话：+33 1 40 57 67 55
电邮：cecilia.tam@iea.org

Martin Taylor，核能署秘书处
电话：+33 1 45 24 10 67
电邮：martin.taylor@oecd.org

路线图主要结论

- 目前的核能技术现状是 50 多年发展和运行经验所带来的成果。正在建设中的最新设计的核电站整合了这种经验和最近的技术发展,以加强安全,提高性能。核电是一种成熟的低碳技术,目前可用于更广泛的推广。
- 国际能源署《能源技术展望 2010》蓝图情景提出把能源相关的二氧化碳 (CO₂) 排放减少 50%,为了与此保持一致,此路线图设定了到 2050 年建成 1200 吉瓦核电产能的目标,占全球电力的大约 24% (目前约有 370 吉瓦容量,占 14%)。届时,核电将成为单个最大的电力来源,也因此为电力供应“去碳化”做出重大贡献。
- 核能推广水平不要求大的技术突破。从中短期来看,阻碍核能快速成长的障碍主要是政策、工业和金融障碍。然而,如果核能要与其他低碳能源竞争且发挥其全部潜力,反应堆和燃料循环技术的不断发展将变得非常重要。
- 明确稳定的核能发展承诺,做为满足能源政策和环保目标的国家战略的一部分,是成功核计划的先决条件。有效力的高效率法律和监管框架也需要落实到位。尤其是在一些启动或重启核计划的国家,政府将需要积极与各利益相关者通力合作,克服困难。
 - 在许多国家,建造核电厂需要非常大的投资,资金筹措将是一个重大挑战。除非有近期成功的核项目投资经验可循,否则私营部门投资人可能也会认为核能投资充满不确定性。在某些情况下会需要政府支持,比如说贷款担保。稳定的电力价格以及碳市场也将鼓励在核电站方面的投资。
- 如果核电产能要在 21 世纪 20 年代增长且超出蓝图情景中的预测,建设核电站的全球工业能力到 2020 年需要翻番。燃料循环产能,包括铀生产产能,也必须得到相应的增长。这将要求在未来几年中有大笔投资,一旦确定有充足订单,这些投资才会开始运作。
- 不断扩张的核工业将极大地需要增加人力资源,包括高素质的科学家、工程师以及技艺高超的工人。电力公司、监管机构、政府以及其他各利益相关者也都需要更多的核专家。行业招聘和培训计划需要加快落实。各国政府和大学在培养人才方面要发挥至关重要的作用。
- 放射性废料的管理和处置是所有核计划中的基本组成部分。尤其是,在乏燃料和高放射性废料处理设施的建设 and 运行方面需要取得进展。尽管在技术发展的高级阶段有解决方案,但在其实施时要获得政治认可和公众认可通常会遭遇困难。
- 在必要时保持和加强国际核技术和核材料保障系统。必须确保核设施和核材料的实物保护。避免敏感技术扩散的同时允许获得可靠燃料供应将是一个越来越大的挑战。这些问题必须通过国际协议和合作解决。
- 正在开发的针对下一代核系统的几项技术在改善可持续性、经济性、防扩散性、安全性以及可靠性方面有很好的潜力。一些技术适合更广泛的地址以及潜在的新应用。每一个都涉及重大的技术步骤,并要求在商业推广前有全面的示范。这些系统能在 2050 年前为核电产能做出贡献。

目录

前言	1
致谢	2
路线图主要结论	3
引言	5
能源技术路线图项目	5
核能发展的机遇与挑战	5
路线图目的	7
当今核能发展状况	9
管理现有核反应堆	9
近期推广的核能技术	12
核燃料循环发展状况	14
放射性废料的管理	15
到 2050 年的核能推广：行动和里程碑	17
蓝图情景中核电装机容量增长情况	17
到 2020 年的核电增长展望	18
为 2020 年之后更加迅速的推广做好准备	19
核燃料循环要求	21
技术开发和推广：行动和里程碑	25
当前技术的演变发展	25
实施乏燃料和高放废料处置解决方案	25
开发新一代核能技术	27
小型模块化反应堆的发展现状与潜力	32
核能作为供热和交通的替代方案	33
政策、财政和社会方面：行动和里程碑	35
强大政策支持的重要性	35
建立法律和监管框架	35
为新建核电厂提供融资	37
民间参与	39
规划核能方案的国家的能力建设	39
不扩散、实物保护和核燃料供应的安全性	40
路线图行动计划	41
政府和其他公共机构牵头的行动	41
核工业和供电行业牵头的行动	43
其他利益相关者牵头的行动	44
参考文献	45

引言

能源技术路线图项目

现在迫切需要加快发展先进的清洁能源技术，以解决能源安全、气候变化和可持续发展等全球性挑战。在 2008 年 6 月的日本青森会议上，来自八国集团国家、中国、印度和韩国的部长们认同了这种挑战，他们在会上宣布希望国际能源署制定路线图，推动创新能源技术的发展。

“我们将在国际能源署的支持下建立一项国际倡议，开发创新技术路线图，在现有及新建伙伴关系的基础上进行合作，包括 CCS 和先进能源技术，我们重申我们在海利根达姆做出的紧急开发、推广和培养清洁能源技术的承诺，承认并鼓励各种政策工具，比如透明的监管框架、经济和财政激励措施、公私伙伴关系，以培育私营部门在新技术方面的投资……”

为实现这一宏伟目标，国际能源署正在开发一系列能源技术路线图，涵盖 19 项需求侧和供应侧技术。总体目标是促进全球对实现到 2050 年减少 50% 的 CO₂ 排放所需要的关键技术的开发和吸纳。国际能源署在国际指导下并与业界密切协作，牵头制定这些路线图。核能技术路线图由国际能源署和经合组织核能署共同开发。

这些路线图将帮助政府和业界及金融合作伙伴确定所需采取的步骤，贯彻落实各项措施，

加速所要求的技术开发和技术吸纳。这一进程在开始的时候就清晰定义了每一个路线图所需要的组成要素。国际能源署将能源技术路线图定义为：

“……由利益相关者在其开发过程中所确定的一套动态的技术、政策、法律、财政、市场和组织要求。该工作应致力于改善和加强参与者之间在所有相关技术的具体研发、示范与推广信息方面进行分享和协作。目标是加速总体的研发、示范与推广进程，以便使具体技术能够早日为市场所吸纳。”

每个路线图都确定了主要障碍、机会和政策措施，以便政策制定者和行业及金融合作伙伴能够加速特定清洁技术在国家层面和国际层面的研发、示范与推广工作。

核能发展的机遇与挑战

国际能源署《能源技术展望2010》(国际能源署，2010)中的分析预测，在基线情景中能源相关的CO₂排放到2050年将在2005年的基础上翻番，该情景假设没有新的政策和措施遏制此类排放。解决这一预计的排放增加将需要一场涉及众多解决方案的能源技术革命，比如说提高能源效率，增加可再生能源的利用，提高

《能源技术展望2008》BLUE Map情景

该路线图描绘了一套量化措施和定性行动，代表着一条到 2050 年实现太阳能光伏推广的全球路径。该路线图的基础是国际能源署《能源技术展望》蓝图情景，该情景描述了如何能够通过能源技术转型，实现到 2050 年每年 CO₂ 排放量降在 2005 年的基础上减少一半的全球目标。《能源技术展望》模型是一种自下而上的 MARKAL 模型，考虑到自然资源供给有限，该模型利用成本优化来发现能源技术及燃料的最小成本组合，以满足能源需求。《能源技术展望》模型涉及全球十五个地区，可以分析贯穿于能源系统中的燃料及技术选择。该模型详细分析了众多技术方案，包含约 1000 项独立技术。而且，该模型已发展数年，已应用于全球能源部门的许多分析中。此外，《能源技术展望》模型还得到了详细需求侧模型的补充，适用于工业、建筑物、及交通行业的所有主要终端用途。

从剩余化石燃料中捕集与封存CO₂的能力,以及更广泛地利用核能。

《能源技术展望》蓝图情景评估了到2050年与能源相关的CO₂排在2005年基础上减少50%的战略,得出的结论是,核能将以最节约成本的方式在完成这一目标中发挥重要作用(图1)。预计到2050年,核电产能将达到1200吉瓦,为全球供应24%的电力。这与基线情景的610吉瓦相比差不多翻了一番。

蓝图分析假设核电产能推广速度会有限制因素。然而,《能源技术展望》蓝图高核情景显示,假设到2050年更大的核能力能供应全球38%的电力,平均电力发电成本与蓝图情景相比将减少约11%。因此,扩大核能是实现全球大规模减排经济有效的战略的必要组成部分。

在技术开发与推广上,核能迥异于其他大部分低碳能源来源。尽管在过去二十年核能增长停滞不前,但这是一项拥有50多年商业运作经验的成熟技术,并不需要重要的技术突破来

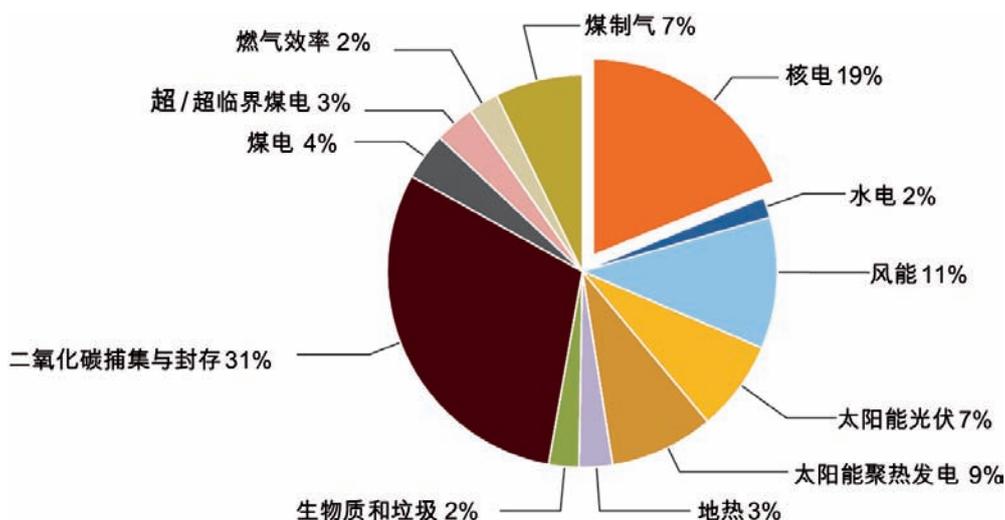
完成其更广泛的推广。核电站的最新设计旨在加强安全和提高性能,其中首批示范电站目前正在建设中。

尽管核能是一项成熟的技术,但实现蓝图情景设想的核能推广水平仍然面临巨大挑战。然而,从中短期来看,核能扩张的最大阻碍是与政策相关的障碍以及来自行业或金融方面的障碍,而不是技术。

促使核能和其他大部分低碳能源技术分离的一个因素是,至少在一些国家,采取或推广核计划将会招致巨大的公众反对浪潮或政治反对。在20世纪80年代,对于核安全(尤其是三里岛事故和切尔诺贝利事故)和放射性废料的关注在许多经合组织国家引发了强烈的反核运动,包括一些已经有大型核计划的国家。因此,一些欧洲国家和美国提出正式暂停核扩张,在少数情况下,还设法逐步淘汰现有核电容量。其他国家则决定不继续进行已经规划的核计划。

图1 2050年蓝图情景中电力部门CO₂减排与基线情景对比情况(按技术领域划分)

来自电力行业的CO₂减排总量:1.4吉吨



资料来源:国际能源署,2010。

注释:这些数字仅代表对蓝图情景中减排做出的额外贡献;基线情景已经假定了核电的重大发展。

要点:在蓝图情景中,核能对CO₂减排做出了重大贡献。

尽管一些国家最近这些年反对核扩张的浪潮已经平息，一些国家仍然坚定反对。这将限制全球核能扩张的范围。尽管大部分能源消耗大国目前正在考虑核计划，但是放射性废料处置方案的成功实施以及核电站和燃料循环设施的持续安全运行，对实现蓝图情景中设想的核扩张规模都至关重要。

对于一个着手核电计划或者继续发展现有计划的国家，国家政府明确、持续的政策支持是先决条件。这极有可能需要社会广泛支持核能在实现能源供应和环保目标的国家总体战略中的作用。开发核能，除了提供政策支持外，政府还需要制定基本法律、监管以及体制框架。这包括对核设施实施许可和监管的有效体系以及放射性废料管理战略。

核能大规模扩展面临的其他挑战包括：

- 为所需的大笔投资提供融资，尤其是在核建设由私营部门主导的地方。
- 发展必要的工业能力，培养熟练的人力资源，以支撑核电容量的持续增长。
- 扩大核燃料供应以配合不断增长的核电产能，并确保所有核能用户能获得可靠的燃料供应。
- 实施建设和运行处理乏燃料和高放射性废料的地质处置库计划。
- 必要的时候保持并加强敏感核材料和技术的保障措施和安保，以避免非和平方式的滥用。

很明显在大范围内攻克这些挑战还需要耗费很多年。因此，可以预计的是，核扩张一直到2020年相对来说都会比较适中，以为未来几十年核能更加快速的扩张做好准备。

从更长远来看，如果核能要发挥其全部潜力，将需要进一步的技术开发。拥有先进燃料循环的新一代核电站设计目前正在开发中，这种设计可以在经济性、可持续性、防扩散性、安全性以及可靠性方面提供重要进展。它们将

充分利用核燃料循环的能力，极大地提高铀资源的能源潜力。在现有计划中，这些核电站将在2050年前开始对核电产能做出贡献。

本路线图专门考虑了基于核裂变以及重元素例如铀的原子核分裂的能源利用。核聚变，其过程迥异于核裂变，从长期来看，也可以被当做能源来源使用。在聚变中，轻原子核（氢的同位素）聚合在一起，释放能量。聚变需要极高的温度和压力，这提出了相当大的工程挑战。核聚变需要的技术也完全迥异于核裂变。

目前核聚变研究的关注点是法国正在建设中的国际热核实验反应堆（ITER）。此反应堆预计于2018年开始运行，国际热核实验反应堆旨在示范聚变能源在其20年的运行周期中的可行性。若一切运行良好，实际聚变能源发电系统的后续示范工作将在21世纪30年代或40年代开展。然而，这种技术的商业利用到2050年以后才有可能实现，可能依旧有数十年的路要走。

路线图目的

本路线图研究了更广泛的核能推广所面临的每一个挑战，以及政府和其他各利益相关者解决这些挑战所需要做的工作。它提出了一个愿景，如何把蓝图情景中设想的未来四十年的重大核能扩张作为大幅减少能源相关的CO₂排放战略的一部分来实现。

制定本路线图的过程包括由国际能源署和核能署共同组织了两次研讨会，涉及来自核工业、电力行业、政府以及国际组织的专家。第一次是于2009年9月在伦敦与世界核能协会（一个核能行业组织）合作举办的，第二次是于2009年10月在巴黎在国际能源署举办的。

目前许多国家正在考虑在未来十年其以后建设新的核电产能。未来几年将看到他们是否实际上已经在及时推动这些计划。因此，本路线图设计成了一个灵活的文件，可以定期更新以发布最新的发展情况。

