

仅供工作使用

理事会临时议程项目 6 (a)  
(GOV/2012/34)  
大会临时议程项目 16  
(GC(56)/1 和 Add.1)

## 2012 年国际核电状况与前景

### 总干事的报告

#### 概 要

- 大会 GC(55)/RES/12 号决议要求秘书处在 2012 年更新关于全面概述“国际核电状况与前景”的报告（2010 年印发的 GC(54)/INF/5 号文件）。本报告是对该决议所作的响应。



# 2012 年国际核电状况与前景

## 总干事的报告

### A. 自 2010 年以来的发展情况

1. 经过两年的小幅下降后，全球核电装机容量在 2010 年首次增加了 4 吉瓦（电），达到 375 吉瓦（电），随后在福岛第一核电站事故后下降到 2011 年的 368 吉瓦（电）。2010 年，有五座新反应堆并网，有一座永久退休。2011 年，有七座新反应堆并网，但有 13 座永久退休。在这 13 座退休的反应堆中，12 座是直接因为福岛第一核电站事故而退休。新反应堆开工建设数量在 2010 年连续第七年增加，达到 16 座，但在 2011 年降至四座。

2. 从全球看，福岛第一核电站事故预计将放缓但不会逆转核电的增长趋势。在原子能机构 2011 年更新的低值预测中，全球核电装机容量将从目前的 370 吉瓦（电）<sup>1</sup> 增长到 2030 年的 501 吉瓦（电），比 2010 年的预测降低了 8%。在更新的高值预测中，装机容量将增长到 2030 年的 746 吉瓦（电），比 2010 年的预测降低了 7%。

3. 在正在引进核电的国家中，对核电的兴趣依然高涨。在福岛第一核电站事故前曾坚定地表示打算着手发展核电计划的无核电国家中，有几个国家在事故后取消或修订了计划，其他国家则采取了“等等看”的态度，但大多数国家继续实施其计划。2011 年 9 月，一座核电厂在伊朗伊斯兰共和国投入运行。

4. 经济合作与发展组织核能机构和原子能机构联合编写的 2011 年版“红皮书”《铀资源、生产和需求》估计，低于每千克 130 美元的已确定常规铀资源总量为 530 万吨，比 2009 年版的估计总量少了 1.4%。按预测的 2012 年消耗率，530 万吨铀的使用期限为 78 年。

5. 2010 年 12 月，原子能机构理事会核准建立由 1.5 亿美元自愿捐款提供资金的原子能机构低浓铀银行。原子能机构接受了哈萨克斯坦提出的作为该银行东道国的提议。2011 年 2 月，俄罗斯联邦政府和原子能机构关于在俄罗斯联邦安加尔斯克建立低浓铀储备的协定生效。2011 年 3 月，理事会核准了英国提出的并且以欧洲联盟（欧盟）、俄罗斯联邦和美国作为共同提案国的“核燃料保证”建议。2011 年 8 月，“美国有保证的燃料供应”在美国推出。它拥有 230 吨丰度为 4.95%的低浓铀。

---

<sup>1</sup> 2012 年 6 月 30 日。

6. 在芬兰，作为乏燃料处置库前奏的昂加洛地下岩石表征设施的建造在 2010 年达到最终处置深度。核废物管理公司即泊西瓦公司打算在 2012 年底提交该处置库建造许可证申请，并于 2020 年开始进行最终处置。瑞典核燃料和废物管理公司在 2011 年 3 月提交了在福什马克建造一座乏燃料处置库的许可证申请，并估计将能够在 2025 年之前开始最终处置。欧盟理事会核准了“2011 年 7 月 19 日关于制订以负责任和安全的方式管理乏燃料和放射性废物的共同体框架的 2011/70/Euratom 号理事会指令”，该指令为所有欧盟成员国确定了统一标准，并要求它们制订国家计划和在 2015 年 8 月之前向欧洲委员会报告进展情况，此后则每三年报告一次进展情况。

7. 2011 年技术进步的一个反映是，65 兆瓦（热）（20 兆瓦（电））池式中国试验快堆 2011 年在中国并网。在阿根廷，2011 年开始进行 27 兆瓦（电）CAREM 原型厂场址的挖掘，CAREM 反应堆是一种所有一回路部件被置于反应堆压力容器内的小型压水堆。由于除其他外特别是全球金融危机后出现的资金拮据，南非开展球床模块式反应堆建造阶段的计划停止。该项目仍被置于“看护和维护计划”下，以保护所涉及的知识产权和资产。

## B. 核电的现状

### B.1. 核能利用

8. 2011 年，核能生产了全世界电力的 12.3%和全球所用一次能源总量的 5.1%。大部分电力生产继续以化石燃料作为燃料。

9. 核动力自 1954 年以来一直被用于生产电力向公众输送。从那时以来，已有 33 个国家运行核电厂。<sup>2</sup> 目前，共有 30 个国家运行着总计 435 座反应堆，总装机容量为 370 吉瓦（电）。<sup>3</sup> 还有 62 台总装机容量为 59.2 吉瓦（电）的机组正在建造中。<sup>4</sup> 2011 年期间，核电共生产了 25 170 亿度电。核工业现已拥有超过 14 700 堆-年的经验。

10. 如表 B-1 所示，核能对电力生产总量的贡献率在各地区之间差异很大。2011 年，核发电量的最高份额为西欧的 25.7%。最低份额为中东及南亚的 1.8%和东南亚及太平洋地区的 0%。全球而言，核电在电力生产中的份额已从 2002 年的 16%下降到 2011 年的 12.3%。

---

<sup>2</sup> 阿根廷、亚美尼亚、比利时、巴西、保加利亚、加拿大、中国、捷克共和国、芬兰、法国、德国、匈牙利、印度、伊朗伊斯兰共和国、意大利、日本、哈萨克斯坦、大韩民国、立陶宛、墨西哥、荷兰、巴基斯坦、罗马尼亚、俄罗斯联邦、斯洛伐克、斯洛文尼亚、南非、西班牙、瑞典、瑞士、乌克兰、英国和美利坚合众国。

<sup>3</sup> 这些总计中包括中国台湾的六座反应堆，其总装机容量为 5018 兆瓦（电）。

<sup>4</sup> 除非另有说明，所有这类统计数据均为截至 2012 年 6 月 30 日的数据。

表 B-1. 2011 年各类燃料在电力生产中的利用量（艾焦耳）及贡献率百分比（%）

地区	热能 (a)		水电		核电		可再生能源 (b)		总计	
	利用量 (艾焦耳)	%	利用量 (艾焦耳)	%	利用量 (艾焦耳)	%	利用量 (艾焦耳)	%	利用量 (艾焦耳)	%
北美	30.2	63.0	2.6	15.6	9.6	18.8	1.0	2.6	43.4	100
拉丁美洲	5.5	39.5	2.8	57.4	0.3	2.2	0.4	0.9	9.0	100
西欧	14.4	51.3	1.9	16.8	8.7	25.7	1.1	6.3	26.1	100
东欧	17.8	65.6	1.0	15.5	3.7	18.7	0.03	0.2	22.5	100
非洲	6.1	80.9	0.4	16.5	0.1	2.0	0.06	0.5	6.6	100
中东及南亚	22.9	87.3	0.7	10.9	0.4	1.8	0.0	0.02	24.0	100
东南亚及太平洋	7.5	88.4	0.3	9.3			0.4	2.3	8.2	100
远东	48.6	78.0	3.1	13.9	4.7	6.9	0.7	1.1	57.0	100
总计	152.9	68.2	12.8	17.4	27.5	12.3	3.7	2.1	196.8	100

(a) “热能”栏系固体、液体、气体、生物质能和废物的总和。

(b) “可再生能源”栏包括地热、风能、太阳能和潮汐能。

## B.2. 现有反应堆技术

11. 在正在运行的商业反应堆中，约 82%属轻水慢化和冷却堆；11%属重水慢化重水冷却堆；3%属气冷堆；3%属水冷和石墨慢化堆。两座反应堆属于液态金属慢化和冷却堆。表 B-2 显示了当前在运核电厂的数量、类型和净发电容量。

表 B-2. 当前的反应堆类型分布情况<sup>5</sup>

国家	压水堆		沸水堆		气冷堆		加压重水堆		轻水冷却石墨慢化堆		快中子增殖堆		总计	
	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)	数量	兆瓦 (电)
阿根廷							2	935					2	935
亚美尼亚	1	375											1	375
比利时	7	5927											7	5927
巴西	2	1884											2	1884
保加利亚	2	1906											2	1906
加拿大							18	12604					18	12604
中国	13	10496					2	1300			1	20	16	11816
捷克共和国	6	3766											6	3766
芬兰	2	976	2	1760									4	2736
法国	58	63130											58	63130
德国	7	9496	2	2572									9	12068
匈牙利	4	1889											4	1889
印度			2	300			18	4091					20	4391
伊朗伊斯兰共和国	1	915											1	915
日本	24	19284	26	24931									50	44215
大韩民国	19	17886					4	2785					23	20671
墨西哥			2	1300									2	1300
荷兰	1	482											1	482
巴基斯坦	2	600					1	125					3	725
罗马尼亚							2	1300					2	1300
俄罗斯	17	12864							15	10219	1	560	33	23643
斯洛伐克	4	1816											4	1816
斯洛文尼亚	1	688											1	688
南非	2	1830											2	1830
西班牙	6	6057	2	1510									8	7567
瑞典	3	2816	7	6509									10	9325
瑞士	3	1700	2	1563									5	3263
英国	1	1191			15	8055							16	9246
乌克兰	15	13107											15	13107
美国	69	67368	35	34097									104	101465
<b>全世界<sup>a</sup></b>	<b>272</b>	<b>250289</b>	<b>84</b>	<b>77720</b>	<b>15</b>	<b>8055</b>	<b>47</b>	<b>23140</b>	<b>15</b>	<b>10219</b>	<b>2</b>	<b>580</b>	<b>435</b>	<b>370003</b>

a. 说明：全世界总计中包括中国台湾的以下数据：共计 1840 兆瓦（电）的 2 座压水堆和共计 3178 兆瓦（电）的 4 台沸水堆，合计为 6 座反应堆和 5018 兆瓦（电）。

