

第五十一届常会

临时议程项目 17  
(GC(51)/1)

## 2007 年核技术评论

总干事的报告

### 概 要

- 为响应成员国的要求，秘书处每年编写一份综合性的“核技术评论”。本报告重点阐述 2006 年的主要发展情况。
- 《2007 年核技术评论》评述了以下领域：动力应用、先进的裂变和聚变、原子数据和核数据、加速器和研究堆的应用、放射性同位素应用和辐射技术、粮食和农业领域的核技术、人体健康以及水和环境。可通过 [www.iaea.org](http://www.iaea.org) 网站查阅与《2007 年核技术评论》相关的其他资料，这些资料以英文提供，涉及革新型中小型反应堆设计和技术开发方面的进展；当前类型动力堆核燃料发展趋势；可持续发展：通往可持续发展委员会 2007 年会议（可持续发展委员会第十五届会议）之路；抗辐射反应堆堆芯结构材料的开发；放射性药物的生产和供应；农业用水效率；核技术和同位素技术的作用；同位素用于了解海洋和气候变化。
- 有关国际原子能机构核科学技术活动的资料亦可参阅原子能机构《2006 年年度报告》(GC(51)/5)，特别是其中的“技术”部分，还可参阅《2006 年技术合作报告》(GC(51)/INF/4)。
- 对该文件已作修改，以便尽可能考虑理事会的具体意见和从成员国收到的其他意见。

## 目 录

正文摘要.....	1
A. 动力应用.....	3
A.1. 当今的核电.....	3
A.2. 核电的预期增长.....	5
A.3. 燃料循环前端.....	7
A.4. 乏燃料和后处理.....	8
A.5. 废物和退役.....	9
A.6. 影响核电未来的其他因素.....	10
A.6.1. 可持续发展与气候变化.....	10
A.6.2. 经济性.....	10
A.6.3. 安全性.....	11
A.6.4. 抗扩散性.....	12
B. 先进的裂变和聚变.....	12
B.1. 先进的裂变.....	12
B.1.1. 轻水堆.....	12
B.1.2. 重水堆.....	14
B.1.3. 气冷堆.....	14
B.1.4. 液态金属快堆.....	14
B.1.5. 加速器驱动系统.....	15
B.1.6. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”.....	16
B.2. 聚变.....	16
C. 原子数据和核数据.....	17
D. 加速器和研究堆的应用.....	18
D.1. 加速器.....	18
D.2. 研究堆.....	18
E. 放射性同位素应用和辐照技术.....	21
E.1. 放射性同位素在健康领域的应用.....	21
E.2. 辐射技术.....	21
E.2.1. 聚合物的辐射接枝.....	21
F. 粮食和农业领域的核技术.....	23
F.1. 利用同位素跟踪污染物.....	23
F.2. 作物改良.....	23
F.3. 提高牲畜的繁殖力和健康.....	24
F.4. 利用昆虫不育技术防治虫害.....	24
F.4.1. 利用昆虫不育技术防治果蝇.....	25
F.4.2. 利用昆虫不育技术防治螺旋虫.....	25
F.4.3. 利用昆虫不育技术防治蚊虫.....	26
F.5. 食品质量和安全.....	26
F.5.1. 安全监测：测量杀虫剂残留物.....	26

G.	人体健康.....	26
G.1.	核心脏病学方面的进步 .....	26
G.2.	放射疗法的当前技术水平 .....	27
G.3.	营养学 .....	28
H.	水和环境.....	28
H.1.	用于水资源管理的同位素数据 .....	28
H.2.	海洋环境和陆地环境 .....	29
H.2.1.	海洋沉积物中放射性粒子的微量分析 .....	29
H.2.2.	支持海产品安全的放射性示踪剂 .....	30
H.3.	大气污染监测 .....	31
H.4.	大气圈中的氦 .....	31
H.5.	参考材料和分析质量 .....	32