当今核能发展状况

使用核能发电始于20世纪50年代，第一个商业核电站于20世纪60年代早期开始运行。各国为了降低对化石燃料的依赖，尤其是20世纪70年代发生了石油危机之后，核电产能在20世纪70年代和80年代急速发展（图2）。然而，在20世纪90年代，除了日本和韩国，核能的发展停滞不前。原因包括：在三里岛事故和切尔诺贝利事故之后对核安全的关注增加，一些核电站的建设延期、建设成本超过预期，化石燃料回归到较低的价格。

到2009年末，在30个国家共运行有436座核电反应堆，装机容量共为370吉瓦。在一些国家，运行反应堆的核能源在电力结构中的占比从不到2%到超过75%不等（图3）。总体来说，核电为全球供应了约14%的电力，在经合组织国家供应21%的电力（图4）。核电和水电是目前仅有的大规模供应能源的低碳能源。与燃煤发电相比，现有核能发电每年可避免产生29亿吨的CO₂排放，或约24%的电力行业年排放量。

尽管核电站实际上并不直接产生CO₂，也不能说核能是完全不含碳的。燃料循环中使用的化石燃料间接排放的CO₂可归因于核能发电。然而，这些排放量至少比化石燃料燃烧的直接排放量低一个数量级，且类似于那些可再生能源的排放量。

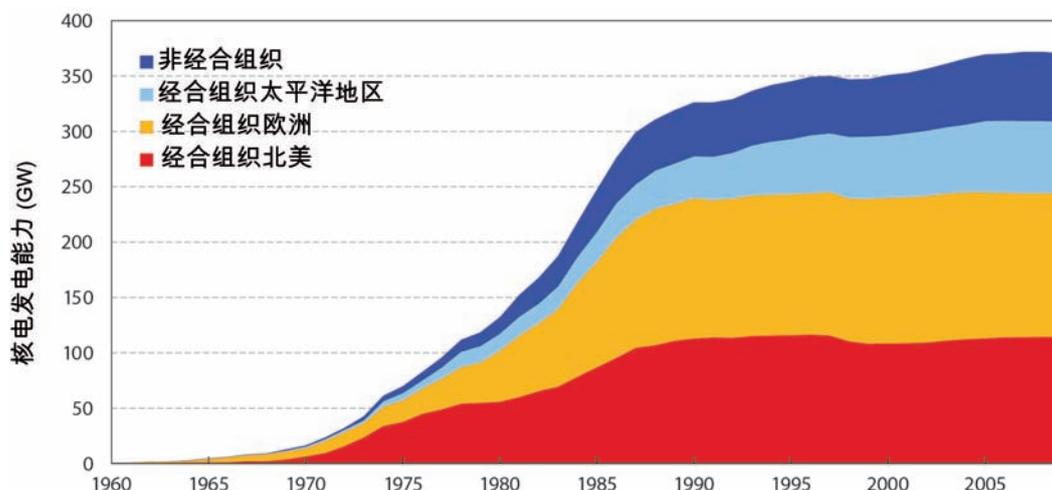
管理现有核反应堆

本路线图建议：

- 在继续安全高效运行现有核电站的同时，电力公司应投资设备升级，并在可行的条件下，为延长设施使用寿命做好准备。

建设一座核电站需要大笔资金投入，但是一旦投入运行，它仅需要相对来说低廉且可预知的燃料以及运行和维护成本。这表示核电站边际生产成本低，但是需要花费多年时间回收资本成本。因此，在生命周期内尽可能多的发电具有重要的经济意义，即使在需要进一步投资更新系统和零件的情况下也是如此。核电站还有助于减少电力行业累计CO₂排放。

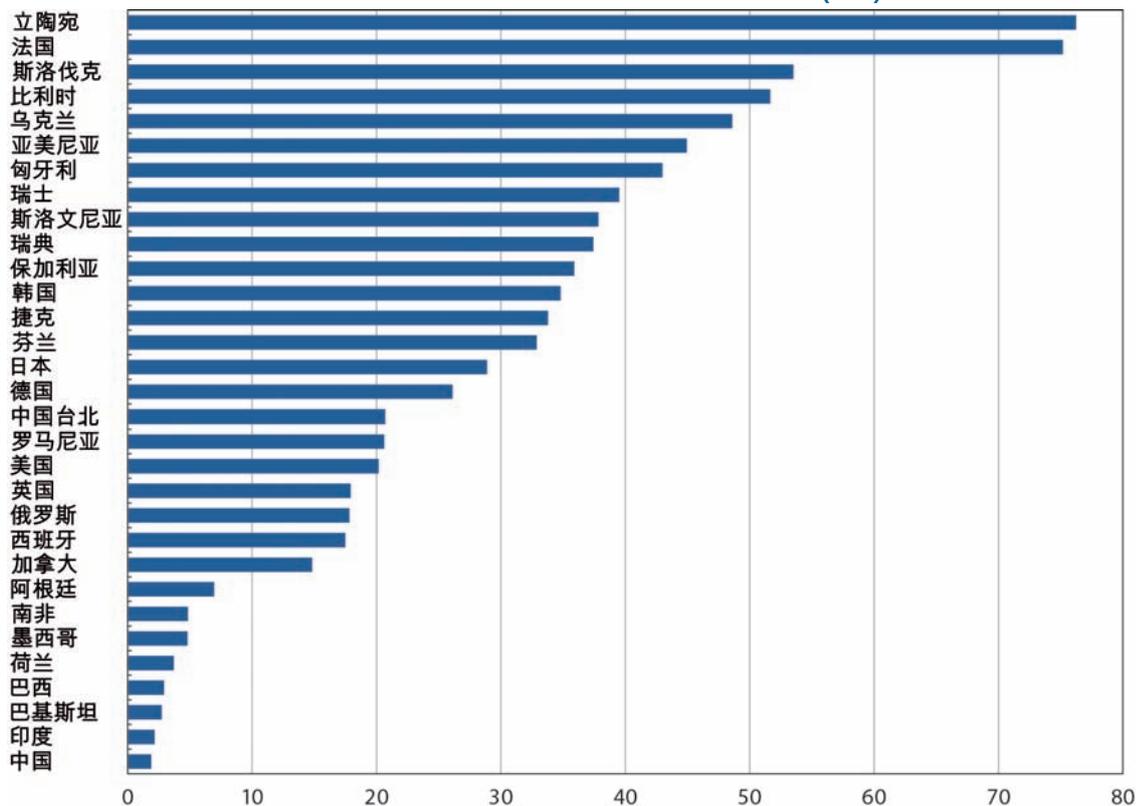
图2 1960—2009年世界核电装机容量



资料来源：国际原子能机构，巴黎。

要点：核电装机容量在20世纪70年代和80年代迅速增长，但是在1990年之后增速大大放缓。

图3 2009年核电在全部电力中的占比(%)



资料来源：国际原子能机构，巴黎。

注释：立陶宛在2009年末关闭了其仅有的一座核电厂，现在已经没有核电产能。

要点：有十五个国家的电力供应四分之一来自核电。

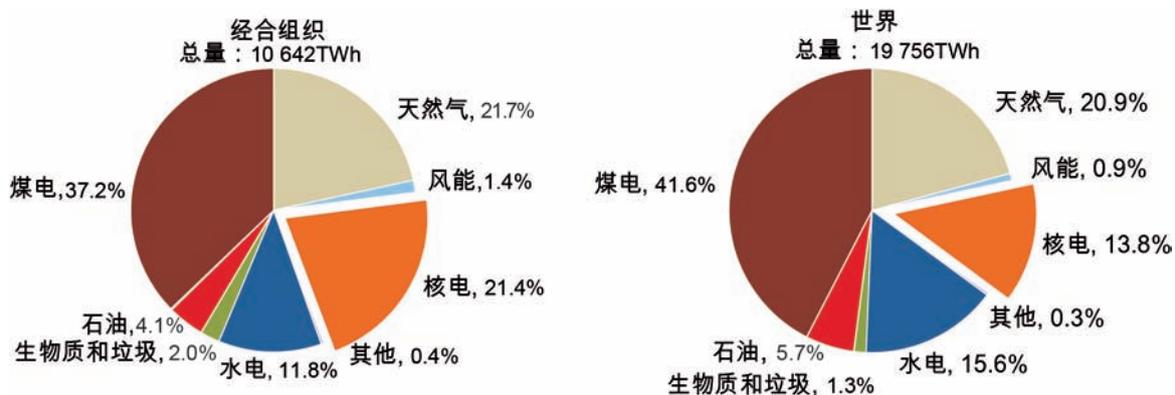
尽量挖掘现有反应堆的潜力以及在以后扩大核能的先决条件是持续安全的运行。除了强有力的独立监管机构之外，安全运行（以及良好的经营业绩）还需要依靠在运行和维护核电站的工作人员中建立且坚持“安全文化”。这是从事核活动的公司和组织的重要管理责任。

当现有核电站拥有者寻求最大化产出时，还可以观察到三大趋势。第一，自20世纪90年代以来，经营业绩总体改观，非计划关机减少，年发电量增加。第二，很多核电站最大发电容

量获得增加，这通常是由于投资了更新设备。第三，目前预计很多核电站的运行周期都可以比原来规划的延长20年。

就能源可用性系数(核电站可用来全功率发电的时间所占的百分比)而言，全球核电站平均业绩在20世纪90年代稳定增长(图5)，在几个国家，可用性系数经常会超过90%。然而，近几年全球上升趋势有所停滞，部分是由于一些国家的几个反应堆延长了关闭时间。

图4 2007世界范围内和经合组织各种不同来源的电力生产情况



资料来源：国际能源署，2009。

注释：“其他”包括地热、太阳能、潮汐能和波浪能发电。

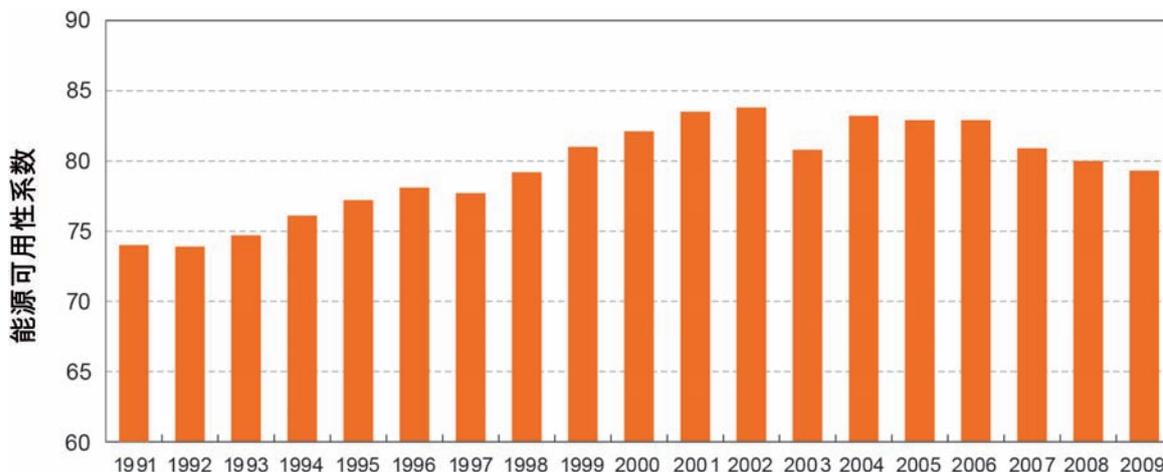
要点：目前，核能和水电是主要的低碳能源。

另外一种增加产出的方法是通过提高电力产率，即改进电站以生产更多的电力。一些电站的电力产率提高仅仅只需要改善设备，但另外一些需要在更新设备方面投入大量资金，尤其是高效涡轮的更新。欧美国家的许多反应堆已经计划或正在计划提高电站许可发电量，在有些情况下可提高20%。

目前运行的很大一部分核电站都已经运行了20多年，有许多已经超过30年。大部分的运

行周期被认为可达40年。然而，大部分零部件和系统在其磨损后或安装更新的设备具有吸引力时可以被更换。还有一些主要零部件不能被更换，包括反应堆压力容器，但在大部分情况下，这些是适合延长运行周期的。因此，对于许多核电站来说，长达50到60年的运行周期是实际可行的。目前正在考虑更长的运行寿命的潜力，可高达80年，但仍不确定其可行性。

图5 核电厂世界平均能源可用性系数



资料来源：国际原子能机构，巴黎。

要点：核电厂的平均运行绩效在 20 世纪 90 年代和 21 世纪初有了大幅改善，但是在过去几年已经有所下滑。

在一些国家，老电站的核监管机构已经就许可延长核电站运行周期制定了技术要求。比如说，在美国，核监管委员会已经为超过一半的现有电站颁发了60年的运行周期许可，另外一些电站正在审查中。许多反应堆拥有者已经实施了更新计划，旨在改善现有经营业绩和提高电力产出，以及准备延长核电站的运行寿命。

近期推广的核能技术

本路线图建议：

- 核能工业应该通过在少数几个国家建设参考电站，全面建设最新设计的核能发电站，以完善基本设计以及任何地区的变样设计，并建立全球供应链和产能。
- 核能工业应该继续证明，这些新设计能可靠地在规定的时间内以预期价格建成，通过尽可能采用标准设计、完善施工过程并进一步加强供应链，不断努力缩短施工时间，控制成本。

自从20世纪80年代以来，核电站的低水平订单导致了欧洲和北美核能行业的紧缩以及过去15年来的一系列合并。因此，总体工业能力以及可投入核建设的熟练人力资源已经急剧萎缩。这也导致了全球只有少数公司能设计和建设核电站，大部分是拥有跨利益和资产的公司。

自从1990年以来，除了少数几个核电站订单，这些核工业公司积极活跃于供应燃料、维护和更新现有设备。他们也从建设和维护现有

反应堆中吸取经验，为新核电站开发自己的设计方案。大部分已蓄势待发，准备利用订单建设新电站。

另外，韩国已经发展了强大的核能工业，目前除了国内市场，已向国际市场迈出了第一步。中国和印度也有强大的核工业，但预计他们仍专注于其国内市场，至少在短期来说是如此。尽管核电站供应遭受着严重的市场扭曲，但在全球范围内正成为一项具有竞争性的业务。

来自主要供应商的每一个最新设计都提供水平相当的技术，有时统称为第三代或III+代（现有的反应堆是第二代）。其目的是“设计排除”许多在现有核电站建设和运行时遇到的问题。设计简化和使用先进建设技术（比如模块化建设）是重要的主旨，目的是缩短建设周期，降低建设成本。这些设计提高了性能、可靠性和燃料效率，加强了安全系统，减少了放射性废料的产出。一开始设计的运行寿命达60年，可用性系数超过90%。

每一个供应商都打算尽可能在全球提供一个或更多的标准化设计以降低由于设计变更造成的工期延误风险。标准化也将在运行过程中带来好处，运营商之间可以相互交换信息和经验，类似电站间的人员调动以及承包商变动变得更容易。

目前领先的设计由全球主要的核电站供应商提供，这些供应商预计会提供大部分核电产能，这种情况至少会持续到2020年，见框1。

框1 到2020年推广的主要核电站设计

AP-1000 是西屋电气的旗舰设计。尽管日本东芝拥有西屋电气大部分股份,但其总部仍在美国。AP-1000 是约 1200 兆瓦的先进压水反应堆,前三个 AP-1000 项目在中国,处于建设初期。AP1000 设计也已被美国选定用于可能建设的美国最大数目的新核电站,同样也被英国以及其他国家选定。