<sup>5</sup> 截至 2012 年 6 月 30 日。来源：原子能机构（动力堆信息系统）。

12. 大多数在运反应堆都是 20 世纪 60 年代晚期和 70 年代设计的，目前都不进行商业性提供。反应堆设计在规模上一直逐渐扩大，以便利用规模经济。于 20 世纪 50 年代开始商业运行的许多最早期的反应堆都是 50 兆瓦（电）或更小的反应堆。当前正在运行的反应堆均在 100 兆瓦（电）以下至 1500 兆瓦（电）规模。2012 年 6 月 30 日在运反应堆的平均规模为 851 兆瓦（电）。

13. 当前可供使用的反应堆技术基本上基于以前的设计，同时考虑到 (1) 60 年的寿期；(2) 可在运行过程中或停堆期间进行简化维护；(3) 更容易建造和建造工期更短；(4) 在最早设计阶段纳入安全性和可靠性考虑因素；(5) 现代数字控制和人-机接口技术；(6) 以风险评定为指导的安全系统设计；(7) 力求简单，减少旋转部件的数量；(8) 更多地依靠非能动系统（重力、自然循环、累积压力等）；(9) 增加能够减轻严重事故的设备以及 (10) 获得许可证预审批的完整而标准化的设计。

14. 虽然核工业历来追求规模经济，但中小型反应堆的部署一直持续不断。“小型”系指小于 300 兆瓦（电）。“中型”系指介于 300 兆瓦（电）和 700 兆瓦（电）之间。目前发展中小型反应堆的目的是供孤立的地区或互联性有限的小电网如一些发展中国家现有的电网使用，以及能够进行较小投资，以避免金融风险。提出了建造小型移动式反应堆的建议，以便能够作为预制成套设备提供电厂。

### **B.3. 人力资源**

15. 在 C.4 节讨论的核电的预测增长将需要一支不断壮大的具备必要技能的职工队伍。但即使在一些拥有在运核电厂的国家中，核教育和培训也出现了后退，甚至就其目前正在运行的反应堆而言，许多国家都面临着应对预期中的现有职工队伍不断缩减的重要挑战。就美国而言，核能研究所 2011 年的“核系统调查”显示，职工队伍在今后五年中可能缩减 39%，相当于减少约 22 300 人。欧洲委员会为跟踪核专家供需情况而设立的欧洲核能部门人力资源观察中心也报告了有关欧洲的类似数字。经合组织核能机构 2012 年《核教育和培训：从关切到能力》指出，各国政府已经认识到这一挑战，而且芬兰、法国、西班牙、英国和美国等已经开展了调查，以确定当前和今后的需求。总体而言，虽然一些国家已经实施了旨在增强教育能力的一些倡议，但对人力资源挑战的响应一直不尽相同，仍需进行更加一致的国际努力。2011 年 5 月，原子能机构发起了“全球核电工业职工队伍调查”，以便获得当前直接为核工业提供支持的工作人员人数的精确估计数。数据收集进展缓慢，调查已被保持开放至 2012 年，以收集更多的数据。

16. 正在引进核电的国家面临着特殊的人力资源挑战，它们将严重依赖供应国为其首座核电厂提供的教育和培训支助。原子能机构可鼓励供应商协调提供服务以及通过双边和多边安排协调提供服务，还可利用讲习班、评审服务、教育计划的认证和强化以及对职工队伍规划和人力资源发展战略的协助对它们的活动加以补充。美国最近向原子能机构提供了一种“核电人力资源”仿真工具，以供与成员国特别是考虑引进核电的成员国共享。该工具以国家计划为基础估算以后的人力资源需求。原子能机构还促

进了亚洲（亚洲核技术教育网）、非洲（“非洲地区核合作协定”核科学技术教育网）和拉丁美洲及加勒比（拉丁美洲核技术教育网）地区教育网络的发展。这些教育网络为开展协作和共享最佳实践提供了平台。

## **B.4. 燃料循环、废物和退役**

17. 燃料循环通常分为生产反应堆燃料组件的前端活动（采矿、转化、浓缩和燃料制造）和进行乏核燃料和核废物管理（包括贮存、后处理和废物处置）的后端活动。

### **B.4.1. 前端**

18. 经合组织核能机构-原子能机构最新版“红皮书”《2011 年铀资源、生产和需求》估计，低于每千克 130 美元的已确定常规铀资源总量为 530 万吨，比上一版即《2009 年铀资源、生产和需求》的估计总量少了 1.4%。为参考起见，2012 年 7 月 24 日的铀现货价格也是每千克 130 美元。

19. 该“红皮书”中报告的最近一年即 2010 年的铀产量为 54 670 吨，比 2009 年增长了 6%。世界最大生产国哈萨克斯坦的产量增长了 27%。澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦的产量占全球总产量的 62%。这三个国家加上纳米比亚、尼日尔、俄罗斯联邦、美国和乌兹别克斯坦共占到总产量的 92%。暂定数字表明，2011 年的最终数字在得出后将显示比 2010 年有所增加，达到约 57 230 吨铀。

20. 2010 年全世界核电厂的铀消耗量为 63 875 吨。世界核协会估计，2011 年的消耗量在福岛第一核电站事故后下降到了 62 552 吨<sup>6</sup>，但预计在 2012 年将反弹到 67 990 吨。<sup>7</sup>按预测的 2012 年消耗率，530 万吨铀的使用期限为 78 年。这与其他商品（如铜、锌、石油和天然气）30—50 年的储量相比还是不错的。

21. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。非常规资源包括：与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸盐岩、黑色页岩和褐煤伴生的潜在可回收铀；只能从中将铀作为一种少量副产品回收的资源；以及海水中的铀。2011 年，只有几个国家（智利、芬兰、约旦、墨西哥、秘鲁、南非和瑞典）提到或报告了非常规铀资源。与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸岩、黑色页岩和褐煤伴生的潜在可回收铀的以往估计量为 1000 万吨。估计世界范围内的钍资源约有 600 万吨。虽然钍一直在示范的基础上被作为燃料使用，但其更广泛的使用将取决于钍燃料反应堆的商业部署，这是一个渐进过程。

22. 加拿大、中国、法国、俄罗斯联邦、英国和美国运行着商业规模的将八氧化三铀转化为六氟化铀的工厂。阿根廷、日本和巴基斯坦则运行着较小规模的转化厂。全球

---

<sup>6</sup> 世界核协会“世界核动力堆和铀需求”，2012 年 1 月 1 日（<http://www.world-nuclear.org/info/reactors0112.html>）（2012 年 5 月 7 日访问）。

<sup>7</sup> “世界核动力堆和铀需求”，2012 年 4 月（<http://www.world-nuclear.org/info/reactors0412.html>）（2012 年 5 月 7 日访问）。

总转化能力仍稳定在每年约 7.5 万吨天然铀。当前的转化服务需求总量每年在 5.9 万吨至 6.5 万吨铀之间。

23. 全球总浓缩能力约为每年 6500 万分离功单位，而总需求将近每年 4500 万分离功单位。中国、法国、德国、荷兰、俄罗斯联邦、英国和美国运行着商业规模的浓缩厂。阿根廷、巴西、印度、伊朗伊斯兰共和国、日本和巴基斯坦则运行着较小规模的浓缩厂。

24. 最近几年中提出了一些建议，目的是更好地确保不中断核燃料供应，特别是对正在引进核电的国家的供应。这些建议大多设想原子能机构发挥核心作用。2010 年 12 月，原子能机构理事会核准建立由向原子能机构认捐的 1.5 亿美元自愿捐款提供资金的原子能机构低浓铀银行。原子能机构接受了哈萨克斯坦提出的作为该银行东道国的提议，并于 2012 年开始进行关于东道国协定的正式谈判。2011 年 2 月，俄罗斯联邦政府和原子能机构关于在俄罗斯联邦安加尔斯克建立低浓铀储备的协定生效。该储备拥有 120 吨低浓铀，设在国际铀浓缩中心。2011 年 3 月，理事会核准了英国提出的并且以欧盟、俄罗斯联邦和美国作为共同提案国的“核燃料保证”建议。该建议介绍了《核燃料保证协定范本（草案）》，根据该协定，供应低浓铀或浓缩服务的国家可同意不中断对履行国际义务和已公布出口许可证审批标准的接受国的供应。2011 年 8 月，“美国有保证的燃料供应”在美国推出。它拥有 230 吨丰度为 4.95%的低浓铀。

25. 就使用浓缩铀燃料的轻水堆而言，全世界制造燃料的能力每年约为 1.3 万吨铀（燃料组件中的浓缩铀）。对这种燃料的需求量目前每年约为 7000 吨铀，预计到 2020 年将增加到每年约 9500 吨。就加压重水堆而言，制造天然铀燃料的能力每年约为 4000 吨铀；需求量每年约为 3000 吨。