# 2007 年核技术评论

## 总干事的报告

### 正文摘要

1. 2006 年是核电领域的活动不断增加的一年。一些国家宣布了大规模扩展核电的计划，而另外一些国家则宣布了采用核电的计划。去年伊始，由于预计到核电在全世界将出现实质性扩展，俄罗斯联邦和美利坚合众国先后公布了各自的国际燃料循环建议。1 月，俄罗斯总统弗拉基米尔·普京概述了关于建立“一个在非歧视性基础上并在原子能机构控制下提供包括浓缩服务在内的核燃料循环服务国际中心系统”的建议。2 月，美国提出了关于“全球核能伙伴关系计划”的建议，目的是开发不分离纯钚的先进循环技术；开展国际合作向同意不进行浓缩和后处理的国家供应燃料；开发在消耗再循环乏燃料的同时提供能源的先进堆以及适应发展中国家需求的安全可靠的小型反应堆。
2. 国际原子能机构和国际能源机构新作的中期预测描绘了大力扩展核能的景象，尽管这一景象仍然带有相当大的不确定性。一些国家纷纷宣布了大规模扩展的计划，它们是：中国、印度、日本、巴基斯坦、俄罗斯联邦和大韩民国。美国的公司和财团对已计划的许可证审批申请所作的宣布中提到了约 25 座新反应堆。在加拿大，提出了两项场址准备申请。英国开展的一项大型能源审查活动的结论是，新建核电站将为实现英国的能源政策目标作出重要贡献。爱沙尼亚、立陶宛和拉脱维亚的电力公司发起了对为这三个国家提供服务的一座新核电厂的联合可行性研究。白俄罗斯、埃及、印度尼西亚、尼日利亚和土耳其则宣布了它们正在为各自的第一座核电厂所采取的步骤。
3. 全世界到 2006 年底共有 435 座核动力堆在运行，发电总量达到 370 吉瓦（电）。在这一年中，两座新反应堆并入电网，八座反应堆退休，导致 2006 年全球核发电容量略有 1443 兆瓦（电）的净增加（其中考虑了现有反应堆的提高出力情况）。开工建设项目有三个，加上俄罗斯联邦的一座核电厂复工建造，到 2006 年底在建的核发电总容量为 23 641 兆瓦（电）。
4. 部分由于对核电日益增长的预期推动，铀的现货价格 2006 年继续上升，达到 2000 年历史低点的九倍。年度勘探费用增长幅度自 2001 年以来超过三倍。
5. 巴西开始运行它在雷森迪的新浓缩设施。美国国家浓缩设施和法国乔治·贝斯 II 浓缩厂也已开工建设。日本新的六所村后处理厂的调试工作 3 月开始了最后试验。

6. 美国废物隔离中间工厂这个世界上惟一正在运行的地质处置库收到美国环境保护署自该工厂 1999 年开始运行以来第一次换发的新的许可证。法国通过了新的立法，确定了为旨在于 2025 年前启用的一个深部地质处置库和 2020 年前开始运行的一座原型堆申请许可证的目标，以便除其他任务外，特别检验长寿命放射性同位素的嬗变情况。瑞典核燃料和废物管理公司 SKB 申请作为实现最终处置的第一步在奥斯卡港建立一个封装厂。

7. 关于先进堆的设计，美国核管理委员会于 2006 年对西屋公司开发的具有非能动安全系统的 AP-1000 设计进行了认证。随着白俄罗斯、日本、哈萨克斯坦和斯洛伐克的加入，原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员增加到 28 个，而“第四代国际论坛”的成员数也由于中国和俄罗斯的加入增加到 13 个。继成员国完成可用来评价和选择革新型核能系统的发展方法学之后，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”已经步入第二阶段。该项目第二阶段将探索体制和基础结构创新方案，以便将革新型核系统引入成员国，以及在成员国中开展革新型核系统联合评定和协作项目。“第四代国际论坛”的成员 2006 年签署了四个“系统安排”，涉及就钠冷快堆系统、气冷快堆系统、超高温气冷堆系统和超临界水冷堆系统开展协作。上述安排规定了“第四代国际论坛”成员国参加各种技术的合作研究与发展的框架。

8. 为了支持在研究、能源和核医学治疗用放射性核素生产领域的核应用活动，各国对更精确的原子数据与核数据库的需求日益增加。随着对正电子发射断层照相法采用的正电子发射装置的需求不断上升，放射性同位素在医学保健领域的应用也日益增多。

9. 关于辐射处理、辐射化学以及聚合物生产和使用的三大国际会议表现了对辐射技术的兴趣。聚合物辐射接枝提供了适合于从燃料电池到医学和生物技术的一系列广泛用途的低成本制造技术。

10. 核技术和同位素技术继续在粮食和农业的诸多领域发挥重要作用。正愈来愈多地利用同位素特别是武器试验时代留下的沉降放射性核素跟踪土壤污染物。作物育种诱变技术正受益于经过改进的基因组测序方法，创造了增加耐受恶劣条件作物品种的可能性。由于利用稳定同位素更好地了解了动物营养摄入状况，并同时优化喂养方法，牲畜繁殖力正因此得到提高。昆虫不育技术的应用范围正在扩大，而且还报告已经取得了一些成功以及建立了新的不育昆虫繁殖设施。