EPR 压水反应堆是欧洲主要核能工业集团公司—阿海珐集团的主要设计,该集团由法国政府控股。同样,作为先进的压水反应堆,其输出功率为 1600—1700 兆瓦。首批机组现在已经开始在芬兰和法国建设。其他两套机组正在中国开工建设,很快在法国还有一个订单。和英国有望达成 4 个订单,美国也在考虑之中。

先进沸水反应堆 (ABWR) 是近期设计中唯一已经运行的,在日本有四套。此外,在中国台北还有两套正在建设中。这些反应堆输出功率在 1300 兆瓦范围内,但是也有输出功率可达到 1600 兆瓦的机组。基本设计由美国的通用电气和日本的东芝和日立共同开发。后来,通用和日立合并了他们的核能业务。

经济简化型沸水反应堆 (ESBWR) 作为先进沸水反应堆概念的进一步延伸,是通用日立提供的最新产品。它的输出功率接近 1600 兆瓦。目前还没有任何订单提上日程,但是某些可能建设的美国核电站可能会采纳这项设计。

先进压水反应堆 (APWR) 由三菱重工专为日本市场开发,预计不久将会开工建设两套机组。每套输出功率将在 1500 兆瓦左右。三菱重工还在为美国市场提供先进压水反应堆版本,并已敲定了一个可能的项目。

VVER-1200 (也作 AES-2006) 是压水反应堆设计 VVER 系列最先进的版本,由俄罗斯核能工业生产,现在由俄罗斯国有核能控股集团 Rosatom 组织管理。俄罗斯目前有四台在建的 VVER-1200,每台的净输出功率约为 1100 兆瓦。在其他市场还提供额外的设计,包括 VVER-1000,该设计出口到好几个国家,包括中国和印度。

先进 CANDU 反应堆 (ACR) 是加拿大政府所有的加拿大原子能公司研发的更新设计。大部分 CANDU 堆使用重水缓冲(或缓和)中子,使之可以使用天然铀燃料。然而,1200 兆瓦的先进 CANDU 反应堆将使用浓缩燃料,是第一个这样做的 CANDU 堆设计。加拿大原子能公司也提供增强型 CANDU6,增强型 CANDU6 的输出功率为 700 兆瓦,使用天然铀。到目前为止还没有关于其中任何一款设计的订单。

APR-1400 是韩国最新的压水反应堆设计,目前有两个 1340 兆瓦的工程在建,还有好几个尚在规划中。APR-1400 是基于现在由西屋电气拥有的原有技术,由韩国工业集团进一步开发,研发出一系列更先进的设计。不过专利使用权转让协定限制了其出口,但在 2008 年底,韩国与西屋电气联合(韩国居主导地位)赢得了阿联播联合酋长国的四套 APR-1400 合同。

CPR-1000 是目前中国的主要设计,有 16 台机组已经在建。这个 1000 兆瓦的设计是基于 20 世纪 80 年代阿海珐第二代设计的更新版本,此技术已经转让给中国。在 2007 年与西屋电气签署的关于建设 4 套 AP-1000 的协定中包含了此技术的转让,首批三台机组目前在建。预计这将形成下一代中国核能发电站的基础。

印度的**压力重水反应堆 (PHWR)** 设计是基于 20 世纪 60 年代加拿大出口的早期 CANDU 设计。最新机组有 540 兆瓦容量,700 兆瓦容量的机组正在规划中。尽管比原有设计有进一步的发展,但还是稍逊于第三代设计。除了建设压力重水反应堆之外,印度还从俄罗斯进口了两套 VVER,预计在不久还将有更多核进口订单。

核燃料循环发展状况

铀是核燃料的原材料，目前在全球14个国家有大量(表1)。自从20世纪90年代早期以来，铀产量不到反应堆每年需求(目前大约6800吨)的三分之二。剩余的铀主要来自20世纪50年代以来建立的铀储备。其中部分是商业储备，部分是政府持有的战略储备(包括来自拆除核弹头的材料)。在较小程度上，核燃料的回收利用和来自浓缩尾矿可用铀的回收(以下讨论)也是铀储备的一部分。

尽管有各种类型的大量铀储备，预计铀产量在未来几年仍会增长以满足较大部分需求。20世纪90年代铀的市场价格较低，但前几年已处在一个较高的水平。这并没有导致产量的飙升，但刺激了现有和新开发的铀矿制定了扩大产能的计划。澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦、纳米比亚、尼日尔、俄罗斯以及南非都在计划扩建。目前，每年的铀生产能力约55000吨，到2015年可以达到100000吨。然而，大部分这种投资取决于未来几年的市场状况。

核燃料本身是一种制造产品(详细情况见2)。就目前的价格而言，铀仅仅只是核燃料价格的一半，浓缩铀约占40%。尽管六氟化铀(UF₆)转化和浓缩是通用工艺，但每一个个体核电站和一系列类似电站都有独特的燃料设计。详细的燃料设计和成分以及构件的质量都对核电站的总体可靠性和性能有重大影响。自20世纪90年代以来核电站性能改进部分是由于燃料设计革新，降低了燃料泄漏事故，提高了从每个燃料组件中提取的能量。

尽管其他国家也有较小的能力，但大部分核燃料循环设施都分布在少数几个经合组织国家和俄罗斯(表2)。这些设施有足够的技术支持现有反应堆以及那些即将在未来几年中投入运行的反应堆。然而，一些现有设施正在被更换或扩建，或在未来几年中更换或扩建。尤其

是，基于更有效的离心技术的新的浓缩产能正在美国和法国建设，以取代旧的扩散工厂(这种工厂将在未来几年中退役)。同时，其他的浓缩供应商(已经运行离心电站的供应商)为了满足需求，正在逐步扩大产能。法国的UF₆转化能力也正在更新中。

浓缩厂中加工的大批天然铀(重量约为85%)残留在尾矿中(废气流)。近几年来，大量的贫铀被进一步加工以生产额外的浓缩铀，方法是通过从首次浓缩后的残余U-235中部分提取(通常约0.3%)。然而，随着浓缩铀供求变的更加平衡，这种形式的铀供应预计会下降。

表1 2008年各国铀产量

国家	铀产量(吨)
澳大利亚	8430
巴西	330
加拿大	9000
中国	769
捷克	263
印度	271
哈萨克斯坦哈	8521
纳米比亚	4366
尼日尔	3032
俄罗斯	3521
南非	655
乌克兰	800
美国	1430
乌兹别克斯坦	2338
其他	127
总计	43853

资料来源：世界核协会，2009。

可能回收利用乏燃料以及使用铀和钚，以制备进一步的核燃料（详见框2）。尽管充分利用回收燃料将要求使用快堆（稍后讨论），一些现有反应堆已经开始回收利用乏燃料。在法国、俄罗斯以及英国，可从乏燃料中提取铀和钚的大型再加工工厂正在运行中，在日本也有这种大型工厂正在建设中。

从技术上来说，只要有合适的燃料处理设施，使用回收材料制造的燃料便适合在许多现有反应堆中使用。实际上，这种燃料的使用受许可要求、燃料循环经济效益和其必要的专用燃料循环设施能力的限制。因此，建立了一些再加工铀和钚储备库。目前，回收提供4-5%的核燃料供应，主要在西欧、日本和俄罗斯。预计未来几年将逐步增长，部分原因是高昂的铀价格使得核燃料的回收利用更加经济。基本上，通过这种方式回收利用所有的乏燃料可以降低约30%的铀损耗，但将需要大幅提高再加工和其他专用燃料循环的能力。

放射性废料的管理

核燃料循环会产生各种类型的放射性废料，包括与核材料接触的轻度污染的物体，高活性的乏燃料以及后处理废料。这些废料可以被分为轻度、中度和高度放射性废料，中放废料又可以被分为短期废料和长期废料。

低放废料和短期中放废料的处理、储存以及处置技术已经得到很好的开发，几乎所有拥有大型核电项目的国家都运行此类废料处置设施。虽然这些代表着最大的放射性废料量，但大部分放射性包含在体积相对较小的乏核燃料中，并且对于已经循环利用核燃料的国家来说，会包含在来自再加工的高放废料中。

表2 各国轻水反应堆商业核燃料循环处理设施年处理能力

国家	UF ₆ 转化（吨铀）	铀浓缩（tSWU）	轻水堆燃料制造（tHM）
比利时	-	-	700
巴西	-	-	280
加拿大	12500	-	-
中国	3000	1300	450
法国	14500	10800	1400
德国	-	4000	650
印度	-	-	48
日本	-	150	1724
韩国	-	-	600
荷兰	-	4000	-
俄罗斯	25000	20250	1600
西班牙	-	-	300
瑞典	-	-	600
英国	6000	3000	860
美国	15000	11300	3650

资料来源：世界核协会，2009。

注：有些容量是近似的，有效运行容量可能更低。一些国家已经有小型或试点设施在运行中，不包括在这里。重水反应堆燃料循环设施（UO₂转化和燃料制造）也没有包括在内。浓缩能力是按照千分离工单位（tSWU）给出的，燃料制造按重金属吨（tHM）给出。

乏燃料和高放废料起初含有高放射性但短寿命的能产生热量的裂变产物。在处置之前，这些裂变产物必须在受控条件下储存几十年，而同时这些材料会衰变。乏燃料开始被储存在反应堆场址的水池中。一些国家在几年之后将这些乏燃料转移至中央储存设施中。随着其逐渐冷却，乏燃料可以被转移到金属屏蔽桶中进行干燥储存。来自再加工的液体高放废料加热成玻璃状临时储存在金属容器中。

已在数个国家证实这种储存方式能持续安全地以较低成本储存相当长一段时间。然而，展示这种废料的永久储存可行性，至少在少数国家，将为公众建立对核能的信心起到非常重要的作用。因此，未来的主要挑战是开发和实施乏燃料、高放废料和长期中放废料在深层地质处置库的储存计划。这个问题将在此路线图后面做进一步讨论。

到 2050 年的核能推广：行动和里程碑

蓝图情景中核电装机容量增长情况

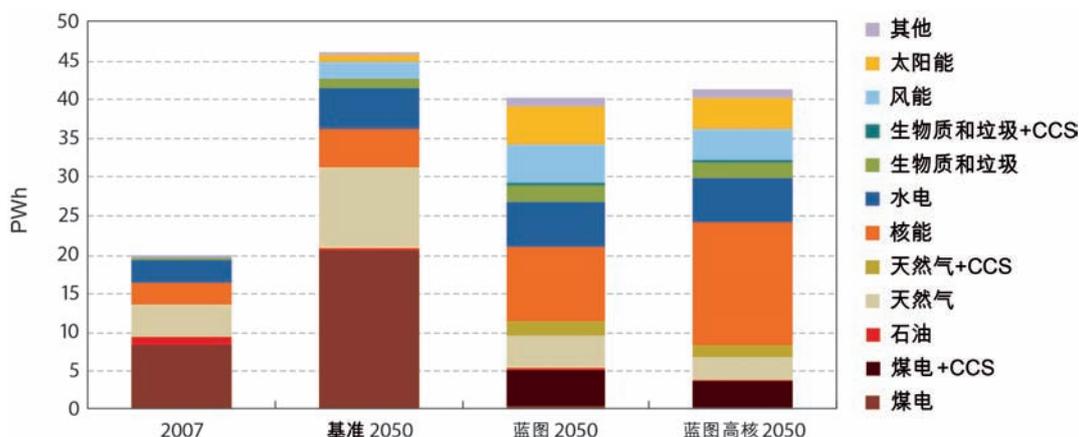
国际能源署的《能源技术展望2010》蓝图情景(国际能源署,2010)预测,与2009年年末的370吉瓦相比,到2050年有差不多1200吉瓦的核能装机容量,从而促使核能为把与能源相关的CO₂排放降低50%做出主要贡献。这一核电产能届时每年将提供9600太瓦时的电力,占全球电力生产的大约24%。在蓝图中,到2050年,核电将一举超越煤电、天然气发电、水电、风电以及太阳能发电,成为单个最大的电力来源(图6)。

尽管要在2050年达到1200吉瓦核电产能是一个宏伟的目标,但从技术和行业角度来说,在未来40年实现核能装机容量达到现在的三倍以上是肯定可以完成的。假设到2050年,现有所有运行的反应堆被关停,在2010年到2050年间平均每年需要投入运行30台1吉瓦的反应堆。上世纪70年代和80年代曾达到过这种建设速度(虽然短暂),尽管当时只有较少的国家实施核计划,核能力还不如现在发达。

实际上,为实现蓝图情景所需的建设速度有可能较低。如前所述,许多现存的核电机组被授权运行60年,延长核电站运行寿命的趋势在全世界都会看到。因此,多达60吉瓦的现有产能将运行至2050年。此外,现有许多反应堆设计容量超过1吉瓦,基本上在1.2到1.7之间,在用电需求大且电网适合大型机组的国家有可能选择这些机组。考虑到这些因素,在未来40年,每年需要建设约20套大型核电机组。这意味着从现在起到2020年,新的核电站的建设速度需要翻番,并且需要在此后继续保持缓慢增长。

蓝图情景中全球核电产能的增长包括大的区域差异。迄今为止,最大的核扩建计划预计会在在中国,从现在占全球产量的不到3%会增加到2050年的约27%。印度也预计会大幅推广核能,从现在的不到2%扩张到2050年的约11%。尽管核电能在经合组织国家预计会增长,特别是在北美和太平洋地区,但在蓝图中,其在全球核电产能中的份额将从现在的80%降低到2050年的不到50%。

图6 2007年全球各类电力生产情况和《能源技术展望2010》中到2050年基准情景、蓝图情景和蓝图高核情景下全球电力生产情况



资料来源：国际能源署，2010。

注释：CCS代表二氧化碳捕集与封存。“其他”包括地热、潮汐和波浪电力。

要点：在蓝图情景中，在2050年核电是世界上最大的单一电力来源。

根据蓝图高核情景，2050年总核电产能将达到2000吉瓦，供应约16000太瓦时电力，或占全球电力总量的38%（图6）。核能署高级情景预测到那时将有1400吉瓦的核电产能。显然这些情景将要求更快的核电建设速度，尤其是在随后的几十年中，以及更快的核燃料供应增长。这些情景并没有在本路线图中作太多赘述。然而，任何核能的大规模扩张都要求到2020年要有同样的初步发展，为以后数十年更快速的扩张的建立一个平台。从长远来看，核能力扩张的程度在很大程度上取决于其与其他低碳能源的竞争力。

到 2020 年的核电增长展望

2009年末，在14个国家有55个新动力堆处于正式建设中（表3）。在这些新动力堆中，中国的计划最庞大，有20台核能机组正在建设中。俄罗斯也有好几组大型核能机组正在建设中。在经合组织国家中，韩国的核扩张计划最大，有6台核电机组正在实施中，但是在芬兰、法国、日本以及斯洛伐克共和国正在建设一台或两台新的核电机组。在美国，长期停滞的核计划又开始重启。总之，（尽管在未来几年中预计会关停几个吉瓦的旧核电站）预计这些新的核电机组依然可为现有的370吉瓦核电产能增加约50吉瓦的新产能。