26. 再循环作业通过利用后处理铀和混合氧化物燃料提供二次核燃料供应。混合氧化物燃料的当前制造能力约为 250 吨重金属。全世界目前约有 30 座轻水堆使用混合氧化物燃料。

#### **B.4.2. 后端**

27. 一些国家视乏燃料为废物，将它们作为高放废物处置。其他国家则视之为可进行后处理和潜在重复利用的资源。现已存在进行后处理和重复利用的市场，但还没有贮存或处置市场。

28. 由于目前没有正在运行的高放废物处置设施，乏燃料存量正在不断增加，这些乏燃料大多将不得不贮存比最初预期更长的时间，可能将多于 100 年。2011 年，从全部核动力堆中作为乏燃料卸出了约 1.05 万吨重金属。到 2011 年 12 月，已卸出的乏燃料累积总量约为 35.05 万吨重金属，其中约 24 万吨重金属被贮存起来。其余部分则进行了后处理。全球商业后处理能力每年约为 4800 吨重金属，分布在法国、印度、俄罗斯联邦和英国这四个国家。在日本，年处理 800 吨重金属的六所村商业后处理厂在由于 2011 年 3 月 11 日的地震和海啸而被中止时建造工作已接近完成。



29. 在高放废物处置设施方面取得最大进展的国家是芬兰、法国和瑞典。在芬兰，作为乏燃料处置库前奏的昂加洛地下岩石表征设施的建造在 2010 年达到最终处置深度。核废物管理公司泊西瓦打算在 2012 年底提交该处置库建造许可证申请，并于 2020 年开始进行最终处置。在法国，国家放射性废物管理机构在 2012 年 1 月签署了关于设计其未来深部地质处置库的合同，该处置库预定于 2025 年开始在法国东部的默兹/上马恩地区运行。瑞典核燃料和废物管理公司在 2011 年 3 月提交了在福什马克建造一座乏燃料处置库的许可证申请，并估计将能够在 2025 年之前开始最终处置。

30. 在欧盟，2011 年 7 月，欧盟理事会核准了一项关于乏燃料和放射性废物管理的指令，该指令为所有欧盟成员国确定了统一标准，并要求它们制订国家计划和在 2015 年 8 月之前向欧洲委员会报告进展情况，此后则每三年报告一次进展情况。

31. 除了与乏燃料相关的高放废物外，燃料循环还自始至终产生中低放废物。中低放废物的处理、整备和长期贮存技术均已成熟，这些一般都在产生这类废物的核设施中进行。一些国家已经在运行工业规模的中低放废物处置设施，还有一些国家正在建造这种设施。但也有一些拥有在运核电站的国家尚未能进行中低放废物处置设施的选址和建造，其主要原因是还没有得到政治上的认可和公众的接受。

### **B.4.3. 退役**

32. 动力堆的寿期一旦结束，就要退役。退役涉及以受控的方式将其拆除，然后对所产生的放射性废物进行管理和处置。

33. 共有三个基本方案：立即拆除、在拆除之后长期安全封存和亦称场内或就地处置的掩埋。掩埋一般仅限于小型装置。在立即拆除和长期安全封存之间的选择取决于处置设施的可用性以及有关其未来可用性的不确定性、资金可支配情况（早于计划关闭的反应堆或不须在运行寿期期间积累资金的反应堆可能没有可供支配的资金）、预期费用（它随着辐射水平降低和技术改进而下降）、对已关闭反应堆周边的就业机会的关切、场址以后的计划用途（可能用于建造新反应堆）、感兴趣利益相关方的优先选择以及适用的国家法律、条例和乏燃料管理战略。

34. 截至 2011 年 12 月，共有 124 座动力堆被关闭。其中有 16 座已被完全拆除；50 座处于拆除过程中；49 座被置于安全封闭模式；3 座已经被掩埋；6 座尚未确定退役战略。

## **B.5. 工业能力**

35. 在建核动力堆数量在 1979 年达到峰值，为 233 座。随后下降到 1995—2005 年的 30 座和 40 座之间，但此后又上升到 2012 年 6 月 30 日的 62 座（图 B-1）。核系统供应工业特别是北美和欧洲的核系统供应工业主要通过整合针对 1980 年以后的下降进行了调整。而中国、印度和大韩民国的能力通过国产化得到了提高，预计将为满足全世界今后对核建造专门知识的需求作出越来越大的贡献。本节突出叙述最近在扩大工业能

力以响应 C.4 节所述核电的预期增长方面出现的一些发展情况。

36. 重工业设备供应商集中在中国、捷克共和国、法国、日本、大韩民国和俄罗斯联邦。日本的日本制钢所和日本铸锻公司、中国的上海电气集团及其子公司、印度 Bharat Forge 公司、大韩民国斗山集团、法国勒克勒佐公司、捷克共和国比尔森公司以及俄罗斯联邦 OMZ Izhora 公司和 ZiO-Podolsk 公司都在建设新的能力。

37. 在加拿大，前国有反应堆供应商加拿大原子能有限公司在 2011 年被部分私有化。该公司的核动力堆供应和核服务部分被出售给工程和建设集团公司 SNC-Lavalin 公司，并更名为坎杜能源公司。该公司的其余部分保留了“加拿大原子能有限公司”这一名称，现侧重于研究与发展、设计、工程、专门技术、废物管理和退役。它继续拥有和运行乔克河核实验室。

38. 在中国，2011 年，国家核电技术公司和上海核工程研究设计院与西屋公司一起完成了中国先进动力堆（CAP-1400）的初步设计，该动力堆也被称为“大型先进非能动压水堆核电站”。它打开了中国在西屋公司的合作下出口该设计的可能性。

39. 大韩民国正在开发可出口的 1500 兆瓦（电）先进动力堆（APR+）和面向欧洲市场的 EU-APR 1400（见第 86 段）。在俄罗斯联邦，主要反应堆部件供应商 OMZ 公司正在加倍提高其 Komplekt-Atom-Izhora 设施生产大型锻件的能力，使之达到每年生产三到四台压力容器。

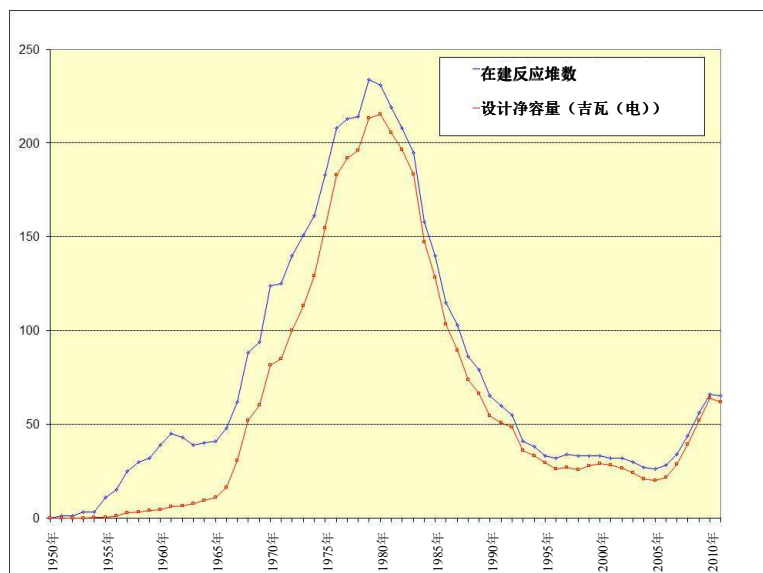


图 B-1. 1951—2010 年期间在建反应堆的数量和反应堆的总装机容量。来源：原子能机构（动力堆信息系统）。

## C. 核能今后应用的前景

### C.1. 在已经利用核电国家的前景

40. 表 C-1 概述了目前在运核电厂国家加上立陶宛的扩展计划的现有资料，立陶宛有 43.5 堆-年的运行经验，但自 2009 年底伊格纳林纳-2 号核电厂关闭以来，已没有在运反应堆。该表是基于成员国在 2011 年原子能机构大会上的发言介绍和对其立场的其他公开表述。

### C.2. 在考虑引进核电国家的前景

41. 自 2000—2010 年这 10 年的中期以来，发展中国家表示了对核电的新兴趣或重燃了对核电的兴趣。尽管福岛第一核电站事故使一些国家改变了它们的立场，而一些国家则抱着“等等看”的态度，但在考虑或计划引进核电的国家中仍然对核电感兴趣。

42. 表 C-2 列出了处于考虑或发展核电的不同阶段的国家数量。有时被称为“核电新加入国”的一些国家，如孟加拉国、埃及和越南一段时间以来实际上一直在进行核电规划。其他一些国家，如波兰，因政府立场和公众舆论改变而削减核电计划之后目前则正在恢复核电方案。约旦和乌拉圭等国正在首次考虑或规划核电。它们的共同之处是目前都正在考虑、规划或启动核电计划，并且都尚未将第一座核电厂并入电网。

表 C-1. 拥有在运核电厂国家（加上立陶宛）的状况

类别	国家数量
有新机组在建并有更多新机组的计划/建议	11
有新机组在建但未制订更多新机组的政策	2
没有机组在建但有建新机组的计划/建议	10
没有机组在建且目前也没有建新机组的计划/政策	4
有不建新机组和/或关闭现有机组的坚定政策	4