11. 新的成像技术正在带来核心脏病学的进步，目前已经可以在非常早期阶段就进行疾病评估。这种成像技术与复杂的计算机技术结合起来正在促进放射治疗的迅速发展，除带来其他好处外，还使得既能给随着患者的呼吸而运动的器官准确施用剂量，同时又能减少附近健康组织接受的剂量。在营养学领域，由于可用于评定机体组分和婴儿母乳摄取情况分析设备使用的增加，利用稳定同位素技术的计划正因此而受益。

12. 加强对水循环的了解是水资源可持续管理中的一个关键要素。测量不同水源（雨水、地下水等）中的同位素含量有助于了解水循环和气候，因此，各国正在加紧努力

拓宽获得同位素数据的范围。这种努力将进一步加强提供国家或地方同位素数据解释工具的“全球降水同位素网”。

13. 在环境研究方面，放射性示踪剂为分析海洋生物体对有毒金属的吸收情况提供了一种成本效益好的工具，从而推动了海产品的安全研究和质量改进。对空气污染物进行的确定其成分和来源的研究也在利用核技术，如 X-射线荧光和中子活化分析，而对天然存在的放射性气体氡进行的测量正越来越多地用于开展大气研究，从而推动了世界气象组织“全球大气观测计划”的实施。

## A. 动力应用

### A.1. 当今的核电

14. 全世界到 2006 年底共有 435 座核动力堆在运行，发电总量达到 370 吉瓦（电）（见表 A-1）。2006 年，核电提供了全世界大约 15% 的电力。

15. 2006 年有两座新反应堆并网，一座在中国，一座在印度。相比之下，2005 年有四座新反应堆并网（加上一座闲置反应堆重新并网），2004 年有五座反应堆并网（加上一座反应堆重新并网）。2006 年有八座核动力反应堆退休：两座在保加利亚、四座在英国、一座在斯洛伐克、一座在西班牙。而 2005 年有两座退休，2004 年有五座退休。在考虑了现有反应堆的提高出力后，结果是全球核发电容量在 2006 年期间略有 1443 兆瓦（电）的净增加。

16. 2006 年开工建设的核动力堆有三座：中国的岭澳 4 号机组（1000 兆瓦（电））和秦山二期 3 号机组（610 兆瓦（电））以及大韩民国的新古里 1 号机组（960 兆瓦（电））。此外，俄罗斯的 Beloyarsk-4 号机组也复工建设。

17. 与 2006 年有三座反应堆开工建设和 Beloyarsk-4 号机组恢复建设相比，2005 年有三座反应堆开工建设，另有两座复工建设。2004 年有两座反应堆开工建设，另有两座复工建设。

18. 目前的扩展以及近期和远期的发展前景仍集中在亚洲。如表 A-1 所示，在 29 座在建反应堆中，有 17 座在亚洲。截至 2006 年底已并网的 36 座反应堆中有 26 座在亚洲。

19. 在美利坚合众国，核管理委员会（美国核管会）已批准另外八个许可证各延长 20 年（每座核电厂的许可寿期总计达到 60 年），从而使截至 2006 年底已批准许可证延长的总数达到 47 个。在荷兰，政府已批准 Borssele 核电厂许可证延长 20 年，使其许可寿期总计达到了 60 年。政府还规定了新建核电厂的条件，这表明该国已经转向逐步取消早期核电厂的政策。法国核安全管理局有条件地允许法国电力公司的 20 座 1300 兆