展望2020，由于规划、许可和建设核电站的整套过程至少需要7-10年，届时要投入运行的核电站多数已经进入规划和许可进程中。因此，对这一期间的预测可以基于对现有的全球新核建设计划的审查。

预计一些积极进行核建设的国家在未来几年中会开始进一步建设，继续其核扩张，尤其是中国、印度和俄罗斯。其他一些拥有核电站的国家正在积极考虑新的核能力，预计未来几年内会做出最后决策，这些国家包括加拿大、

捷克共和国、立陶宛、罗马尼亚、英国和美国。在这些国家中，美国是最显著的：有超过30台新的核电机组正在审议中，其中有22台已于2009年末提交许可申请。现在没有核电站的国家正在考虑到2020年安装核能力，这些国家包括意大利、波兰、土耳其以及阿拉伯联合酋长国。后者已在2009年下半年宣布订购4台大型核电机组。

表3 截至2009年底的在建核电厂

位置	机组数量	净容量（兆瓦）
阿根廷	1	692
保加利亚	2	1906
中国	20	19920
芬兰	1	1600
法国	1	1600
印度	5	2708
伊朗	1	915
日本	1	1325
韩国	6	6520
巴基斯坦	1	300
俄罗斯	9	6996
斯洛伐克	2	782
中国台北	2	2600
乌克兰	2	1900
美国	1	1165
总计	55	50929

资料来源：国际原子能机构，巴黎。

考虑到在未来几年中建设和计划建设新核电产能的国家的当前计划和能力，以及一些旧核电站可能关停，由包括国际能源署和核能署在内的几个组织开发的情景显示，核电容量将在2020年达到475-500吉瓦。这个范围的较高值将中国最近加速发展核计划的情况纳入了考量范畴。

要扩张至500吉瓦，除了已经建成的核电机组，还需要到2016年左右开始建设另外90吉瓦

(允许关闭一些较旧的机组) ，或者每年建设 12-13 吉瓦。2009 年，总容量超过 12 吉瓦的 11 个大型核项目开始建设。其中，9 个在中国，韩国和俄罗斯各 1 个。2008 年开建 10 个项目 (总容量为 10.5 吉瓦) ，其中 6 个在中国，韩国和俄罗斯各 2 个。尽管只涉及了这三个国家，但自 1985 年以来，这两年建设是高峰期。尤其是中国，预计在未来核扩张中会发挥领头作用，若要保持现有的扩张步伐，其他国家未来几年将需要开始新的核建设。

最近几十年建成的核电站相当少，所以，现有的核建设工业能力在很多国家都大为受限。如上所述，行业合并导致了拥有全球供应链的少数跨国供应商的出现。尽管大部分已经开始扩张产能以应对实际需求和预期需求，依然需要更多的产能。很显然核供应商已经拥有工业能力和人力资源建设少量核电站，但在未来几年中也面临扩张能力和加强供应链以满足持续走高的需求的挑战。

为 2020 年之后更加迅速的推广做好准备

本路线图建议：

- 核工业应该在全世界投资建设工业生产能力和培养高素质的人力资源，增加全球建设核能发电站的能力，在保持必要的高质安全标准的同时拓宽供应链。
- 对于那些启动或重启核计划的国家，政府应该确保在政府单位、电力公司、工业部门以及监管机构有合适的能胜任的高素质人才，以满足核计划的预期需求。

到 2020 年实现核建设速度翻番，以达到蓝图情景中预期的推广水平，将要求在未来几年中有大笔投资投向新增工业能力并教育和培训必要的熟练工人。

纵观历史，核电站建设曾达到过比目前高的水平。在 20 世纪 70 年代期间，核建设开工达到高峰，

每年超过 30 台核电机组开工，在那十年中，平均每年超过 25 台 (图 7) 。与前十年相比是一个大的增长。尽管这些机组小于现在的设计，但当时采纳的技术也不如现在的发达。此外，相对来说只有少数国家参与到早期的核快速扩张，全球总体工业产能自 20 世纪 70 年代以来有了极大的增长。未来电力供应和核能力扩张的多数将发生在大的、快速工业化的非经合组织国家 (主要是中国和印度) 。

然而，如果增加产能的投资是基于商业利益，那么只有当有长期有效的需求存在时，才会投资。因此，预计将在几年的时间里中逐步建设产能以应对逐渐上升的需求。因此，为了在 2020 年完成约 500 吉瓦的核电容量，且为了在 2020 年后更加快速的增长所要的工业能力和人力资源的扩张，未来几年还需要有不断增长的新核电站订单。

核电站是非常复杂的建设项目。核供应商，做为设计者和技术拥有者，仅仅只提供电站的核系统。各种不同领域的专业分包商和供应商们提供并安装剩余系统和零部件。电站大的部分，包括混凝土结构和涡轮发电机，类似于非核电站，通常来说由具有适当专业背景的重型建筑和工程公司承建。“建筑师-工程”功能包括通用工程、施工进度与成本管理以及协调合同商与供应商，这在核建设中也至关重要。

因此，确保核工程成功完工，需要开发和管理复杂的全球供应链。随着新的核电站订单越来越多，供应商为了加强能力以服务全球市场，供应链将变得更加宽泛。在很多情况下核能进入一个新市场时，需要与当地和区域建筑公司及工程公司合作。

最多几年，大多数反应堆零部件厂商将增产以满足市场需求。需要交付时间最长的新增生产能力预计是在大型钢锻件方面，这在最新核电站设计中的使用越来越多。尽管有足够的生产能力生产其中许多锻件，但能够为许多市场生产的用于某些设计的最大型锻件目前全球只有一家工厂能生产 (在日本) 。

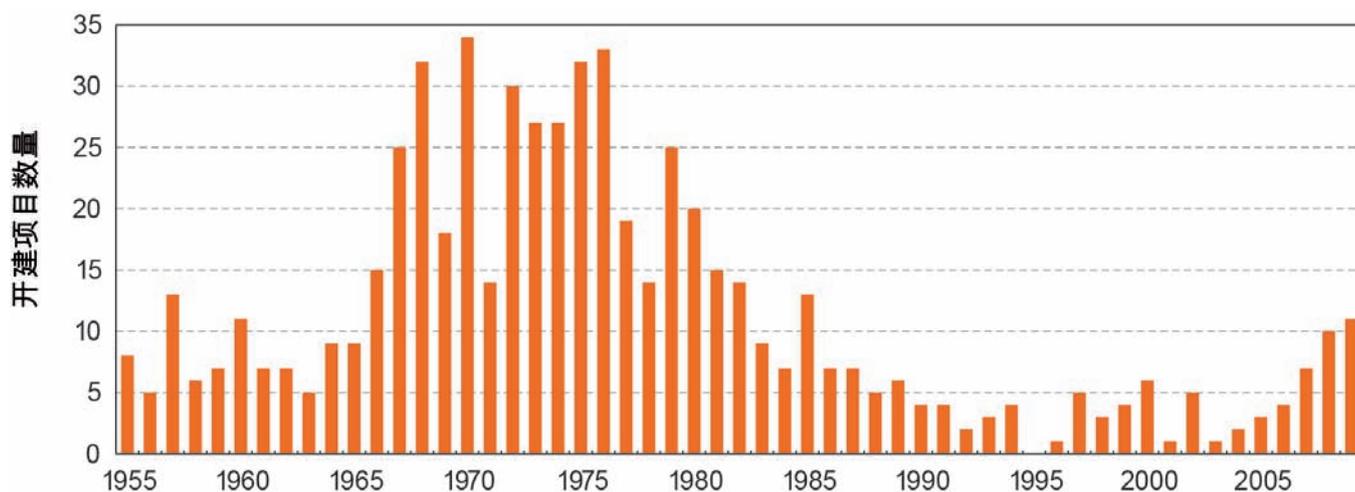
由于需要大笔投资，且仅仅只有少数几家公司有这种专业背景，因此需要花费五年或者更多时间扩张这些重型锻件生产能力。韩国和英国的成熟供应商正在计划开发大型锻件能力，但这种计划很有可能取决于客户的坚定承诺。

核能行业总体来说包括核工业、电力公司和监管机构，其发展需要高素质的熟练人力资源。核能扩张需要一大批受过高等培训的科学家和工程师，以及技艺娴熟的工人，而这些人才很有可能出现短缺。近年来很多核工业公司扩大了招聘和

培训计划。政府和大学也应该履行其职责，确保提供合适的课程以及培训。

核电站的长运行周期可以跨越好几代人，因此，知识管理很重要。知识的保留对安全有效地延长现有机组寿命以及在吸取经验的基础上设计和建设新电站非常重要。随着那些曾在上世纪70年代和80年代主导实施过核计划的科学家和工程师已届退休年龄，一些重要的技术秘诀可能会失传。因此，知识管理和向年轻专家传承技术秘诀需要成为核能领域的重中之重。

图7 1955年到2009年每年核电厂开建数量



资料来源：国际原子能机构，巴黎。

要点：核电站建设在 20 世纪 60 年代后期迅速发展后，于 20 世纪 70 年代达到顶峰。

核燃料循环要求

本路线图建议：

- 核工业应该扩大铀生产以及核燃料循环设施产能，以与核能发电量增长保持一致，包括推广可用的更高效的先进技术。

当考虑增加对核能的依赖时，重要的是要评估铀的可用性和燃料循环能力，以确保长期的燃料供应安全。虽然过去20年勘探有限，目前已知的铀资源与现有消耗量的比率堪比其他矿物能源资源，大约还可以供应100年。预期可以被发现的新增资源（在现有的地质资料基础上）可以增加约300年的供应量，包括预计的“非常规”资源，尤其是磷矿石中赋存的铀，可以把资源供应年限延长到约700年（表4）。海水中预计含有40亿吨铀，如果能开发出经济的提取方法，那么将几乎是取之不尽用之不竭的。

根据现有燃料循环技术和实践经验，蓝图情景预期的核能生产水平将导致在2010—2050年间消耗约560万吨铀。然而，几项技术发展将会在未来几十年增加每吨铀所能产生的能量，从而降低铀消耗总量。这些技术包括改进经营方式和燃料管理方式，完善燃料设计，促进燃料材料的发展，提高新的和升级的核电站热能效率。

此外，新的浓缩技术推广将产生影响。由于要权衡天然铀数量与要求产生定量浓缩铀所要求的浓缩工作，提取自天然铀的U-235比例在很大程度上取决于浓缩技术和天然铀的相对成本。与老式扩散技术相比，离心浓缩技术运行成本降低，其更广泛应用预计将提高铀的使用效率。

和新的离心工厂一样，更高效的先进离心分离机将逐步取代现有离心机工厂的旧型号。此外，新的使用激光的浓缩技术正在测试中。计划于2015年左右运行首个商业激光浓缩厂。这种技术发展可能会从现有贫化铀库存中提取更多的U-235，以及在以后提高新开采铀矿的使用效率。

表4 不同类型铀资源和目前年消费量的大致比例，也显示了快堆循环利用的潜在影响

	已知常规资源量	常规资源量总量	带有非常规资源量的情况
具有现有反应堆和燃料循环	100	300	700
具有快堆和先进燃料循环	>300	>9000	>21000

资料来源：核能署，2008。

尽管如此，蓝图中的铀需求仍然代表了目前已知的约630万吨常规铀资源的大部分（核能署，2010）。然而，如上所述，新增资源和非常规资源会延长现有铀资源的使用年限。作为对铀价上涨的回应，自2002年以来，每年铀勘探支出已从一个较低的水平上涨了三倍。随着核电的扩张，许多地区在取代已开采资源方面有进一步重大发现，预计铀勘探活动将有进一步的持续增长。

如果铀资源本身不太可能为核计划扩张的限制因素，市场上铀的及时充足供应将是一个关注因素。开发新矿，可以取代现有的枯竭矿山和扩大综合生产能力，将需要在今后几十年大量投资。许可及开发新矿主要是在偏远地区，可以运行许多年。最近的教训是，尽管有铀价走高的刺激，但铀生产仍需要多年的时间方能做出响应。

若有适当的价格信号、充分确定的政策和监管体系，现有的铀矿公司以及新进入者将准备投资新产能。核电站开发者可能寻求通过长期合同或甚至是通过直接投资新产能，以在建设之前至少确保部分铀供应。拥有商业可行性铀资源的各国政府在保证支持性政策环境和有效监管程序方面发挥着重要作用。

有几种不同的铀提取技术，采矿技术的进步可以改善一些铀资源的可用性。目前，传统的地下和露天采矿约占产量的60%。地浸技术（ISL）在过去几十年中被广泛应用，现在使用这种技术的开采产量约为30%。地浸技术的优势包括较低的前期资本成本，开采较小矿山的能力以及对环境的较小影响。铀作为副产品（通常是金或铜的副产品）的产量也很大，并将可能在未来获得扩大。从长远来看，先进反应堆和回收利用核燃料的燃料循环设施的商业化部署可以从每一吨铀中提取更多能量（表4）。这种先进核系统的开发将在此路线图后面部分做进一步讨论。考虑到预期铀资源的可获得性，即便没有大规模部署，蓝图情景中到2050年的核电产能增长也是可以完成的。然而，如果较低廉的铀资源变得更稀缺，回收利用核燃料的经济吸引力将增加。

如前所述，现有的适用于UF₆转化、浓缩以及燃料制造的核燃料循环设施足够满足未来几年预计的需求水平，并有根据需要更换和扩张产能的近期计划。此外，那些正在实施重大核电计划的国家，比如说中国和印度，正计划提高其国内核燃料能力。一般情况下，扩张核燃料循环能力所需的时间少于建立新核电发电产能所需的时间。因此，原则上来说，核燃料循环服务的供应保障不应该成为重大担忧。

然而，如果在2020年后显著扩大核电容量，其他国家将需要新建大规模设施。建设所需的新转化和燃料制造设施应该不会造成困难。但是从防扩散的角度来看，浓缩涉及的技术是敏感的，将限制新设施的潜在地点。对一些关注能源供应安全的国家，这可能成为依赖核能的一个不利因素。

若东道国无法获得这种技术，一个解决办法就是建立“黑盒子”浓缩厂。国际论坛正在讨论为没有自己浓缩设施的国家创造保证核燃料供应的机制。这种计划的推行将在2020年后促进核能在更多国家扩张。从长远来看，防扩散的先进核系统的发展可能可以为这一问题提供技术解决方案。

框2 核裂变以及燃料循环介绍

核反应堆和裂变

核裂变是核能发电站中基本的热量产生过程。一个重原子核吸收了单个核粒子（中子），促使其分裂成两个较小的原子核（裂变产物），进一步释放中子和热能。平均来说，如果其中一个中子继续引起进一步裂变，就会形成一个稳定的链式反应。通过冷却剂（通常是水）将热量从核燃料中除去，并产生蒸汽驱动涡轮发电机。

只有很少类型的重原子核可以发生裂变（“可裂变的”）。除了少数现有的核电站外，主要的裂变核（或同位素）都是铀-235（U-235），U-235 仅仅只占天然铀的 0.71%。对于大部分反应堆类型来说，在一个浓缩厂，燃料中 U-235 的比例必须提升至 4-5%。