表 C-2. 无在运核电厂国家的状况<sup>8</sup>

组别描述	2012 年 国家数量	2010 年 国家数量	2008 年 国家数量
考虑利用核计划满足确定的能源需求，并坚定地打算着手实施核电计划	14	14	14
为可能实施核电计划积极进行准备，但未作出最后决定	6	7	7
已决定引进核电，并开始为适当的基础结构做准备	6	10	5
已订购新核电厂	3	2	0
正在建造新核电厂	0	1	1

43. 在 2012 年考虑或计划引进核电的 29 个国家中，10 个在亚洲及太平洋地区，10 个在非洲地区，7 个在欧洲（主要是东欧），还有 2 个在拉丁美洲。

44. 即使在福岛第一核电站事故以后，一些国家还采取了引进核电的具体步骤。在阿拉伯联合酋长国，2011 年酋长国核能公司为阿联酋第一座反应堆燃料的铀、转化和浓缩进行了招标。在土耳其，项目公司阿库尤核电生产公司提交了建造许可证和发电许可证的申请。白俄罗斯与俄罗斯联邦签署了建造两座反应堆的合同，而孟加拉国也与俄罗斯联邦签署了建造两座反应堆的政府间协议。越南与俄罗斯联邦签署了一份为其第一座核电厂筹资的贷款协议，并宣布它打算与日本签订一份类似的协议。

45. 2011 年 9 月伊朗伊斯兰共和国在布什尔开始第一个核电厂的调试，这标志着 15 年来在一个核电“新加入国”的第一座核电厂调试。

46. 一直到 20 世纪 80 年代初期，新国家加入在运核电厂国家名单中的速度相当稳定，如图 C-1 所示。直到 2011 年伊朗伊斯兰共和国加入该名单之前，只有三个国家即中国、墨西哥和罗马尼亚在后切尔诺贝利时代将其第一座核电厂并网。在时隔 15 年后，一些国家目前正在规划将其第一座核电厂并入电网。在考虑或规划其第一座核电厂的国家中，有九个国家已明确表示首次运行的目标日期为 2030 年之前。

<sup>8</sup> 本出版物的前两版中包含了其他两个组别但未包含在此版本中，因为它们不能实质性地增加对发展中国家高涨的核能预期的了解。一个组包含了没有计划引入核电却有兴趣考虑相关问题的国家，但要描述其趋势证明是困难的，并且这些国家的数量年年都有较大波动。第二组包含了已准备为提供核电厂进行招标的国家，但这样证明也存在问题，因为一些国家正在选择通过直接的双边协议而非招标方式订购核电。

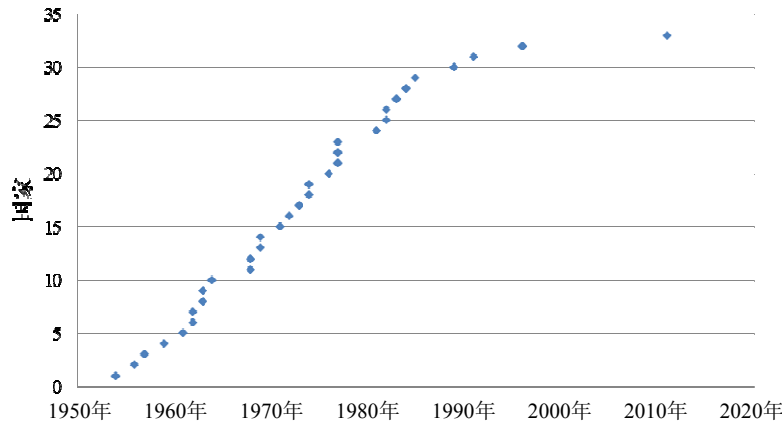


图 C-1. 正在运行或运行过核电厂的国家数量。来源：原子能机构（动力堆信息系统）。

47. 总体上，表 C-1 和 C-2 与以下所述低值预测和高值预测中所反映的趋势是一致的，即在有关核电的预测中仍存在着很大的不确定性；核电利用的增长预计更多将由已有核电国家而不是开始启动核电计划的国家的核电发展所驱动。九个已明确表示其核电厂第一次运行的目标日期在 2030 年以前的国家，介于原子能机构有关 2030 年前第一座核电厂将要并网的七个国家的低值预测和 16 个国家的高值预测之间。

### C.3. 引进核电的潜在推动因素

48. 自 2005 年以来驱动对核电兴趣不断增长以及图 B-1 所示建设开工数量增加的关键因素并未随福岛第一核电站事故的发生而改变，这就是：对能源特别是对电力不断增长的需求；化石燃料价格的反复波动；环境压力和对能源供应安全的关切。

#### C.3.1. 需求

49. 对全球能源和电力的需求将增长几十年。可信的长期或短期能源评定其结果莫不如此。世界人口的不断增长和目前发展中世界强烈的发展愿望（这些地区很大部分人口还缺少的供应）转化为电力需求的增长率超过对总的一次能源需求的增长率。所有研究都一致认为最大的需求增长将发生在发展中国家。

50. 联合国最新人口预测的中位变量估计到 2030 年将增加 15 亿人口，到 2050 年将再增长 10 亿，使世界总人口达到 93 亿。<sup>9</sup> 世界银行预测到 2015 年世界经济平均年增长率为 3.1%，2015 至 2030 年之间为 2.5%，<sup>10</sup> 而发展中国家将发展最快。根据这两个驱动因素，经合组织国际能源机构预计电力需求将从 2010 年的 21 300 太瓦小时增长为

<sup>9</sup> 联合国经社部《2010 年世界人口展望》，2010 年修订本，可从 <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm> 在线获得。

<sup>10</sup> 世界银行《2009 年全球经济展望：处于十字路口的商品》，可从 [http://siteresources.worldbank.org/INTGEP2009/Resources/10363\\_WebPDF-w47.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTGEP2009/Resources/10363_WebPDF-w47.pdf) 在线获得。

2030 年的 30 390 至 35 470 太瓦小时，具体将取决于环境政策。80%的增长将发生在非经合组织国家。将分析扩展到 2050 年将导致电力需求增长达到 37 660 至 46 190 太瓦小时之间。<sup>11</sup>

### C.3.2. 化石燃料的价格和经济性

51. 国际化石燃料市场价格围绕显著升高的水平反复波动仍然是发达国家和发展中国家的一个主要关切。对很多依赖能源进口的发展中国家，燃料进口的高价格消耗了其有限的出口收入并阻碍了经济发展。考虑到不断上升的全球能源需求和主要生产商不愿加快投资勘探和增加产能（部分是由于经济的不确定性），全球化石燃料的高价格不可能很快得到抑制。

52. 然而，最近在美国大量页岩气的商业化已经扭转了天然气价格不断上升的趋势，并颠覆了非常规化石资源一定比常规化石资源更贵的假定。页岩大量存在于世界上很多地方，但其含气特性却大不相同，这使得预测商业化获得页岩气具有很大的不确定性。由于使用水力压裂开采所带来的环境和健康关切也使公众的接受程度存在不确定性。正如 C.3.3 节所讨论的那样，使用页岩气也产生二氧化碳排放，并且泄漏到大气中的页岩气是一种威力更大的直接的温室气体。

53. 经济发展需要既可靠又可负担的基本负荷电力。不像燃烧化石燃料发电，核电的燃料成本仅占发电成本的百分之几。铀价上涨两三倍只使发电成本增加 4—6%。相比之下，对化石燃料发电来说，燃料成本翻倍则总发电成本提高 40—70%。因此，价格波动对石化燃料发电而言是一个很大的关切问题。

### C.3.3. 环境

54. 按一个寿期来算，核电每千瓦时只排放几克温室气体。一个完整的寿期包括铀的开采，选冶、转化、浓缩、燃料制造、电厂建造和运行、后处理、乏燃料整备、放射性废物的临时贮存以及最终处置库的建造。如图 C-2 所示，核电链寿期的排放可与最好的可再生能源链相媲美，至少比化石燃料链低一个数量级。总的来说，政府间气候变化问题小组估计核能在发电行业具有潜力最大且成本最低的温室气体减排能力（政府间气候变化问题小组，2007 年）。<sup>12</sup>

55. 核能很低的温室气体排放以及其减少电力部门温室气体排放的巨大潜力有助于提高对核能的兴趣。然而，由于没有一个新的、全面而有约束力的长期国际环境协议来

---

<sup>11</sup> 国际能源机构《2010 年能源技术前景：直到 2050 年的设想和战略》，2010 年可从 <http://titania.sourceoecd.org/v1=13668216/cl=27/nw=1/rpsv/~6673/v2010n11/s1/p1> 在线获得。

<sup>12</sup> 《2007 年的气候变化：减缓》，政府间气候变化问题小组，2007 年。第三工作组向政府间气候变化问题小组“第四次评定报告”提交的文件。[B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], 剑桥大学出版社，英国剑桥和美国纽约。