瓦（电）压水堆增加 10 年的运行期，这使其目前的许可寿期总计达到了 30 年。在加拿大，莱普罗角电力公司收到了被延长三年至 2011 年的许可证。

**表 A-1. 全世界正在运行和建造中的核动力反应堆**  
**（截至 2007 年 1 月 1 日）<sup>a</sup>**

国 家	运行中反应堆		在建反应堆		2006 年 供应的核电量		截至 2006 年 的总运行经验	
	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	太瓦· 小时	占总发电量 的百分数	年	月
阿根廷	2	935	1	692	7.2	6.9	56	7
亚美尼亚	1	376			2.4	42.0	32	8
比利时	7	5 824			44.3	54.4	212	7
巴西	2	1 901			13.0	3.3	31	3
保加利亚	2	1 906	2	1 906	18.2	43.6	141	3
加拿大	18	12 610			92.4	15.8	528	1
中国	10	7 572	4	3 610	51.8	1.9	66	7
捷克共和国	6	3 323			24.5	31.5	92	10
芬兰	4	2 696	1	1 600	22.0	28.0	111	4
法国	59	63 260			429.8	78.1	1 523	2
德国	17	20 339			158.7	31.8	700	5
匈牙利	4	1 755			12.5	37.7	86	2
印度	16	3 577	7	3 112	15.6	2.6	267	7
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	55	47 587	1	866	291.5	30.0	1 276	8
大韩民国	20	17 454	1	960	141.2	38.6	279	8
立陶宛	1	1 185			7.9	72.3	40	6
墨西哥	2	1 360			10.4	4.9	29	11
荷兰	1	482			3.3	3.5	62	0
巴基斯坦	2	425	1	300	2.6	2.7	41	10
罗马尼亚	1	655	1	655	5.3	9.0	10	6
俄罗斯联邦	31	21 743	5	4 525	144.6	15.9	901	4
斯洛伐克	5	2 034			16.6	57.2	118	7
斯洛文尼亚	1	666			5.3	40.3	25	3
南非	2	1 800			10.1	4.4	44	3
西班牙	8	7 450			57.4	19.8	245	6
瑞典	10	9 097			65.1	48.0	342	6
瑞士	5	3 220			26.4	37.4	158	10
乌克兰	15	13 107	2	1 900	84.9	47.5	323	6
英国	19	10 965			69.4	18.4	1 400	8
美利坚合众国	103	99 257			788.3	19.4	3 188	2
总计 <sup>b, c</sup>	435	369 682	29	23 641	2 660.9	15%	12 599	1

a 资料来源于原子能机构“动力堆信息系统”（<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>）

b 说明：总计包括中国台湾的下列数据：

— 六台机组，4921 兆瓦（电）在运行；两台机组，2600 兆瓦（电）在建；

— 核发电量为 38.3 太瓦·小时，占 2006 年总发电量的 19.5%；

— 到 2006 年底 152 年零 1 个月的总运行经验。

c 总运行经验还包括意大利（81 年）和哈萨克斯坦（25 年零 10 个月）的已关闭电厂。

## A.2. 核电的预期增长

20. 2006 年，原子能机构出版了截至 2030 年的最新核电发展预测<sup>1</sup>，国际能源机构也在其《2006 年世界能源展望》中发表了对该时期的最新预测<sup>2</sup>。原子能机构提供了对核电的高值和低值预测。《2006 年世界能源展望》则提供了一个参考假想方案，外加一个备选假想方案，后者假设需要另外采取措施，以加强能源安全和减少二氧化碳排放。

21. 2005 年，国际能源机构出版了一份补充研究报告，其中提出了七种截至 2050 年的假想方案<sup>3</sup>。它们当中包括一个基准假想方案和六个“加速技术假想方案”。“加速技术假想方案”研究了限制全球二氧化碳排放增长和石油消费增长或扭转其势头的各种技术选择方案。因此，这三份出版物加在一起共提出了 11 种假想方案。图 A-1 汇总了它们对核电的预测。

22. 在图 A-1 中，原子能机构的低值预测假定，除目前在建或已明确计划的核电厂外将不建造任何新核电厂，并且老核电厂将按计划退休。在这个预测中，核发电量到 2020 年将仅增至 3100 太瓦·小时（每年 1.1%），并且到 2030 年基本保持不变。原子能机构的高值预测除业已明确进行的那些核项目外，还纳入了其他合理的计划之中或建议的核项目。它表明，到 2030 年，核发电量将稳步增长至 5040 太瓦·小时（每年 2.6%）。

23. 这些全球综合数据掩盖了地区性差异，特别是低值预测。在低值预测中，西欧的核发电量在 2005 年至 2030 年期间下降了近 60%，因为预测的机组退休速度始终超过新建速度。但远东的核发电量将增长 80%，东欧将增长近 50%。在高值预测中，所有地区的核发电量均出现增长。在这两种预测中，新建数量最大的依次为远东、东欧、北美和中东/东南亚。