当 U-235 吸收一个慢中子（或者热中子）时，通常会发生裂变。由于产生的大部分中子起初都是“快”中子，反应堆必须含有“减速剂”，一种能缓和中子达到所需热能水平的物质（通常是水）。核反应通过插入或移除含有中子吸收材料的控制棒来加以控制。

绝大多数现有核电站，以及大部分新核电站的设计，都使用了轻水反应堆（LWR），这种反应堆使用普通的水作为冷却剂和减速剂。轻水反应堆被进一步分成压水反应堆（PWR）——最常见的类型，以及沸水反应堆（BWR）。一小部分核电站使用含氘（氢的同位素）的“重”水。这是一个更有效的减速剂，意味着这些发电厂可以使用非浓缩铀燃料。极少数较老的发电厂使用其他反应堆类型（比如说气冷石墨慢化反应堆），但是目前此类设计没有被运用到新的建设中。

生产核燃料

核燃料是一种制造产品，（对于目前大部分正在运行的反应堆来说）由包含在锆合金管中的浓缩二氧化铀陶瓷颗粒组成，这些陶瓷颗粒排列在核燃料组件格中。除了铀矿开采以及生产铀矿石精矿，燃料循环“前端”由以下三种主要的核工业工艺组成：

- 铀矿石精矿转化为六氟化铀；
- 六氟化铀浓缩（增加裂变同位素 U-235 比例）；
- 燃料组件制造（包含从浓缩六氟化铀制备二氧化铀颗粒）。

开放式和封闭式燃料循环

大部分核燃料在反应堆中耗费 3 年或 4 年。在除去时，通常来说会含有 96%左右的铀（其中，大部分是 U-238，U-235 不到 1%，其他铀同位素只占很小的比例），3%的废品以及 1%钚。乏燃料可能会被认为是废料，在有管理的情况下进行存储，最后埋存在地质储存库。这就是“开放式”或“一次通过”燃料循环。

然而，乏燃料也可以在“封闭式”燃料循环中进行循环利用。其中包含的铀和钚会被提取并用于准备进一步的核燃料。废品组成了高放射性废料，被分离出来作进一步处理，然后进行临时储存，直到最后埋存在地质储存库。回收的铀能在专用设施中再度被浓缩并被用来制作新燃料。钚可被用在铀钚氧化物燃料中，在这种燃料中，钚是主要的裂变成分。

先进的燃料循环和快速反应堆

超过 99%的天然铀是 U-238，这是一种“肥沃的”同位素。这意味着它不能在反应堆中裂变，但是可以吸收中子以形成（在进一步衰变后）裂变钚-239（Pu-239）。钚燃料可以被用在现有“热”反应堆中，但是钚-239 与快中子之间的裂变比铀-235 更稳定，因此，可以用于没有减速剂的燃料反应堆，称之为“快速”反应堆。

在现有燃料循环中，主要使用铀-235，大部分铀仍保留在浓缩厂的尾矿中，预计有 160 万吨的“贫”铀存储在尾矿中。在快速反应堆中，贫化铀可置于“再生区”的芯周围。它所包含的铀-238 会吸收中子产生钚-239，然后进行化学提取，产生新燃料。这个过程被称之为“增殖”，能生产出大大多于能消耗的核燃料。增殖的大规模使用将铀-238 变成核燃料，这将使现有铀资源的寿命延伸数千年（表 4）。这将在以下部分中做详细讨论。

技术开发和推广：行动和里程碑

当前技术的演变发展

本路线图建议：

- 在通过尽可能复制标准设计获取利益时，核工业应该继续反应堆和核燃料设计的演变发展，以从建设参考电站所积累的经验以及从技术进步中受益，从而确保核能保持竞争力。

当前核电站设计由龙头核供应商基于商业利益开发，通常与各主要电力公司协商以满足新核能力的实际和预期需求。这反映了核能作为一种成熟商业化技术的状态。供应商和公司客户的重要目标是生产标准化设计，只需最小限度的调整即可适应当地条件和监管要求。尽管以往有标准化的例子，但在早期实践中，每个核电站通常都有独特的设计特点。

对这些标准化设计进行重大变更将产生额外成本并增加不确定性。这表明，一旦目前提供的设计在首批同类工厂进行了示范，将会强烈推动随后的核电机组做出最小的设计修改。尽管为满足不同的监管要求，有些改变不可避免，在施工过程和运行过程中严格控制这些设计变化，对于实现标准化的潜在利益将至关重要。建立一系列标准化设计可以在施工过程逐步改善，缩短施工周期，降低总体成本。

尽管如此，某些时候，进一步演变性设计变化的潜在收益有可能大于其潜在的风险。这在很大程度上取决于订购新核电站的电力公司的偏好。很多公司倾向于使用一个久经考验的更具有确定性的设计，但是其他一些公司可能希望把可以具有提高性能和/或增加产量潜力

的设计改进方案融入进来。也可能有机会引进更先进和更高效的施工技术。明确的是，现有设计的持续演进发展以及新特色和增强型功能的引进时间从本质上来说将是一个商业决定，其目的是提高核电竞争力。

在燃料循环中，由商业运营商开发和部署的新型改进技术预计可在未来几年中会提高核电的竞争力。尤其是，更高效的离心浓缩技术以及潜在的激光浓缩技术的部署将有助于改善燃料循环经济性。不断开发改进型燃料设计也应该可以提高燃料效率，提高核电站的可靠性和性能。另外，在核电站维护程序中应利用改进的技术和方法减少电站关停的数量，缩短关停时间，从而增加电站发电量。

实施乏燃料和高放废料处置解决方案

本路线图建议：

- 政府应该推行一系列政策和措施，以确保充足的长期资金用于放射性废料管理和处置以及退役，政府还应该建立必要的法律和组织框架。
- 政府应该确保制定并实施能适用于各种类型放射性废料长期管理和处置的计划，尤其是处置乏燃料以及高放射性废料的地质储存库的建设和运行。

如此路线图之前所述，未来放射性废料管理的主要挑战是制定和实施乏燃料和玻璃化高放废料最终处置计划。长寿命的中放废料也可能用同样的方法处置。

全球正在寻求这种材料在深层地质处置库的处置方法。一些国家已经建立了不同地质背

景的地下研究实验室以开发储库概念并探讨影响其长期性能的因素(见表5)。实施地质处置的科学和技术根据也因此确立。目前一些国家正在积极实施旨在2050年前开放处置库的研发与示范计划。一旦成功实施,这些正在进行的项目和计划将为许多已经积累和预计于2050年产生的乏燃料和高放废料提供处置途径。

瑞典和芬兰是推进建设和运行处置库计划的领导者之一。这两个国家已选定地址并预计于2020年左右运行设施。法国预计于2025年紧随其后。但与此同时,美国内华达州决定放弃开发尤卡山地质处置库的长期计划。

从长远来看,如果大规模回收利用乏燃料,那么目前通常被视作废物的现有乏燃料库存将成为能源资源。部分基于此,一些国家在设计处置库时,允许乏燃料恢复,至少可以持续到未来作出永久封存设施的决定。使用先进燃料循环也可大幅降低弃置乏燃料和高放废料的数量。仍然需要一些处置措施,但数量可以更小和/或更少。这些将在以下章节中作进一步讨论。

表5 高放射性废料处置地下研究实验室

国家	地质构造	场址和发展现状
比利时	粘土	摩尔 (Mol)。HADES 地下研究实验室于 1984 年开始运行。
芬兰	花岗岩	奥尔基洛托 (Olkiluoto)。ONKALO 地下研究实验室在建。现场研发从 1992 年开始;该场所现在已被选作储库。
法国	粘土/泥灰岩 粘土	图内米尔 (Tournemire)。地下测试装置于1992年开始运行。布赫索德龙 (Bure-Saudron)。地下研究实验室于 2004 年开始运行。
德国	盐丘 盐丘	Asse。以前的矿山用于研发,直到 1997 年。戈莱本 (Gorleben)。前矿山。现场研发从1985年开始一直到2000年暂停。在2010年取消了暂停。
日本	花岗岩 沉积岩	瑞浪市。地下研究实验室于 1996 年开始运行。幌延。地下研究实验室在建。
俄罗斯	花岗岩、片麻岩	克拉斯诺雅茨克地区。地下研究实验室有望在2015年以后开始运行。据规划,地下研究实验室将成为储库的第一阶段。
瑞典	花岗岩 花岗岩	斯特帕 (Stripa)。前矿山在 1976 年到 1992 年用于研发。卡尔马 (Oskarsham)。Äspö 地下研究实验室于 1995 年开始运行。
瑞士	花岗岩 粘土	格里姆萨尔 (Grimsel)。地下研究实验室于 1983 年开始运行。特里山 (Mont Terri)。地下研究实验室于 1995 年开始运行。
美国	层状盐层 熔结凝灰岩	新墨西哥的卡尔斯巴德(Carlsbad)。废料隔离试点工厂于1999年开始运行,作为国防相关的非生热的超铀废物的地质储库。内华达尤卡山 (Yucca Mountain)。现场研发从1996年开始。在2008年提出许可申请,于2010年撤销。

资料来源:核能署,2008(更新)。

开发新一代核能技术

本路线图建议：

- 政府应该继续支持先进核技术的研发与示范，获取核技术的长期潜力，提供可持续能源，改善经济，增强安全性和可靠性，强化抗扩散能力以及实物保护。
- 国际社会应该继续加强在开发先进反应堆和燃料循环技术方面的合作。
- 核工业和电力公司应该与核研究所合作，开发下一代核系统以确保选定示范的设计是其中最合适最终商业化

几乎所有正在运行或建设中的核电机组都使用轻水/重水反应堆。这些成熟的技术以及基于这些技术的演进设计预计在2050年仍在核能力中占主导地位。然而，少数先进的系统可以在21世纪30年代进行商业推广，这种系统在2040年后在市场上将可更广泛的获得。

一些国家正在开展这些先进核系统的研发与示范工作，大部分是在国际规划尤其是第四代核电国际论坛（GIF）的背景下开展的。各领域（尤其是材料科学）都需要技术进步和一些科学突破，以示范和推广这种与现有核技术有截然不同特征的系统。

第四代核系统

第四代核电国际论坛发起于2001年，是一个专注于选定的创新型核系统合作研发的国际项目。其成员包括12个领先的核能国家（包括加拿大、中国、法国、日本、韩国、俄罗斯以及美国）以及欧洲原子能共同体（欧盟的一个

分支）。第四代核电国际论坛路线图制定的主要目标集中在可持续性、经济性、安全性与可靠性、以及防扩散性与实物保护（框3）。第四代核电国际论坛的可持续性目标包括更有效的燃料利用和最低限度减少废料。实现这些目标的主要研发工作将在以下有关先进燃料循环的部分讨论。

先进核能系统的经济目标是与可利用的可替代能源方案进行竞争。为此，第四代核电国际论坛的经济目标包括降低均化发电生命周期成本与总资本成本。先进核系统的设计正在整合降低成本的方法。重点是简化及标准化设计，加强施工方法、对主要零部件以及系统进行工厂制造。

第四代核电国际论坛安全性和可靠性目标背后的基本原理是，尽管核电在这些领域的记录良好，但仍需要增强公众信心。目的是采用先进的风险评估方法，纳入“被动的”或“固有的”安全性能，把安全特性构建到第四代核电厂中。同样地，为满足防扩散和实物保护的目，要在反应堆和燃料循环中做特别设计，有效防止核材料和设施的滥用，保护其免遭盗窃和恐怖分子的侵害。

第四代核电国际论坛的目标是指导选择六大系统，以作进一步的合作研发（框4）。也确定了一些跨部门问题（包括先进燃料循环），需要进行横向协作。在第四代核电国际论坛框架内，参与相关研发工作的国家正在就每种选定的技术建立系统安排。具体研发领域的更详细的项目安排也正在商定中。

框3 第四代核能系统目标

第四代核能系统

可持续性

- 提供满足洁净空气目标的可持续能源发电，促进核燃料的长期可用性和燃料的有效利用，为全球能源生产做出贡献。
- 尽量减少并妥善处置好核废料，显著减轻长期管理负担，从而促进公共健康以及环保。

经济效益

- 与其他能源来源相比，有一个明显的生命周期成本优势
- 有媲美其他能源项目的财务风险水平

安全性与可靠性

- 运行非常安全可靠
- 极低的反应堆堆芯损坏可能性以及损坏程度
- 无需场外应急响应

防扩散以及实物保护

- 可以保证的是，对于转移或盗取可用于武器的材料来说，第四代系统是一条乏善可陈的、最不可取的途径，并且能够提供更多的实物保护，打击恐怖主义行为。

资料来源：第四代核电国际论坛，2002。

这六大系统包括技术上完全不同的堆型。然而，一切都可能与第四代核电国际论坛目标相符，每一个在面对具体研发挑战时都能提供很多有利因素。六大系统技术发展现状各不相同（第四代核电国际论坛，2009），一些概念（主要是钠冷快堆和甚高温反应堆）已经成为过去重大研发与示范计划的课题。此外，迄今为止，一些概念已经比其他概念吸引了更多来自第四代核电国际论坛成员的承诺。

追求一系列技术方案的目的是让最有前途的系统在一段时间之后脱颖而出。总体目标是到2030年时至少对六大系统中的一部分系统进行示范，以便首批第四代系统将在2040年之前用于商业部署。然而，迄今为止，第四代核电国际论坛框架合作范围并没有延伸到示范阶段。预计各国政府，参与国的研究机构和合作伙伴将在那个阶段采取单独的计划，通过国家项目或国际项目实现。

示范甚高温反应堆（VHTR）技术的计划是最先进的，尽管温度低于最终设想的。这种设计特别适合热应用，将在以下“非电应用”部分讨论。其他技术中，预计将对钠冷快堆技术（SFR）首先进行示范。过去已在几个国家建立了钠冷快堆原型，在俄罗斯和日本有大型运作的钠冷快堆。2006年，法国承诺建设第四代钠冷快堆示范堆，即ASTRID，将于21世纪20年代早期投入运行。日本的目标是到2025年完成第四代钠冷快堆示范堆。

可持续核能技术平台（SNETP）发起于2007年，是一项与欧盟战略能源技术计划相关的欧洲倡议。它包括欧洲各地的科研院所、工业界、学术界和其他利益相关者。可持续核能技术平台的目标包括第四代核能系统示范堆以及非电应用核能利用。尤其是，可持续核能技术平台已经建立了欧洲可持续核工业倡议，该倡议的目标是在未来10-15年设计和建设两个第四代快速反应示范堆（一个钠冷快堆，另外一个为气冷快堆或铅冷快堆）。

框4 第四代核电国际论坛遴选的第四代核能系统概念

钠冷快速反应堆 (SFR)

已在少数几个国家建成并运作了几个钠冷快堆原型,使其成为已建成的最好的第四代技术之一。钠冷快堆的主要特点是快中子谱、液钠冷却剂和封闭式燃料循环。全尺寸设计(达1500兆瓦)混合使用铀钚氧化物燃料,采用集中回收设施。100兆瓦范围内的小型设计,使用金属燃料和同时考虑把回收设施置于同一地点,也正在考虑当中。钠冷快堆具有出口温度(550°C)相对较低,限制了他们对非电力应用的使用。降低资本成本、提高被动安全以及发展先进燃料后处理技术是重要的研发目标。