取代“京都议定书”（该议定书在 2011 年延期至少到 2017 年），并非所有新核电厂投资者都能确保在经济上从核电的低温室气体排放中获利。

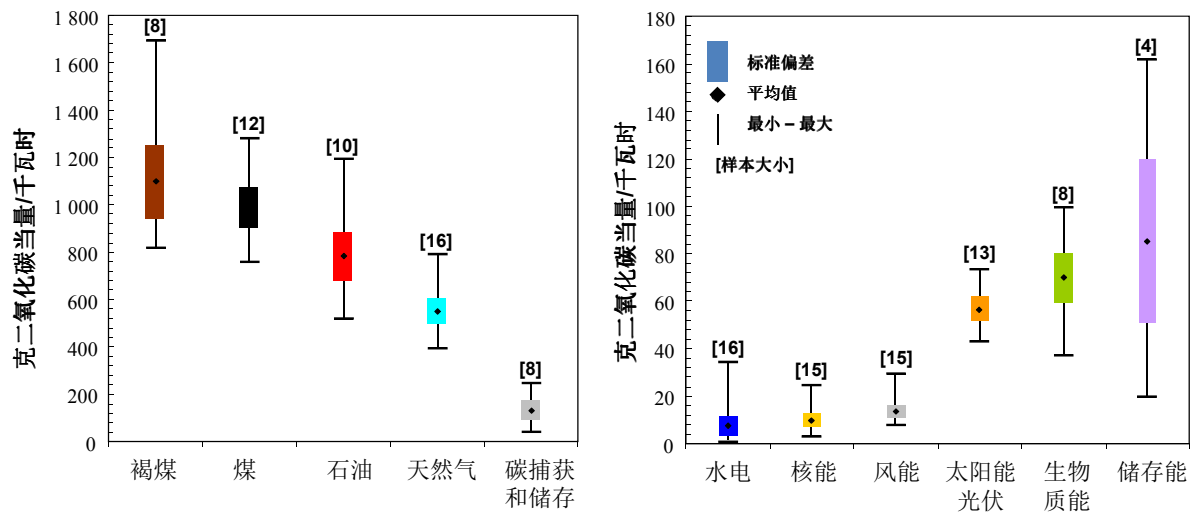


图 C-2. 不同发电方案的寿命温室气体排放。注意右侧面版的刻度比左侧面板的刻度小一个数量级。

56. 除了很低的温室气体排放之外，核能在运行期间也不排放产生氧化氮、二氧化硫和颗粒物排放物等空气污染物的有毒气体，这些空气污染物对人体健康造成危害，并造成了糟糕的城市空气质量和地区酸化。

### C.3.4. 能源安全

57. 技术、燃料和能源的多样化及战略储备长期以来都是能源供应安全的主要支柱。当核能成为一国能源结构的一部分，它就提高了能源供应的安全，而且在大多数国家，核能的发展将增加电力部门的多样性。

58. 如 B.4 节所述，铀资源的数量既大又分散在不同地区。确认的可低于每千克铀 130 美元开采的常规铀资源按预测的 2012 年的消耗率足以维持大约 78 年。以较高成本可获得的其他类别的铀资源比如“预测和推测储量”增加了估计资源的基础。而后处理、再循环以及快增殖堆技术的利用将使所有类别资源的使用寿命延长 60—70 倍。

59. 核燃料的能量密度远高于化石燃料，因此需要的燃料体积更小，这使建立战略库存更为容易。实际上，几年来的趋势一直是从战略储备转向基于多样化的运作良好的铀和燃料供应服务市场的供应安全。但认为战略库存重要的国家仍然可利用相对低成本的战略库存的选择方案。

60. 核电厂很长的在役时间和稳定的基本负荷发电成本是能源供应安全的另一方面。

### C.4. 核电增长的预测

61. 原子能机构每年对全球核电的增长发布两种最新预测：低值预测和高值预测。2011 年的更新考虑了福岛第一核电站事故的影响。在最新的低值预测方面，世界核电

装机容量从现在的 370 吉瓦（电）<sup>13</sup> 增长到 2030 年的 501 吉瓦（电），比 2010 年的预测降低了 8%。在最新高值预测方面，装机容量将在 2030 年增长到 746 吉瓦（电），比 2010 年的预测降低了 7%。表 C-3 显示预测增长最大的地区是远东。有实质性核电计划的其他地区是东欧、中东和南亚。

表 C-3. 核发电容量的估计

地区	2010年	2020年		2030年		2050年	
		低值	高值	低值	高值	低值	高值
北美洲	113.8	119	126	111	149	120	200
拉丁美洲	4.1	6.4	6.4	9	18	15	60
西欧	122.9	93	126	83	141	60	170
东欧	47.4	66	80	82	108	80	140
非洲	1.8	1.8	1.8	5	16	10	48
中东及南亚	4.6	13	22	30	53	50	140
东南亚及太平洋	0	0	0	0	6	5	20
远东	80.6	130	164	180	255	220	450
<b>世界总计</b>	<b>375.3</b>	<b>429</b>	<b>525</b>	<b>501</b>	<b>746</b>	<b>560</b>	<b>1228</b>

62. 图 C-3 对原子能机构的预测与经合组织国际能源机构和世界核协会的预测进行了比较。原子能机构的低值预测、国际能源机构的当前政策假想方案和世界核协会的参考假想方案全都使用“一如往常”的相似假设，因此产生了可比较的结果。这些组织的高值假想方案和国际能源机构和世界核协会的低值核假想方案一样，也是可以比较的。

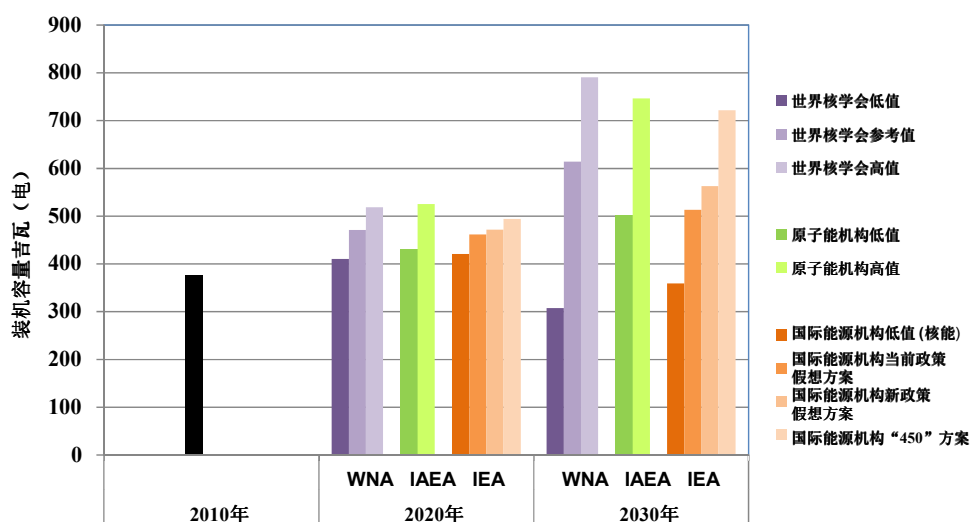


图 C-3. 原子能机构（蓝色）、世界核学会（紫色）<sup>14</sup> 和国际能源机构（橙色）<sup>15</sup> 核能预测的比较。“450”是指空气温室气体浓度被限制在 450ppm 时的假想方案。

<sup>13</sup> 2012 年 6 月 30 日。

<sup>14</sup> 《2011—2030 年全球核燃料市场供需状况》，世界核协会，伦敦，2011 年。

<sup>15</sup> 《2011 年世界能源展望》，经合组织-国际能源机构，巴黎，2011 年。



63. 《全球能源评定》协调者、国际应用系统分析研究所在在 2012 年 6 月联合国可持续发展会议（里约+20）上发布的《全球能源评定》也提出了包括核能在内的未来能源的各种假想方案。《全球能源评定》假想方案是基于一种经济发展假设，但有三种不同类型的能源系统转变方式。全球能源评定-供给型（GEA-S）按比例增加所有供给方的选择。全球能源评定-效率型（GEA-E）强调改进效率，通过包括生活方式转变在内的能源系统和解决方案来限制能源需求。全球能源评定-混合型（GEA-M）是供给型和效率型的结合。在这些类型中，《全球能源评定》建立了描述多种敏感性分析的 60 个供选择的路径。图 C-4 显示了在三种类型假设下核能随时间变化的发展规模。《全球能源评定》的大多数分析都是在福岛第一核电站事故之前完成的，其核电容量范围下端是进行敏感性分析时有意在 2100 年前排除核电的结果。但低端的核能轨迹也被解释为核事故的可能后果。

### C.5. 非电力应用

64. 非电力应用包括产氢，一是可以提升油砂等低质量石油资源，同时抵消与蒸汽甲烷重整有关的碳排放；二是支持基于大规模生物质、煤或其他碳源大规模生产合成液体燃料；三是直接作为汽车燃料，最可能用于轻型插电式混合动力氢燃料电池汽车。核能还可用于石油工业，通过使用蒸汽辅助重力泄油或油页岩干馏来提取沥青。

65. 图 C-5 说明了热电联产的益处，该图原则上可用于海水淡化和产氢等其他非电力应用。目前有 79 座反应堆以联产模式运行，该技术的更广泛应用看上去潜力巨大。核电厂与附近的工业和其他设施越是协调发展，从而使其他设施能够利用核电厂的余热，核电厂的益处就越大，也就越能以赢利的方式运行。此外，在有海水可以利用而淡水缺乏的地方，海水淡化也许可提供饮用水和成本效益好的核电厂自用的工业用水。