---

<sup>1</sup> 国际原子能机构《直至 2030 年的能源、电力和核电预测》，《参考数据丛书》第 1 号，原子能机构，维也纳，2006 年 7 月。

<sup>2</sup> 国际能源机构《2006 年世界能源展望》，国际能源机构，巴黎，2006 年。

<sup>3</sup> 国际能源机构《直至 2050 年的能源技术展望：假想方案和战略》，国际能源机构，巴黎，2006 年。

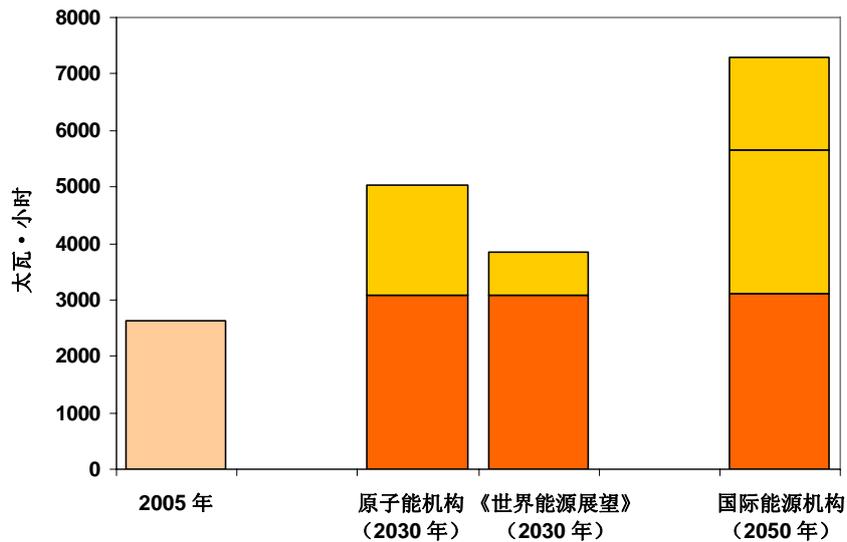


图 A-1. 2005 年全球核发电量以及三项研究对 2030 年至 2050 年这段时间的预测值  
(深橙色 = 低值, 黄橙色 = 高值, 米黄色 = 历史值)。

24. 《世界能源展望》中的参考假想方案是一种“业务一切正常的”假想方案，是以现行政策和当前趋势将会延续下去为基础的。在这一假想方案中，预测的核发电量几乎完全与原子能机构的低值预测相同。在备选假想方案中，预期加强能源安全和减少二氧化碳排放的措施将会极大地推动核电生产，但如图所示，这种推动力又不足以达到原子能机构的高值预测水平。

25. 对于国际能源机构的 2050 年假想方案，在图 A-1 的右边，预测范围的低值是由基准假想方案和“低核假想方案”确定的。它们实质上是《世界能源展望》2006 年参考假想方案的延伸。预测范围的高值是根据 TECH Plus 假想方案确定的，该方案设想燃料电池、可再生能源、生物燃料和核电的价格将会加速下降。在这一假想方案中，核发电量实质上将同于原子能机构高值预测的速度持续增长至 2050 年，其在全球总发电量中的比例将达到 22%。国际能源机构的其他四种假想方案均处于图中黑条水平的上下，约为 5650 太瓦·小时，或自 2005 年起平均增长率为 1.7%。

26. 总体而言，这些新的预测和假想方案展示了这样一种景象，即取得巨大核发展的机会很多，但不确定性也非常大。2006 年的一些发展显示，对核电的持续兴趣很可能在不久将导致建设数量增加。这些发展包括 2006 年日本和俄罗斯联邦宣布的扩展计划及中国、印度、大韩民国和巴基斯坦以前宣布的扩展计划；包括美国公司和财团已宣布打算提出的大量综合许可证申请，这些申请共计列出了大约 25 座新反应堆；包括加拿大的两项场址准备申请以及英国的能源评论得出的结论，即新核电站将为满足英国的能源政策目标作出重要贡献；包括爱沙尼亚、立陶宛和拉脱维亚的电力公司就新建一座核电厂以服务于这三个国家而启动的一项联合可行性研究，也包括白俄罗斯、埃及、印度尼西亚、尼日利亚和土耳其宣布的它们为建设其第一座核电厂而正在采取的步骤。

### A.3. 燃料循环前端<sup>4</sup>

27. 由于部分受到对核电重燃兴趣的驱动，2006年铀现货价格持续攀升。到2006年底每磅八氧化三铀达到72美元，是2000年12月现货历史最低价格的10倍以上。<sup>5</sup> 勘探和矿山开发开始随之发展，在2001年至2005年期间，勘探支出的增长超过了三倍。