甚高温反应堆 (VHTR)

甚高温反应堆概念的主要吸引力是它能够产生较高的温度(高达1000°C),这种温度正是制氢和一些工艺热应用所需的。然而,甚高温反应堆不允许使用封闭式燃料循环。参考设计包括约250兆瓦的电力,或600兆瓦的热,采用氦冷却剂,石墨慢化热中子谱。燃料将以涂覆颗粒的形式,根据采用的堆芯设计,或成块状或成卵石状。甚高温反应堆设计基于建于美国和德国的原型高温气冷反应堆,大部分研发工作已经完成。剩余的挑战包括:开发改良耐高温材料以及燃料设计和制造。

超临界水冷堆 (SCWR)

在第四代设计中,超临界水冷堆是与现有轻水反应堆技术最密切相关的。超临界水冷堆将以更高的温度和压力,运行于水的热动力临界点之上,同时,可以简化设计,大大提高热效率。参考设计容量高达1500兆瓦,使用铀或混合氧化物燃料,出口温度高达625°C。超临界水冷堆有一张热中子谱或快中子谱,后者将使用基于集中燃料设施的封闭式燃料循环。主要的研发挑战包括攻克与安全有关的堆芯设计问题,开发耐腐蚀材料。

气冷快速反应堆 (GFR)

气冷快速反应堆系统参考设计包括1200兆瓦的氦冷却反应堆,这个反应堆具有快中子谱和含现场乏燃料处理和再制造工厂的封闭式燃料循环。它具有高热效的直接循环氦气透平,以用于发电。高出口温度(850°C)可适用于制氢或工艺热。重点研发难题在于开发新燃料(如陶瓷包覆燃料或燃料颗粒)和材料,以及堆芯设计和氦气透平。

铅冷快速反应堆 (LFR)

铅冷快速反应堆系统有一个快速频谱液态金属冷却反应堆和一个封闭的燃料循环。熔化的铅是一种相对惰性的冷却剂,提供了安全方面的好处且丰富。被调查的最新设计包括小型(20兆瓦)和中型(600兆瓦)设计。前者将是一个工厂预制电厂,拥有很长的燃料补充间隔(15-20年)。最初,铅冷快速反应堆将被开发用于生产电力,但其高温设计将可用来制氢。主要的研发需求是燃料、材料以及防腐控制。

熔盐反应堆 (MSR)

在熔盐反应堆中,燃料材料溶解在循环的熔融氟化盐冷却剂中。液体燃料避免了燃料制造的需要,并允许对燃料混合物连续调整。目前的概念是1000兆瓦的带有封闭式燃料循环的快速中子反应堆。这可用于用丰富的钍进行增殖,或者用于燃烧钚以及其他锕类元素。目前正在研究一种使用液态氟化盐冷却剂的先进高温反应堆。主要的研发难题是熔盐化学性能、处理、耐腐蚀,以及材料和燃料循环。

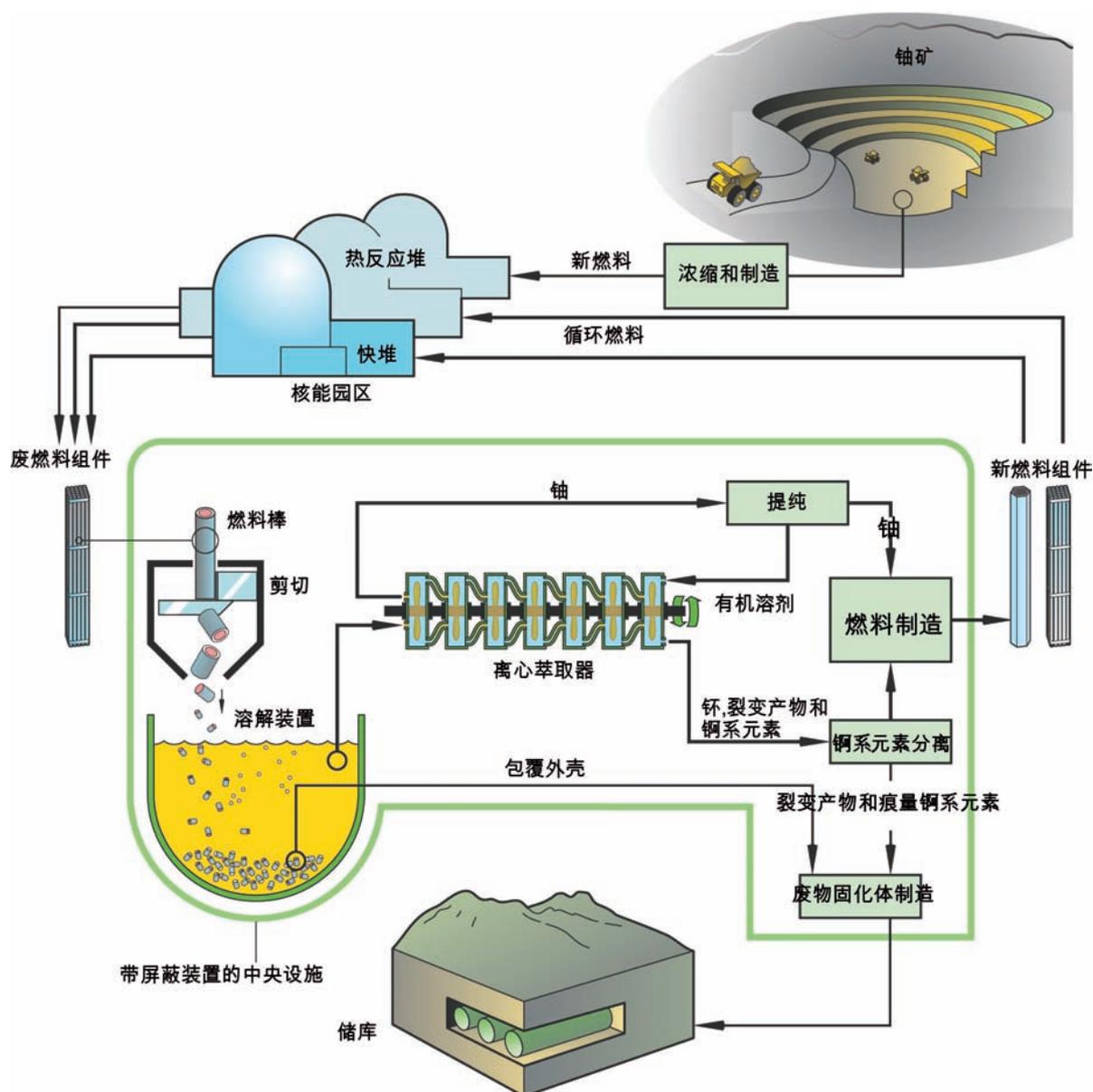
资料来源:第四代核电国际论坛,2002;第四代核电国际论坛,2009。

先进燃料循环

封闭式燃料循环涉及包含在大多数第四代概念中的乏燃料后处理和裂变材料及增殖性材料的循环利用，有希望把铀资源的寿命延长至几千年(表4)。他们还可以减少铀矿开采的必

要性和每度电产生的放射性废料数量。更先进的循环还可以通过减少长期活性从而产生最少的高放废料储存在地质处置库，以便进行物管理。

图8 闭合燃料循环概念，包括快堆和先进的水法后处理技术



资料来源：第四代核电国际论坛，2002。

要点：闭合燃料循环有可能把铀资源延续数千年。

正如路线图此前所述，有些国家已经部署乏燃料后处理技术和在新燃料中循环利用乏燃料中所含的铀和钚的商业规模运行。然而，第四代系统内正在开发的更先进的后处理技术可以在经济性、防扩散性以及废物最少化等方面产生巨大优势。尤其是这类技术可以避免钚的分离从而缓解扩散问题。

有几条技术线路开发先进的后处理/回收技术，但是目前正在研究两条主要的研发与示范路线。第一条是基于当前水法工艺的进一步开发，涉及酸性环境中乏燃料溶解和可回收组件及废物的化学分离。先进的水法后处理技术首先分离出大量的铀，然后一起分离出剩下的铀以及钚和其他锕系元素（图8）。由此产生的铀钚混合物将被直接用于制造混合氧化物燃料。由于这种先进水法回收技术是部分基于现有技术 and 经验，因此可以准备与首批第四代反应堆一道示范。

第二条主要的研发与示范路线是乏燃料的“高温冶金处理”，涉及高温非水技术。金属形式的乏燃料在熔融盐或液态金属中溶解。这种技术具有很多潜在优势，包括在小规模反应堆场址进行回收的能力，避免需要大型中心后处理厂。然而，它还处于发展早期，某些步骤才刚刚在实验室完成。预计全面示范将于2030年左右实现。

减少最终处置库高放废料的数量取决于“燃烧”（即通过核反应消耗）重型长寿命同位素（次锕系元素或超铀）先进循环能力，这种同位素是在反应堆辐射时在核燃料中形成的。短期来看，尽管高度活跃但寿命极短的裂变产物在乏燃料活动中居主导地位，次锕系元素以及少数长寿命裂变产物在处置库相关的更长时间尺度上占据主导地位。因此，燃烧次锕系元素能显著降低高放废料的长寿命组成成分。

减少大量长寿命废料数量的另一个选择是“分离与嬗变”（P&T），在分离与嬗变系统中，再循环燃料中的铀钚可以化学分离出次锕系元素。然后，次锕系元素经历“嬗变”，同时经受专用反应堆或亚临界加速器驱动系统（ADS）的辐射。这会产生核反应，把次锕系元素变成较轻元素的短寿命同位素。ADS嬗变的首次示范将在比利时规划中的多功能高科技应用混合型研究用核反应堆（MYRRHA）设施中进行，这个反应堆设施计划于2023年开始运行。

有关先进核能系统的其他倡议

支持先进核技术开发的另外一个重要的国际计划就是创新核反应堆和燃料循环国际项目（INPRO），这个项目由国际原子能机构组织。国际原子能机构有30个成员国，包括核技术拥有者和使用者。此项目的目的是促进国际社会和各国支持核反应堆、燃料循环以及制度方案等方面的创新。尤其是，INPRO已经定义了一套评估创新型核系统可持续性的原则和要求，以指导成员国开发工作。

全球核能合作伙伴计划（GNEP）最初于2006年由美国发起，是各国寻求推广核能和平利用的合作框架，尤其是通过鼓励开发和推广先进反应堆和燃料循环利用核能。目前，全球核能合作伙伴计划拥有25个全面合作国家以及超过30个具有观察员身份的国家。全球核能合作伙伴计划重点关注降低敏感材料和技术扩散风险的技术方法，同时确保核燃料的安全供应。将在现有及新的双边协议下以及通过第四代核电国际论坛和INPRO框架开展开发工作。

大部分国家都在上述一个或多个合作计划背景下开展先进核系统研发与示范工作。印度正

在单独加紧进行钠快速反应堆示范，目前原型正在建设中。然而，这并不被认为是第四代技术。在未来10-20年将上马一大批较大的钠冷快堆项目。

此外，印度是目前唯一开发钍燃料循环潜力的国家，计划于2020年左右建立一个示范工厂，2050年前建立一个全面原型。钍在地壳中的含量被认为比铀更加丰富，天然钍（由同位素Th-232组成）可以在反应堆中被辐射产生裂变同位素U-233。U-233可以在后处理厂提取并用来制造新燃料。然而，钍燃料循环迄今为止还没有大规模全面示范过，还仍然有很多重要的技术挑战，尤其是钍燃料后处理技术。

小型模块化反应堆发展现状与潜力

小型模块化反应堆（SMR）的发电容量从几十到几百兆瓦不等，一些国家往往通过政府以及行业间的合作开发其设计。这些国家包括阿根廷、中国、日本、韩国、俄罗斯、南非以及美国。小型模块化反应堆设计包含了一系列技术，一些技术是由第四代核电国际论坛选定的六大第四代系统的变体，而另外一些是基于已确定的轻水堆技术。

这些反应堆可以在没有强大电网系统的偏远地区作为单台或双重机组进行部署，或者提供更大型电网中多机组电厂的小容量增量。其特点是设计简化，主要是工厂制造，可以降低连续生产的成本。相比于大型核电机组，它们更加低廉的资本成本以及更快速的施工将使得融资变得更加容易。其他优势在防扩散领域，因为有些设计是不需要现场添加燃料的，而另外一些仅仅需要在多年后添加燃料。有些可以烧回收材料，与先进燃料循环共同使用。

基于轻水堆技术的小型模块化反应堆有众多概念。核工业公司正在推进一些这样的

设计，包括法国阿海珐集团、美国巴威公司、通用原子公司、美国NuScale公司以及西屋电气集团。阿根廷、中国、日本、韩国以及俄罗斯的国家研究所正在开发其他技术。俄罗斯正在建设两台供应电力和热能的小型机组，以现有破冰船推进堆为基础。这些将被驳船部署到勘察加半岛偏远的沿岸定居点，目前正在进行初步的许可活动。如果资金到位，示范工厂可能在2020年前投入运行。然而，现在还没有确定具体日期。

有几种小型模块化反应堆设计是高温气冷反应堆（HTR）。第四代甚高温气冷反应堆概念是这种技术在更高温度下的延伸。高温气冷反应堆和甚高温气冷反应堆适用于供热或热电联产应用，将在以下部分作进一步讨论。

还有一些其他先进小型模块化反应堆设计概念，包括液态金属冷却快堆。这些通常是处于发展初期，有一些是第四代核电国际论坛合作研发工作的课题。发展最好的设计之一是日本东芝的4S设计，这是一个钠冷“核电池”系统，能在不添加燃料的情况下运行30年。已提议第一个此类电厂将为阿拉斯加的偏远定居点提供10兆瓦的电力，目前已经开始最初的许可程序。一些国家的商业机构和研究组织已经提出了其他的先进小型模块化反应堆概念，一些国家旨在着手在未来几年中开始许可活动。然而，目前还没有宣布建设示范工厂的确切计划。

如果单一场址的多台模块化机组要变成建设一两台大型机组的一个具有竞争力的替代方案，那么小型模块化反应堆最终将成为核能力的一个重要组成部分。小型模块化反应堆可以在不适合大型机组的地方使用核能，一些设计能延长其非电力应用使用。然而，小型模块化反应堆设计是否能成功商业