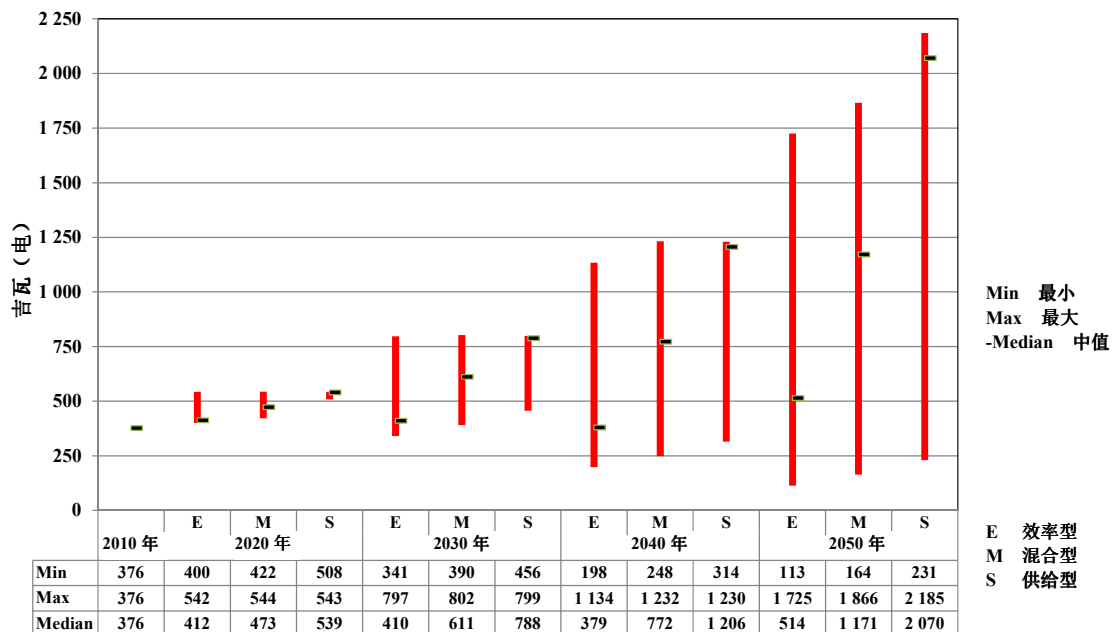


图 C-4. 全球能源评定-供给型、效率型和混合型模式下的核电发展。

来源：《全球能源评定》，2012 年。

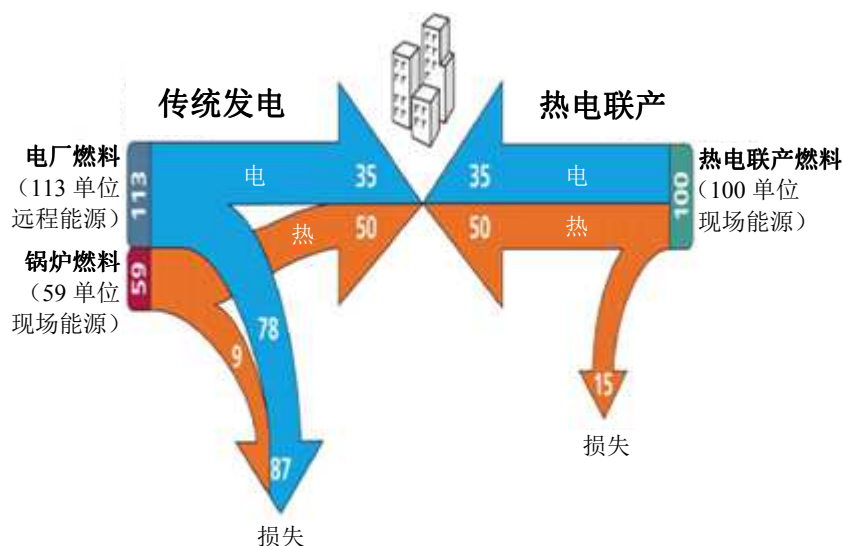


图 C-5. 与传统独立能源生产相比联产导致的一次能源节省。

## D. 核扩展的挑战

### D.1. 融资

66. 特别与天然气发电厂相比，核电厂建造成本相对昂贵，而运行成本则相对便宜。核电与具有低碳排放的其他技术如水电、风能和太阳能一样，都具有这种“前期投资密集”的成本结构。

67. 核电前期资本成本高，用于规划、许可证审批和建造的准备时间长，而且其成本对利率具有敏感性，所有这一切均给融资工作带来挑战。在其他条件相同的情况下，如果可以获得可等待较长时间回报的资金（更具有政府而非私营工业的特点），而且如果由于更可预见的电力需求和价格、稳定的市场结构和强有力的政治支持使得融资风险较低，核电因此则属于比较有吸引力的投资。

68. 部分地由于上述原因，全世界 62 座在建反应堆中的大多数都是由政府拥有的电力公司直接提供资金，因为它们得到了政府的强力支持、获得了对资源的准入并拥有良好的信用评级，使其更负担得起借款，并更容易进入国际信贷市场。这包括当前和预测的核电扩展比较集中的国家，如中国、印度、大韩民国和俄罗斯联邦。

69. 资产负债表健康的大型私营电力公司正在通常作为联盟中的伙伴参加少量新反应堆的建造和融资工作。芬兰的奥尔基卢奥托 3 号项目和芬诺能源公司项目就是将法人融资和项目融资结合起来的合作模式的典范，在这种模式中，城市、当地电力公司、工业电力消费者和战略伙伴之间共享所有权和共同出资。

70. 英国和美国的发展情况反映了可预见性和稳定性对私营投资者的重要性。美国的

大多数新反应堆都是提议在美国有受到监管的电力市场的州建造，因为一些费用即使在建造期间也可以向电力公司的客户收取，而且监管提高了电力价格的可预见性。为了增加对英国核电的私人投资，投资者们正在探索诸如“差价合同”的机制，政府则正在提出立法建议，而这两者都旨在提高价格的可预见性。

71. 对于启动核电计划的国家，供应核电厂的国家就是部分的或全部的资金来源。阿联酋的四座新反应堆正在由阿联酋政府和韩国电力公司牵头的韩国财团提供资金。在土耳其，项目公司由土耳其和俄罗斯联邦共同拥有，建造、运行和退役费用将全部由俄方提供资金。在孟加拉国、白俄罗斯和越南，协议还具体规定绝大部分资金都将来自俄罗斯联邦。

72. C.4 节中的图 C-3 所示的预测没有哪一项要求核电比整个电力供应部门其余部分更快扩展，因此，其投资需求不会与整个部门大幅度脱节。对于像中国、印度、大韩民国和俄罗斯联邦这样的扩展中心而言，按比例增加当前融资安排的挑战可能少于确保对于在另外一些国家鼓励私人投资十分重要的电力需求、价格和强大政治支持的可预见性的挑战。

## D.2. 安全性和可靠性

73. 自 2011 年 3 月以来，有关核电厂安全的讨论一直让位于确定和借鉴从福岛第一核电站事故中汲取的教训的需要。

74. 原子能机构在 2011 年 6 月召集了“部长级核安全大会”，目的是讨论对福岛事故的初步评定、审议需要汲取的教训、帮助启动加强全球核安全进程以及审议进一步加强对核事故和紧急情况响应办法。许多成员国开展了作为国家安全评定一部分的审查工作（通常称为“压力测试”），并承诺迅速完成余下的评定和落实必要的纠正行动。

75. 从这起事故获得的初步见解是全世界核电厂的监管者和营运者在必要时都需要审查和加强：(a) 防范像海啸这样的极端危害的保护措施；(b) 严重事故情况下的供电和冷却能力；(c) 管理严重事故的准备情况；以及 (d) 电厂的设计基准，即关于将要考虑的一套预先设定事故的假设情况。

76. 虽然仍有教训有待汲取，但业已在国家层面和国际层面制订了借鉴这起事故的初步教训的行动计划。原子能机构“核安全行动计划”<sup>16</sup> 确定了一个旨在加强全球核安全框架的工作计划。该计划已于 2011 年 9 月经大会通过，并确定了 12 项主要行动。

77. 从运行角度看，世界范围内核电厂的安全水平仍然很高，原子能机构和世界核电营运者联合会收集的安全指标已表明了这一点。图 C-6 显示了包括自动和手动紧急停

---

<sup>16</sup> <http://www.iaea.org/newscenter/focus/actionplan/>。

堆在内的每 7000 小时动力堆临界运行发生的非计划停堆（“紧急停堆”）总数。这一指标监测在减少非计划停堆总数方面的实绩，并通常用于表明在改进电厂安全方面取得的进展。如图 C-6 所示，过去 10 年情况出现了大幅度改进，尽管其幅度不如 20 世纪 90 年代那样巨大。不过，业绩最佳者与最差者之间的差距仍然很大，还有继续改进的余地。2010 年至 2011 年的增加系与 2011 年日本地震引起的大量紧急停堆有关。

### D.3. 公众认识

78. 不同国家和地区公众对核电的认可度反映出如何将感知到的利益与感知到的风险进行比较。在福岛第一核电站事故后，进行了众多公众舆论调查，包括两次大规模的多国调查，其中都设有答复者是支持还是反对核电<sup>17</sup>或者赞同还是不赞同核电<sup>18</sup>这样类似的问题。支持率在各国和各地区之间差异很大，从一些国家几乎完全反对，到另外一些国家支持率最初陡降然后又反弹回福岛前的水平，不一而足<sup>19</sup>。在运行反应堆的许多国家，民意调查还发现对现有反应堆和新反应堆的观点也有不同：赞同前者而不太赞同后者。

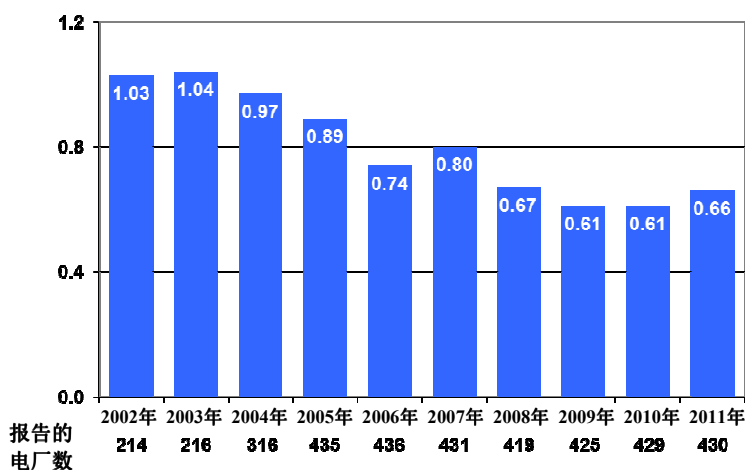


图 C-6. 包括自动和手动停堆在内的每 7000 小时动力堆临界运行发生的非计划停堆的总数。来源：原子能机构（动力堆信息系统）。

<sup>17</sup> 益普索社会调查机构，2011 年。全球强烈反对核电。可从 <http://www.ipsos-mori.com/researchpublications/researcharchive/2817/Strong-global-opposition-towards-nuclear-power.aspx> 在线获得。

<sup>18</sup> 盖洛普，2011 年。“日本地震对人们有关核能看法的影响：全球独立网络-盖洛普国际协会在 47 个国家进行的盖洛普即时调查的结果”。可从 [http://www.nrc.co.jp/report/pdf/110420\\_2.pdf](http://www.nrc.co.jp/report/pdf/110420_2.pdf) 在线获得。[2012 年 4 月 26 日访问]

<sup>19</sup> 益普索社会调查机构，2012 年。福岛事故后；全球有关核能政策的舆论。可从 <http://www.ipsos.com/public-affairs/sites/www.ipsos.com/public-affairs/files/Energy%20Article.pdf> 在线获得。

79. 民意调查结果凸现了提供关于事故后果、防止未来事故的准备情况以及核电和其他能源替代方案的全部风险和利益的透明可访问信息的重要性。利益相关方包括地方政府、应急服务机构、监管者、工会和社区组织的大力参与也十分重要。最后，对于以平衡的视角看待核电的健康影响而言，公众更好地了解日常生活中不断遇到的辐射和辐射照射至关重要。

#### **D.4. 乏燃料和废物的管理和处置**

80. 正如 B.4 节所概述的那样，目前没有正在运行的高放废物处置设施，因此，乏燃料存量正在继续增加。所有乏燃料最初都要在反应堆设施贮存水池的水下贮存 9 个月和几十年，时间长短取决于这种水池的贮存能力。如果要对燃料进行后处理，则将其运输到后处理设施，并在被投入处理过程前在那里被贮存在缓冲贮存水池中。不是预定后处理的燃料仍贮存在反应堆最初的贮存水池中，或者被运往单独的离堆燃料贮存设施。不管名称如何，离堆设施可能要么建在反应堆场址的局部，要么建在其他专用场址上。全世界目前约有 120 座运行中的商业离堆乏燃料贮存设施，其中大多数属于反应堆场址上的干法贮存设施。

81. 面临的挑战是如何加快高放废物处置设施的建设进度，以及如何将离堆贮存扩大到容纳 B.4 节所述日益增多的乏燃料存量并延长贮存期。在最终处置问题上取得最大进展的国家是芬兰、法国和瑞典，这些国家的设施预定于 2020—2025 年开始运行。对欧盟其他国家而言，正如 B.4 节所指出的，欧盟理事会于 2011 年 7 月批准了一项指令，其中要求所有欧盟成员国制订各国的乏燃料和放射性废物管理计划，并在 2015 年 8 月之前以及此后每三年向欧洲委员会报告进展情况。

#### **D.5. 电网与反应堆技术之间的关系**

82. 如果要避免发生电网稳定性问题，新电厂的最大规模一般认为约为现有电网的 10%。在 29 个正在考虑或规划核电的国家中，有 12 个国家拥有不足 5 吉瓦（电）的电网容量，依据 10% 的指导意义，如不改进国际电网互联状况，该容量将使这些电网因规模太小而无法适应大多数在售的反应堆设计。尽管低于 600 兆瓦（电）的许多设计正在进行之中，但其商业可用性却是有限的。电网问题也可能对拥有小于 10 吉瓦（电）电网容量国家的技术方案形成制约。

### **E. 反应堆和燃料循环技术的发展**

#### **E.1. 轻水堆**

83. 轻水堆在新建反应堆中居支配地位。目前正在建的 62 台机组中有 54 台属于轻水堆。

84. 中国在建的 26 座反应堆中有欧洲压水堆、西屋公司的 AP-1000 和本国的压水堆设计如 CNP-600、CPR-1000 和 CAP-1400。中国核工业集团公司还开发了融合秦山核电站和大亚湾核电站设计、建造和运行经验的 CNP-1000 核电站。首批两台机组于 2010 年和 2011 年在岭澳开始商业运营。上海核工程研究设计院正在开发以 AP-1000 非能动安全技术为基础的 CAP-1400/1700 先进非能动核电厂。

85. 日本运行着四座先进沸水堆（ABWR），而且在福岛第一核电站事故前正在建造另外两座沸水堆。现已无限期搁置了建造工作。日本拥有发展预期规模经济相当于当前沸水堆的 1638 兆瓦（电）ABWR-II 的计划。预计将在 21 世纪头 10 年下半叶以商业方式引进 ABWR-II。日本还拥有发展高性能先进沸水堆（HP-ABWR）和高性能先进压水堆（HP-APWR）的计划。两种堆型大约都是 1800 兆瓦（电）。欧洲型先进压水堆即 EU-APWR 也在发展之中，并将按照“欧洲电力公司要求”进行评定。

86. 在大韩民国，OPR1000 机组在运的有 11 台，在建的有一台。在 OPR1000 设计的基础上，韩国水电和核电公司开发了一种先进的动力堆 APR-1000 以及进一步追求规模经济的 APR-1400。APR-1400 机组正在新古里 3 号和 4 号反应堆进行建造，并计划在新蔚珍 1 号和 2 号以及新古里 5 号和 6 号反应堆进行建造。阿联酋已经订购了四台 APR-1400 机组。欧洲型 APR-1400 即 EU-APR-1400 正在发展之中，并将按照“欧洲电力公司要求”进行评定。APR+即 1500 兆瓦（电）先进压水堆的设计工作已经开始。

87. 在法国，阿海珐核能公司已经设计出了满足“欧洲电力公司要求”的 1650 兆瓦（电）欧洲压水堆。有四座这种压水堆正在中国、芬兰和法国建造。阿海珐公司正在与意昂公司合作发展 1250 兆瓦（电）KERENA 沸水堆设计，它是一种具有非能动安全系统的先进沸水堆，并与三菱重工株式会社合资发展 1150 兆瓦（电）ATMEA-1 设计，它是一种具有主动安全系统的先进压水堆。

88. 美国西屋公司发展了 AP-1000 设计，该设计于 2006 年取得了设计认证。有四台 AP-1000 机组目前正在中国三门和海阳两个场址进行建造。美国核管理委员会（美国核管会）正在对要求更新设计认证的通用电气-日立核能有限公司的先进沸水堆和东芝公司的先进沸水堆进行审查，并且正在对要求设计认证的阿海珐公司的美国欧洲压水堆（US-EPR）、三菱重工的先进压水堆和通用电气-日立核能有限公司的经济简化沸水堆（ESBWR）进行审查。

89. 在俄罗斯联邦，俄罗斯原子能项目公司/Gidropress 公司正在功率水平为 300 兆瓦（电）至 1800 兆瓦（电）的设计渐进型水水动力堆（WWER）核电厂。正在建造两台 WWER-1000（V-320）机组和五台 WWER-1200（NPP-2006）机组。WWER-1000（V-320）机组有两台在中国运行（田湾 1 号和 2 号），有两台在捷克共和国运行（泰梅林 1 号和 2 号），有一台在伊朗伊斯兰共和国运行。

## E.2. 中小型动力堆（中小型堆）

90. 目前，共有 131 座中小型堆运行在 26 个国家，总装机容量为 58.9 吉瓦（电）。在建的 62 座反应堆中有 14 座属于中小型堆。约有 45 种革新型中小型堆概念正处在某种研究与发展阶段。

91. 阿根廷正在发展模块式小型压水堆（CAREM 反应堆），即一种小型一体化加压轻水堆设计，所有一回路部件被置于反应堆压力容器内，电输出功率为 150—300 兆瓦（电）。2011 年开始进行 27 兆瓦（电）CAREM 原型厂的场址挖掘工作。

92. 在法国，法国海军造船公司正在发展 Flexblue 小型海底核电厂——基于法国水冷船舶推进反应堆的一种 50—250 兆瓦（电）小型模块式水下设计。

93. 大韩民国的系统一体化模块式先进反应堆（SMART）设计的热容量为 330 兆瓦（热），旨在进行海水淡化。预计将在 2012 年底取得国家核安全委员会的标准设计批文。

94. 俄罗斯联邦正在建造两座用于工艺热和电力联供的 35 兆瓦（电）KLT-40S 船装反应堆。KLT-40S 基于商用 KLT-40 船舶推进装置，是一种为核破冰船提供动力的先进反应堆变体。8.6 兆瓦（电）的 ABV-6M 正处在详细设计阶段。这是一种一次冷却剂自然循环的一体化加压轻水反应堆。正处在详细设计阶段的 8.6 兆瓦（电）RITM-200 是一种用于核破冰船的强制循环一体化反应堆。