化，其产生的度电总体成本是否比更大型核电站和其他发电方案更有竞争力，仍有待观察。为本路线图之目的，假定到2050年大部分核能力将由较大规模的核电站提供。

核能作为供热和交通的替代方案

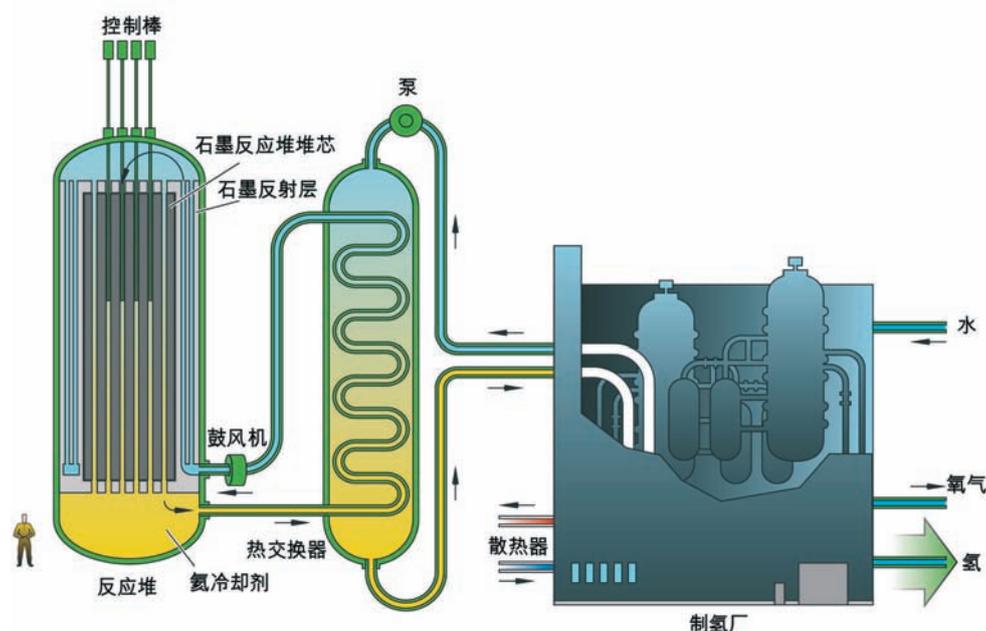
由于核电站通常连续运行生产基荷电力，它们将作为一种主要非峰值电力低碳来源不断为交通部门做出贡献，主要是充电电动汽车以及插电式混合动力汽车，因为这种汽车的使用在未来几十年中将不断增长。这种汽车和其他电动交通方案的更广泛应用以及由此产生的电力需求的增加已纳入蓝图情景，这也是此路线图的根据所在。

尽管蓝图情景只考虑将核能用于电力生产，但到2050年左右核能也有很大的潜力进入非电能源领域。一些可能的应用包括工业过程供热（包括石化工业）、区域供暖、海水淡化以及制氢所需的电和热。

也有一些核电站产生的热用于上述目的的例子，但核能在非电能源市场的潜力迄今为止仍没有大规模挖掘。如果要进行改变，核能系统将需要适应这些市场的要求。尤其是高温气冷反应堆的商业化可以延长核能的热应用。高温气冷反应堆小型样机已在中国和日本投入运行，德国和美国已在多年前建设了较大的样机。

中国正在建设一对高温气冷反应堆示范工厂，2013年开始运行，将提供热量外加200兆瓦电力。在美国，下一代核电站（NGNP）项目旨在示范利用高温气冷反应堆技术制氢的可行性，下一代核电站项目在资金到位的情况下可在2025年前投入运行。日本、韩国和欧洲也在致力于高温气冷反应堆技术的开发。然而，由于缺乏资金支持，南非已经搁置了模块化高温气冷反应堆示范工厂的建设计划。

图9 用于制氢的第四代核高温反应堆简图



资料来源：第四代核电国际论坛，2002。

要点：一些第四代设计方案会提供制氢及其他热应用所需的高温。

由第四代核电国际论坛选定的要进一步发展的第四代设计中，甚高温气冷反应堆是专门用于高温热应用的（图9）。这是高温气冷反应堆设计为适应更高温度的发展。达到这些更高的温度将要求进一步研发，尤其是耐热材料。一些其他的第四代设计也能比现有反应堆产生更高的温度，扩大非电应用的可能范围。

满足小规模非电应用的需求，比如说分布式制氢或在人口稀少地区的海水淡化，将最终在上述小型模块化反应堆中起到至关重要的作用。

政策、财政和社会方面：行动和里程碑

强大政策支持的重要性

对于实行核计划的国家，本路线图建议：

- 政府应该为核计划提供明确而持续的政治支持，作为国家战略的一部分，以达到能源和环保政策目标。
- 政府应与核工业和电力部门通力合作，统筹协调，克服核能发展中的困难，尤其是那些初次使用核能的国家或者在今后很长一段时间没有新核能的国家。

明确稳定的政府政策支持是核计划成功的基本前提。通常来说，这是国家满足能源政策和环保目标的总体长期战略的一部分，目标包括实现能源供应安全和控制温室气体排放。制定了核能开发长期政策的国家有法国、日本、韩国，最近中国也制定了这样的政策。

当电力供应行业是在私营部门时，同样需要制定强有力的政策支持。没有投资，甚至政府若表示中立或未表明立场，也有可能吓退投资者。

已经有过几个案例，由于核电政策变化，核电项目被推迟或取消，或正在运行中的核电站被迫提前关闭。假如在核电站施工期间举行国家选举，以及核电站运行期间遭遇政府数度换届变更，很有可能不仅需要现任政府的政策支持，还需要有广泛政治支持的长期确定战略。制定这样一

个战略将涉及公共磋商和辩论，以达成对未来道路的全民共识。

启动新核计划将要求政府发挥尤其积极的作用。在一些国家，电力供应行业全部或主要由国家控制，政府将直接决定核计划进程。在另外一些国家，政府需要与所涉及的各私营和公共部门紧密合作以确保项目能顺利进行。很显然，需要建立必要的法律和监管框架（在下文中讨论），但往往需要政府发挥更广泛的作用。

建立法律和监管框架

本路线图建议：

- 在那些具有现有核计划的国家，政府应该确保与核能有关的立法和监管体系在保护公众和环境与提供投资决策所要求的确定性和时间表之间找到适当的平衡。
- 在那些启动新核计划的国家，政府应遵照建立必要核能立法机构和监管机构的国际最佳做法，确保它们有效力、有效率。
- 各国政府应通过尽可能统一监管设计要求，在全球范围内促进核电站的标准化设计建设。

任何一个打算启动核计划的国家都需要建立有关核能事务的适当法律框架。这包括建立核活动和设施监管、许可和监控体系，由独立的具有充足资源的机构监管。其他必要的法律规定包括放射性废料和退役的责任界定，建立核

责任制(对许多国家来说,包括遵守国际公约)以及实物保护和核材料核算体系。许多国家有具体的“核能法”,适用于核能利用的各个方面。

此外,环境和地方规划法规也与核项目相关,且必须有效实施。对于具有联邦制的国家而言,州政府与联邦政府之间须明确责任划分以避免重复的监管障碍。

对于已经有核计划且已建立核能法律和监管体系的国家来说,打算进一步推广核能的主要问题就是现有体系的效力和效率。在一些情况下,许可体系以及相关程序被证明是核电站建设不必要的延误的主要原因,必须进行改革,以避免这种情况。

比如说,美国在许可程序方面实施了重要改革,建设许可和运行许可一步到位。彼此之间也能独立预先许可核电站设计和可能的场址。新体系下的第一份申请并已提请核能监管委员会审核。其他成熟核国家也在一定程度上改革了许可制度,以试图减少延误的可能。

除了提高国家监管框架的效力之外,国际合作可以促进新反应堆设计的许可。这是促进全世界核能推广的一个重要因素,已经确立的标准化设计可以在不同国家进行复制并尽量减少设计变更。

多国设计评估项目(MDEP)是核监管方面的一个国际合作范例。它是由十个国家的核能监管主管部门发起倡议,由核能署支持,旨在对委以审查核新电站设计重任的主管部门的资源和知识进行更有效的利用(多国设计评估项目,2009)。多国设计评估项目目前努力的主要目标是建立参考监管范例。到目前为止,多国设计评估项目并没有要在成员国内建立任何共同的法规或具有约束力的承诺。

核监管惯例和法规的重大融合将简化标准化反应堆设计的监管审查,便利进口电站的国家许可进程。这种协调性有可能需要政府间协议和较

强的组织安排。最终目的是让国家监管机构接受由其他监管机构进行的设计审查结论,不必自己重复工作。这是一个雄心勃勃的计划,完全实现可能需要很多年的时间。但是,如果在21世纪20年代左右能够在很大程度上达成统一,它将极大地促进蓝图情景中预想的核能快速扩张。

规划新的核计划但没有现成核监管和法律基础体系的国家有能力学习国际最佳做法。考虑到现有核国家在核监管和立法方面采取了不同的方案,新进入的国家有时会采用他们打算从其获取核技术的国家的主要原则。由于来源国通常已经给参考工厂发放了许可,这可以帮助简化许可流程,所以类似的监管方法可以避免设计上的变化。然而,在缺乏更广泛的国际协调的情况下,以后替换供应商将会更困难。

国际公认的核安全规范和标准对于传播最佳做法也很重要。国际原子能机构促进核电站、燃料循环和放射性废物的全球安全制度由几个国际公约和行为准则来支撑,包括《核安全公约》,这个公约建立了各参与国同意支持的基准。欧盟的《核安全指令》将此公约纳入了欧盟法律范畴。

为新建核电厂提供融资

本路线图建议：

- 各国政府应确保电力市场的结构，并在适当情况下，确保碳市场支持核电站所需要的大规模长期投资，从而为获得充足投资回报注入足够信心。
- 各国政府应通过旨在减少 CO₂ 排放的政策和措施，比如说碳交易机制，碳排放税或者要求电力公司使用低碳电力，鼓励低碳电力投资，包括投资新的核电产能。
- 考虑到核电站投资金额较大，投资回收期较长，各国政府应考虑为私营部门的新核电站投资提供某些形式的支持或担保，否则的话，其风险回报率会阻止潜在的投资者。
- 全球金融机构应加强评估核电站投资风险能力，制定合适的融资结构，为核投资提供适当的金融条款。

在国际能源署《能源技术展望》模型假设条件的基础上，按照蓝图情景中预想的核能扩张，预计未来四十年全球范围内所需的总投资为4万亿美元左右（表6）。这占到蓝图情景中预计的同期发电投资21万亿美元的约19%。

国际能源署和核能署最近发起了一项重大研究，研究了17个经合组织国家和4个非经合组织国家的约200个规划中的即将于2015年投入运行的核电站的发电成本，研究发现，就均化生命周期成本而言，通常来说核电力比其他发电项更具竞争力（国际能源署/核能署，2010）。尽管如此，预计在很多情况下，新核电站的建

设融资仍是一个挑战，尤其是在电力市场自由化的背景下（核能署，2009）。

潜在投资者认为影响核项目财务风险的几个特殊因素如下：

- 核电站高昂的资本成本以及技术复杂性，这将在建设及运行时产生风险。
- 回收投资或者偿还贷款需要相对较长的时期，这将会增加来自电力和碳市场的不确定性风险。
- 核项目通常具有争议性，这将增加额外的政治及监管风险。

核电站以及其他大型基建项目成功融资的关键是首先要尽量减少财务风险，其次，使用适当的所有权以及承包模式设计项目结构，从而使涉及各方共同承担剩余风险。政府在核能发展中至少应在这些步骤的起始阶段发挥重要作用。

简化监管制度，确保其有效且高效的运转，将在一定程度上有助于降低财务风险。其他只有政府可以采取的步骤包括建立废物管理和处置以及核电站最后退役的体制及财务安排。此外，政府将需要确保电力市场的安排能够使投资者对长期价格水平有信心，以便能获取充足的投资回报。一些市场中受管制的电力价格将有助于树立这样的信心，但是自由化市场的价格风险通常来说较大。一些鼓励投资低碳能源的刺激政策，比如说碳交易、碳税或长期最低价格合同，也将鼓励核能投资。

表6 国际能源署《能源技术展望》模型对蓝图情景中核能投资的估算（按照2008年固定美元计算）

地区/国家	估计所要求的投资额（10亿美元）			
	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
美国和加拿大	75	342	243	224
经合组织欧洲	60	333	105	88
经合组织太平洋地区	68	296	153	97
中国	57	193	295	350
印度	9	57	91	230
拉丁美洲	11	30	36	39
其他亚洲发展中经济体	5	39	24	39
过渡经济体	55	156	80	39
非洲和中东	2	23	18	12
世界	342	1469	1045	1118

资料来源：国际能源署，2010。

核电站高昂的投资成本意味着其整体经济性以及融资可行性在很大程度上取决于资本成本（本质上来讲，贷款利率和/或投资回报率）。一旦配套政策及措施落实到位，一些国家有规模庞大且资本运行良好的电力公司有能力为核建设提供融资，至少可以融资建设有限数量的核电站。其中有些是国有独资或部分国有，另外一些则是纵向一体化（使他们能够直接获得电力客户），这样将有助于降低资本成本。电力公司在一定程度上能与核电站供应商、其他承包商以及其他投资者（包括银行与投资资金）分担风险。然而，至少在目前，后者预计对核投资的胃口不大。

在电力公司缺乏足够的资本和/或电力市场更具竞争力的情况下，一些国家可能考虑直接支持核能投资，通过降低资本成本推进新核电建设。这方面的一个例子是美国政府采纳的贷款担保计划，该计划在未来几年中提供超过500亿美元担保支持新核电建设。其他支持核电融资的措施包括政府出口信贷、保障最低碳价格，或长期购电合同。在一些国家，多边开发银行和机构的支持可发挥作用。

在大约2020年以后，倘若正在兴建的首批第三代核电站的建设和早期运行以及紧随其后的项目是成功的，私营部门提供核融资可能会变得更容易。事实上，如果要想实现蓝图情景中设想的核投资规模，这种发展是必要的。同时，银行和其他金融机构将需要通过研究早期项目以及在未来十年内的有限参与，发展专业知识背景，正确评估核融资的风险。

长远来说，随着所有低碳能源技术日渐成熟以及越来越少依赖政府针对性的支持政策，为它们创造公平竞争机会将是可取的。这将确保减少CO₂排放最经济有效的方案在每个国家和地区能够最大程度的采纳。

民间参与

本路线图建议：

- 各国政府应与利益相关者和公众进行沟通，解释核能在国家能源战略中的作用，通过鼓励公众参与决策进程寻求公众支持。

引进核能或扩大其作用要求来自民间社会各利益相关者基于对其风险和利益进行合理评估进行支持，包括大众的支持。尽管对能源供应安全以及近年来的全球气候变化威胁的关注可以增加公众对核能好处的认可，但有几项因素会继续削弱许多国家公共支持基础。这些因素包括对核安全、放射性废物管理与储存、核武器潜在扩散的关注。民间社会通常不愿意接受核能，主要是因为认为核能的缺点大于其好处。

建立与所有利益相关者的沟通渠道是促进更好了解核能风险和好处以及核能与其他能源方案可发挥作用的一个必要步骤。然而，除了提供信息，应在国家满足能源与环境政策目标总体战略的背景下，让民间社会参与决策过程，以决定核能计划的未来。促进公众参与塑造核能未来对于建立信任与确保广泛支持是不可避免的。

除了核电站本身，相关燃料循环设施选址也可以导致公众关注与反对。尤其是，放射性废物储存及处置设施的选址通常极具争议性。在一些国家，对这些设施的提议也不得不因为公众反对而撤销。

由于从这些挫折中吸取了教训，多数国家的放射性废物管理组织目前正在更加努力的与当地可能受影响的社区接洽。在一些国家，尤其是在芬兰和瑞典，这个方法已经帮助在放射性废物处置计划实施方面取得巨大进步。其他

国家在放射性废物处置方面寻求进展时，将需要采取类似的方法。

规划核能方案的国家的能力建设

本路线图建议：

- 国际社会应继续加强规划新的核计划的国家在体制建设方面的合作。
- 现在没有发展核工业的国家，政府应支持国内产业培养能力，提高专业知识，以分包商和零部件供应商的身份有效参与国内外核电站项目。