95. 在美国，正在发展四种一体化中小型压水堆：mPower 反应堆、NuScale 反应堆、西屋中小型堆和 Hi-SMUR 140。mPower 反应堆有 2—6 个 180 兆瓦（电）模块组成。计划于 2013 年向美国核管会提出该种反应堆的设计认证申请。NuScale 电力公司设想了一种由最多 12 个 45 兆瓦（电）模块组成的核电厂。也计划于 2013 年提出该种反应堆的设计认证申请。西屋公司的中小型堆是一种集非能动安全系统和经过证明的 AP-1000 部件为一体的 225 兆瓦（电）概念设计。还开始了一种较新的中小型堆设计即 Holtec 公司固有安全模块式地下反应堆（Hi-SMUR 160）的发展工作。这是一种 160 兆瓦（电）反应堆，它依靠自然对流，从而消除了对冷却泵的需求以及对外部电源的依赖。

## E.3. 重水堆

96. 在运和在建的重水堆分别为 47 座和五座。存在两种类型的重水堆：压力管型和反应堆压力容器型。除阿根廷的阿图察 1 号外，所有正在运行的重水堆都属于压力管型。在五座在建的重水堆中，除阿图察 2 号以外的所有重水堆也都属于压力管型。

97. 2011 年 1 月，加拿大核安全委员会完成了 ACR-1000 的项目前设计审查，使其成为完成了加拿大核安全委员会进行的这种设计审查的首座先进核动力堆。坎杜能源公司正在开发的 ACR-1000 采用极高的部件标准化和稍加浓铀对使用轻水作为一次冷却剂进行补偿。加拿大核安全委员会正在对 700 兆瓦（电）增强型坎杜-6 型设计进行项

目前设计审查。坎杜能源公司还正在开发一种坎杜超临界水冷堆。

98. 在印度，印度核电有限公司开发了 700 兆瓦（电）渐进型重水堆。目前有四座正在建造之中。巴巴原子研究中心正在最后确定 300 兆瓦（电）先进重水堆的设计，该反应堆将采用钍基燃料、非能动安全系统、重水慢化和在垂直压力管中装入沸轻水冷却剂。

#### **E.4. 气冷堆**

99. 目前在运的有 14 座先进气冷堆和一座镁诺克斯堆，全都在英国。

100. 在中国，一座被称为球床模块式高温气冷堆的工业规模模块式示范工厂正处在后期发展阶段。已经成立了业主公司，并且正在制造一回路系统压力容器、蒸汽发生器、反应堆内部构件和氦风机等部件。场址已经平整，一旦取得主管部门的批准便开始浇注第一灌混凝土。

101. 大韩民国正在通过“核能产氢开发和示范项目”发展产氢能力。目前正在实施利用超高温反应堆发展产氢关键技术的研究与发展项目。该项目侧重于将超高温反应堆与硫碘热化学工艺、高温金属和石墨材料数据、高压硫碘工艺、三层各向同性燃料制造和验证以及计算机程序和设计方法结合起来。

102. 在南非，球床模块式反应堆项目于 2010 年被放弃。球床模块式反应堆（私营）有限公司仍然存在，并将至少维持到 2013 年。该公司目前的作用是维护该项目的知识产权并为未来的客户和供应商的合作制订适当的战略。

103. 在美国，2012 年 2 月，“下一代核电站”工业联盟有限公司宣布选择阿海珐公司的高温气冷堆概念作为“下一代核电站”的最佳设计。该联盟的成员公司打算在有关高温气冷堆技术的设计、建设和运行方面开展合作。阿海珐的概念是每个模块约 625 兆瓦（热）的棱柱形燃料高温气冷堆。

#### **E.5. 快堆**

104. 运行中的快堆有两座，即中国的 20 兆瓦（电）实验快堆和俄罗斯联邦的 560 兆瓦（电）BN-600。还有两座正在印度和俄罗斯联邦建造。

105. 中国实验快堆是一种池式钠冷快堆。中国还正在开发实验快堆-1000，即利用混合氧化物燃料的 1000 兆瓦（电）钠冷快堆示范厂。

106. 根据“欧洲战略能源技术计划”，欧洲委员会最近确定了发展快堆的双轨技术路径。第一轨是选择钠冷快堆，第二轨是选择铅冷快堆和气冷快堆作为长期替代方案。相关示范和实施计划即“欧洲可持续核工业倡议”预计发展法国钠冷快堆原型堆，即 ASTRID，并分别建造采用铅冷技术和气冷技术的两个示范厂，即 ALFRED 和 ALLEGRO。该计划还得到了比利时快能谱超临界辐照设施“MYRRHA”提供的支助。



107. 印度正在建造卡尔帕卡姆 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆，并计划于 2013 年初进行调试。印度的计划预计大约在 2020—2025 期间建造若干快中子增殖堆（快堆）机组，并在 2025 年后发展采用金属燃料和具有较高增殖比的快堆。

108. 作为其“快堆循环技术项目”的一部分，日本一直在开发 1500 兆瓦（电）日本钠冷快堆，而大韩民国正在开展广泛的研究和发展计划，以支持 600 兆瓦（电）钠冷快堆，即“韩国先进液态金属反应堆”（KALIMER）。

109. 俄罗斯联邦正在目前运行 BN-600 的场址上建造 BN-800。BN-800 的调试阶段定于 2014 年开始进行。俄罗斯联邦最近启动了一项新计划，以发展先进钠冷快堆（BN-1200）、铅冷却 BREST-OD-300 和铅-铋共晶体冷却 SVBR-100、相关燃料循环和新型多用途研究用钠冷快堆（MBIR）。

## **E.6. 核燃料循环和配套技术的发展**

110. 正在研究供用于轻水堆的新型水法和非水法乏燃料后处理技术，这些技术将使得能够显著减少废物产生量。为试验和优化这些开发中的技术，正在进行建立试验性工业示范设施的工作。

111. 关于高放废物处置，目前正在为调查适当场址和特定专设屏障、开展安全评定及利用封装和处置技术进行发展工作。

## **F. 与扩大核能和技术发展有关的合作**

112. “第四代国际论坛”通过系统性合同和协议，对 2002 年选取并在“第四代核能系统技术路线图”中说明的六类下一代核能系统的研究活动进行协调。这六类系统是气冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆、钠冷快堆、超临界水冷堆和超高温反应堆。它们代表了各种反应堆、能量转换和燃料循环技术。依各自的技术成熟度的不同，预计这些系统将在 2015 年至 2030 年期间或以后时期可供商业使用。“第四代国际论坛”目前有 13 个成员。<sup>20</sup>

113. 原子能机构的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”有 37 个成员<sup>21</sup>。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”有四个项目：(1) 国家长期核能战略；(2) 全球核能假

---

<sup>20</sup> 阿根廷、巴西、加拿大、中国、欧原联、法国、日本、大韩民国、南非、瑞士、俄罗斯联邦、英国和美国。

<sup>21</sup> 阿尔及利亚、阿根廷、亚美尼亚、白俄罗斯、比利时、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、捷克共和国、埃及、法国、德国、印度、印度尼西亚、以色列、意大利、日本、约旦、大韩民国、哈萨克斯坦、马来西亚、摩洛哥、荷兰、巴基斯坦、波兰、俄罗斯联邦、斯洛伐克、南非、西班牙、瑞士、土耳其、乌克兰、美国、越南和欧洲委员会。

想方案；(3) 技术和制度创新；(4) 政策和“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”对话论坛。

114. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”通过涵盖下列领域合作的一个联合行动计划对活动进行协调：一般信息交流；评价方法中的协同作用（侧重于抗扩散性、安全性和经济性）；专题研究中的合作（除其他外，特别包括非电力应用、中小型反应堆和人力资源）；核技术持有者与使用者之间的全面对话；以及联合开展的活动，如 2011 年 11 月举行的“原子能机构/革新型核反应堆和燃料循环国际项目/第四代国际论坛第二次钠冷快堆安全问题联合讲习班。作为该联合行动计划的一部分，原子能机构作为观察员参加了“第四代国际论坛”政策组并作为成员参加了该论坛的各工作组。

115. “核能合作国际框架”的成员数已扩大到 31 个参加国<sup>22</sup>、30 个观察员国和三个观察国际组织，包括原子能机构。“国际核能合作框架”目前有两个工作组，一个是基础结构发展工作组，另一个是可靠燃料服务工作组。

116. “多国设计评价计划”于 2006 年由美国核管会和法国核安全管理局发起实施。截至 2012 年 4 月，“多国设计评价计划”的成员包括了 11 个国家<sup>23</sup>的国家监管当局。该计划集中了这 11 个核监管当局的资源，首先用于在具体反应堆设计的安全评审问题上开展合作；其次用于探讨统一监管实践的机会。“多国设计评价计划”有五个工作组，即欧洲压水堆工作组、AP-1000 工作组、规范和标准工作组、数字仪器仪表和控制工作组以及设备供应方检验合作工作组。

---

<sup>22</sup> 阿根廷、亚美尼亚、澳大利亚、保加利亚、加拿大、中国、爱沙尼亚、法国、德国、加纳、匈牙利、意大利、日本、约旦、哈萨克斯坦、肯尼亚、大韩民国、科威特、立陶宛、摩洛哥、荷兰、阿曼、波兰、罗马尼亚、俄罗斯联邦、塞内加尔、斯洛文尼亚、阿联酋、乌克兰、英国和美国。

<sup>23</sup> 加拿大、中国、芬兰、法国、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、南非、英国和美国。