如果核能要在全球供应结构中发挥更重要的作用，核电计划将需要在不断增长的新型工业化国家实施，多数的能源和电力需求将发生在这些国家。这些国家的核电站建设和运行将要求技术转让以及能力建设。

经合组织国家以及其他有核计划的国家在核领域的技术合作以及援助政策在这方面非常重要。着手核计划的国家，首批核电机组建成运行前确保必要的监管框架以及基本法律制度有效实施是非常重要的。新核国家也需要在所有参与者开展“安全文化”，包括承包商、分包商及经营者，以及监管机构。显然，那些向新核国家出口核电技术的国家有责任帮助发展必要的法律制度和培训专业知识。

更广泛的国际合作在这里也将发挥重要作用，包括通过政府间机构开展的合作。尤其是国际原子能机构开发了一系列准则以协助那些想要着手核电计划的成员国，制定了一套国家基础设施发展的里程碑（国际原子能机构，2007）。目前，该机构正在与超过30个正在考虑未来核计划的成员国通力合作。

对于启动核计划的国家来说，提高国内产业和研究机构能力将是一个重要的考量因素，因此，国产化率要求通常是竞价过程以及与核供应商（可能与当地合作伙伴形成产业联盟）进行合同谈判的一部分。目标范围可以从随着时间的推移建立完整规模的国内核工业到作为建设服务和零部件分包商参与当地工程。一旦核电站投入运营，当地企业也可以提供支持和维修服务。除了降低核电站进口成本，国产化可以刺激高科技行业发展。随着这些工业以后成为出口行业，它也有助于扩大全球供应链。

不扩散、实物保护和核燃料供应的安全性

本路线图建议：

- 国际社会应在必要的时候保持和加强在核不扩散和核法、核设施和材料的实物保护以及核燃料供应安全方面的合

一些核技术和核材料有可能遭到非和平目的的滥用。1968年通过的《核不扩散条约》（NPT）是国际社会试图解决这种威胁的基石。此外，由46个国家组成的非正式协会——核供应国集团发布了国家之间核设备、核材料以及核技术的转让准则。

绝大多数国家遵守核不扩散条约，此条约要求允许国际原子能机构检查其核设施。然而，许多国家尚未通过1997年提出的附加议定书，这份议定书赋予国际原子能机构加强检查核地点以及获取信息的权利。已经出现现有不扩散管制没有阻止敏感技术扩散的极少数情况，一些国家仍然游离在此范围以外，包括少数具有显著核活动的国家。特别是如果核能发挥越来越

重要的作用，并在更多的国家中广泛使用，就必须有适当的防扩散管制措施。

一些国家担心强硬的防扩散措施将限制他们发展核燃料循环设施的能力，特别是那些使用最敏感技术发展铀浓缩和乏燃料后处理技术的能力。如果他们广泛依靠核能，将限制其能源独立性。因此，目前工作的焦点在于努力加强那些正在利用或打算利用核能并拥有良好防扩散信誉的国家的核燃料供应安全，从而消除他们发展自己的浓缩和/或后处理国家设施的动机。

个别国家或国家集团已经提出一些旨在实现这一目标的国际项目和提议，并已提请国际原子能机构审核。这些提议包括诸如建立在国际原子能机构管控下的一个或多个核燃料银行（浓缩铀堆放点），或者建立多边核燃料循环设施。2010年3月签署了在俄罗斯境内建立第一家由国际原子能机构监控的燃料银行的协议。俄罗斯也正在促进将其浓缩场址之一做为一个多边燃料循环中心。然而，目前还不清楚这种倡议是否能被广泛接受并可以大规模实施。

实物保护以及核材料核算是每个核国家的首要责任。如上所述，在核活动开始之前，需要建立适当的法律和体制安排。然而，对于国际社会来说，恐怖活动已经是核材料安全的大患。需要加强国际间的合作，传递最佳做法并增强信心，建立所有核材料皆安全的信心。

路线图行动计划

本节总结了为实现《能源技术展望》蓝图情景设定的核能目标在此路线图中确认的行动。本节对这些行动进行了排序，显示了各利益相关者在实施时的主要责任，所给出的时间表为近似值，将因国家而异。尤其是，没有现

成核计划的国家将需要付出额外努力，进行能力建设和机构建设，这可能会需要更多的时间。应该指出的是，这些行动将仅仅适用于已经采取国家政策决定实施核计划的国家。

政府和其他公共机构牵头的行动

政策支持	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 为核能计划提供明确稳定的政治支持，作为国家实现能源和环境政策目标的战略的一部分。 	<p>几个主要国家实施；对于其他开展核计划的国家，到2015年。</p> <p>政府领导人，能源/环境部门。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 和利益相关者及公众进行沟通，解释核能在国家战略中的作用，寻求通过让公众参与决策过程获得公众支持。 	<p>随着核计划的启动或重启，持续进行。</p> <p>政治领导人，能源部门。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 与核工业与电力行业通力合作，确保克服核发展阻碍的协调方法，尤其是在核能首次使用或在很长一段时间都没有新建核能力之后。 	<p>随着核计划的启动或重启，持续进行。</p> <p>能源/工业部门。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 鉴于核电厂需要大量投资且回报期长，考虑在风险-回报比率会阻碍潜在投资者的情况下为私营部门新建核电厂投资提供某种形式的政府支持或担保。 	<p>对于相关国家，到2015年。</p> <p>能源/财政部门。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 通过制定政策和采取措施比如说碳交易计划、碳税或者要求电力供应商使用低碳来源，鼓励低碳电力来源投资，包括新核能力。最终目的是鼓励通过技术中立方法以最节约成本的方式降低排放量。 	<p>对于实行核计划的国家，到2015-20。</p> <p>能源/环境部门，立法机构。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 制定政策和措施，确保具有充足的长期资金支持，用于放射性废料的管理和处置，以及用于核电厂退役，建立必要的法律和组织框架，制定放射性废料管理和处置计划并及时落实。 	<p>在许多具有核能的国家落实；对于其他追求核计划的国家，要在反应堆运行前，到2015-20。</p> <p>能源/环境部门，立法机构。</p>

法律和监管框架	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 在那些具有既有核计划的国家，应该确保与核能有关的立法和监管体系在保护公众和环境与提供投资决策所要求的确定性和时间表之间找到适当的平衡。在适用的情况下，应该延伸到铀矿开采和燃料循环设施。 	<p>在一些国家引入改革；其他可能需要到2015年时跟上。</p> <p>能源/法律部门，立法机构，核能监管机构。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 在那些启动新核计划的国家，政府应遵照建立必要核能立法机构和监管机构的国际最佳做法，确保它们有效力、有效率。 	<p>对于相关国家，到2015-20。</p> <p>能源/法律部门，立法机构，核能监管机构。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 确保电力市场的结构，并在适当的情况下，确保碳市场支持核电站所需要的大规模长期投资，从而为获得的收入能够提供充足投资回报注入足够信心。 	<p>随着核计划启动，到2015-20。</p> <p>能源/法律部门，立法机构，市场监管机构。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 在可能的程度上，通过协调监管设计要求，促进核电站标准化设计建设。尤其是，引进新的核计划的国家应避免强制实施独特的要求。 	<p>从2020年开始应建立共同要求。</p> <p>能源/法律部门，立法机构，核能监管机构。</p>
产业发展、教育和培训	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 对于那些启动或重启核计划的国家，确保在政府单位、电力公司、工业部门以及监管机构有合适的能胜任的熟练人力资源，以满足核计划的预期需求。有主要核工业的国家也将需要足够的人力资源以支持核出口。 	<p>到2015年实施行动，确保在2020年之前显著增长。</p> <p>教育/就业部门，大学。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 没有现成核工业的国家，需要支持国内产业发展能力，提高专业能力，以分包商和零部件供应商身份有效参与国内外核电站项目。由于核建设供应链的全球性，几乎所有国家都需要国外供应商的参与。 	<p>对于相关国家，到2015-20。</p> <p>能源/工业部门。</p>

技术发展推广	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 在必要的情况下，制定和实施各种类型放射性废物的长期管理和处置方案，尤其是乏燃料和高放废物地质处置库的建设和运行方案。这包含了为要求的研发与示范活动提供支持。 	<p>首批处置库到2020年投入运行，2030年前，其他主要核国家会跟进处置库</p> <p>能源/环境部门，放射性废物管理机构，废物发电部门。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 继续支持先进核技术（反应堆和燃料循环）的研发与示范，获取抓住其长期潜力，以改进的经济性、增强的安全性和可靠性、加强的防扩散能力和实物保护提供可持续能源。 	<p>到2030年示范最具前景的下一代核能系统，2040年后全面商业化。</p> <p>能源/研究部门，核研究所。</p>

核工业和供电行业牵头的行动

管理现有核反应堆	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 在继续安全有效运行现有核电站的同时，投资设备升级并在可行时准备延长运行周期。为此，确保将吸取的教训广泛在核电站运营商中传播。 	<p>持续进行，到2015年需要巨额投资。</p> <p>电力公司，核供应商。</p>
到2020年推广新核能	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 通过在全球少数国家建立参考电站全面建立最新核电站设计，改进基本设计和任何区域变体，并建立全球供应链与能力。 	<p>到2015年目前正在建设的一些新设计将投入运行；其他设计将在未来几年中跟进。</p> <p>核供应商，供应链产业，电力公司。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 继续示范这些新设计能以预期成本及时可靠地建成，通过尽可能使用标准化设计、改进建设进程并进一步加强供应链，不断努力缩短建设周期，控制成本。 	<p>到2020年示范能在控制成本的基础上及时建成标准化设计。</p> <p>核供应商，供应链产业，电力公司。</p>
2020年后快速推广能力建设	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 在全球范围核能以及相关工程行业投资建设行业能力以提高建设核电站的全球能力，维持必要的高质量和安全标准的同时扩大供应链。熟练的人力资源也需要有相应的增长。 	<p>如果到2020年全球产能与目前相比翻番，那么到2015年将需要巨额投资。</p> <p>核供应商，供应链行业，银行以及其他投资者。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 扩大铀生产以及核燃料循环设施能力以与核能发电能力保持一致，包括在可用的情况下推广更高效的先进技术。 	<p>到2015-20年及以后，需要大幅扩大产能。</p> <p>核燃料供应商，银行及其他投资者。</p>

技术开发与推广	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 在通过尽可能复制标准设计获取利益时，核工业应该继续反应堆和核燃料设计的演变发展，以从建设参考电站所积累的经验以及从技术进步中获益，从而确保核能保持竞争力。 	<p>从2015年起将可以获得参考工厂的教训，2020年之前标准化设计不太可能发生大的变化。</p> <p>核供应商，电力公司。</p>
<ul style="list-style-type: none"> 与核研究所合作，参与下一代核系统（反应堆和燃料循环）的开发，以确保选定示范的设计是最适合最终商业化的设计。 	<p>到2030年示范最具前景的系统，2040年后全面商业化。</p> <p>核供应商，电力公司。</p>

其他利益相关者牵头的行动

核电站融资	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 加强全球金融界在以下方面的能力：评估核电项目的投资风险；开发适当的融资结构；制定合适的核投资财务条款。参与为早期核建设项目提供融资将有助于提高金融行业在核能方面的专业能力。 	<p>到2020年通过参与核项目提高专业能力。2020年后提高私营部门融资的可获得性。</p> <p>银行与金融服务公司，出口信贷机构，多边发展银行/机构。</p>
国际合作	里程碑和行动者
<ul style="list-style-type: none"> 必要的时候在一些领域保持并加强国际合作，比如说有新核计划国家的制度建设，监管要求的协调，放射性废物的管理与处置，新型反应堆和燃料循环技术的开发，防扩散与核法，核设施和材料的实物保护，以及核燃料供应安全。 	<p>如果2020年以后核扩张有足够广泛的基础，那么在2015-2020年期间要应对重要问题。</p> <p>政府间核能与能源机构（特别是国际原子能机构以及经合组织核能署），国际非政府行业及政策组织。</p>

参考文献

- GIF, 2002 *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Generation IV International Forum (GIF), 2002. Available at www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm.
- GIF, 2009 *Proceedings of the GIF Symposium, Paris, 9-10 September 2009*. Generation IV International Forum (GIF), 2009. Available at www.gen-4.org/GIF/About/index.htm.
- IAEA PRIS *Power Reactor Information System database*. International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at www.iaea.org/programmes/a2/index.html.
- IAEA, 2007 *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2007.
- IEA, 2009 *World Energy Outlook*. International Energy Agency, Paris, 2009.
- IEA, 2010 *Energy Technology Perspectives*. International Energy Agency, Paris, 2010.
- IEA/NEA, 2010 *Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition*. International Energy Agency and OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2010.
- MDEP, 2009 *Multinational Design Evaluation Programme Annual Report 2009*. Available at www.nea.fr/mdep/.
- NEA, 2008 *Nuclear Energy Outlook*. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2008.
- NEA, 2009 *The Financing of Nuclear Power Plants*. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, 2009.
- NEA, 2010 *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*. OECD Nuclear Energy Agency (jointly with the International Atomic Energy Agency), Paris, 2010.
- WNA, 2009 *The Global Nuclear Fuel Market, Supply and Demand 2009-2030*. World Nuclear Association, London, 2009.



International
Energy Agency

Online bookshop

Buy IEA publications
online:

www.iea.org/books

PDF versions available
at 20% discount

Books published before January 2010
- except statistics publications -
are freely available in pdf

International Energy Agency • 9 rue de la Fédération • 75739 Paris Cedex 15, France

iea

Tel: +33 (0)1 40 57 66 90

E-mail:
books@iea.org

国际能源署

国际能源署是一个自治机构，创立于1974年11月，其使命有两重：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；就良好能源政策为成员国提供咨询。

国际能源署在28个发达经济体之间开展全面的能源合作计划，每个经济体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。

国际能源署的成员国包括：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国、美国。欧洲委员会也参与了国际能源署的工作。

核能署

经合组织核能署（NEA）成立于1958年2月1日，当时的名称是欧洲经济合作组织欧洲核能署。目前的名称是在1972年4月20日获得的，当时日本成为它的第一个非欧洲正式成员。如今的核能署成员包括28个经合组织成员国：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、葡萄牙、斯洛伐克共和国、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

经合组织是一个独特的论坛，在这里31个民主国家的政府携手应对全球化带来的经济、社会和环境挑战。经合组织还处在了解新发展和新问题并帮助政府对此做出应对的工作的前沿，这些新发展和新问题包括公司治理、信息经济和人口老龄化等方面的挑战。该组织提供的环境可以让政府比较政策经验，寻求解决共同问题的答案，发现良好做法，并努力协调国内和国际政策。

经合组织的成员国包括：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、智利、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、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。欧洲委员会也参与经合组织的工作。

经合组织出版部门广泛传播其在经济、社会和环境问题方面的统计数据收集结果和研究成果，以及其成员达成的公约、准则和标准。

照片提供：四国电力；核能研究所（封面，从上到下）

© Tomy Thompson，核能研究所；© Hannu Huovila，TVO（封底，从上到下）。

2010

2015

2020

2025

2030