28. 经合组织核能机构和原子能机构2006年出版的《2005年铀资源、生产和需求》对全球铀资源所作的最新估计表明，虽然可能能够提供大量铀资源，但预计将需要大力开发矿山，以便将“地上的铀转变为桶里的黄饼”。表A-2概括了世界常规铀资源的潜在可利用时间。对于当前的轻水堆一次通过式燃料循环和纯快堆燃料循环，该表估计了在设想核发电量保持在2004年水平情况下常规铀资源的可利用时间。

表 A-2. 铀可供核电使用的时间<sup>6</sup>

反应堆/燃料循环	以2004年世界核发电量计的已确定常规资源的可利用年数	以2004年世界核发电量计的全部常规资源的可利用年数	以2004年世界核发电量计的全部常规和非常规资源的可利用年数
当前的轻水堆一次通过式燃料循环	85	270	675
纯快堆再循环燃料循环	5000—6000	16 000—19 000	40 000—47 000

29. 2006年，铀浓缩是国际不断关注的焦点。与铀的情况一样，分离功单位的价格已经上升，在2001年至2006年期间增长了约45%。在2013年以后，由于“美利坚合众国政府和俄罗斯联邦政府关于从核武器移出的高浓铀处置协定”<sup>7</sup>将按计划完成，市场需求很可能超过预定的能力水平，而且在近期核电厂建设快速增加的情况下这一时间还可能会提前。能够确定在目前这些已明确计划的能力之外还会进一步大幅度增加能力，特别是在核电容量增长加速的情况下，分离功单位的价格和铀价将持续攀升。

<sup>4</sup> 补充资料可通过IAEA.org网站在“Nuclear Technology Review 2007”下获得。有关原子能机构燃料循环前端活动的更详细资料可见最新的《国际原子能机构年度报告》相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>)。

<sup>5</sup> 但是，大部分铀按长期合同购买，在2000年至2005年期间，中长期铀价仅增长了20—40%。

<sup>6</sup> 表A-2最后一行中的数值假定除后处理和燃料制造期间少量易裂变材料损耗外，快堆基本上能够将铀-238增殖为燃料钚-239。所得出的数值高于《2005年铀资源、生产和需求》的一个类似表格中给出的估计值。后者的估计值假定并非所有铀-238都能增殖为燃料钚-239。

<sup>7</sup> 该协定规定对源自俄罗斯已拆除核弹头的武器级铀进行稀释，并再循环成主要在美国核电厂使用的燃料。

30. 巴西雷森迪设施的正式启用；美国国家浓缩设施和法国乔治·贝斯 II 浓缩厂的开工建设；阿根廷、澳大利亚和南非宣布的复兴或发展国家浓缩计划的规划以及通用电气公司购买澳大利亚希勒斯系统公司先进的激光铀浓缩技术产权等都是越来越关注铀浓缩的实例。与此同时，普京总统关于建立“一个在非歧视基础上并在原子能机构控制下提供包括浓缩服务在内的核燃料循环服务的国际中心系统”的建议、俄罗斯联邦和哈萨克斯坦随后在安加尔斯克建立一个国际铀浓缩中心，以及确保在因政治问题中断供应的情况下供应浓缩铀的若干其他建议都证明了各国发展新型国际核燃料循环方案的意愿。

31. 在此背景下，在原子能机构第五十届大会期间作为专题活动举办了“21 世纪核能利用的新型框架：供应保证和防扩散保证”国际会议。这次专题活动的“主席报告”忆及了通过可能扩大核能的利用来满足全球不断增长的能源需求，并同时最大程度地减少铀浓缩和钚后处理等敏感核技术的进一步扩散所产生的扩散危险而面临的挑战。这次会议审议了近期以来就核燃料循环新方案提出的一些有益建议，这些新方案旨在建立有保证的核燃料供应，作为在某些情况下对商业市场的一种后备措施。会议还讨论了最近提出的关于作为一个多边框架的长期和广泛发展进程的一个阶段确保铀基核燃料供应的建议，该多边框架可包括天然铀与低浓铀和核燃料的保证供应机制以及乏燃料管理。与会者认识到，建立一个对所有核能用户平等和均可利用并按照商定的防止核扩散准则运作的全面发展的多边框架将是一种复杂的尝试，可能需要采用一个分阶段方案。预期秘书处在制订其建议时将考虑这次会议的讨论结果，以供原子能机构理事会在 2007 年进行审议。

#### **A.4. 乏燃料和后处理<sup>8</sup>**

32. 世界各地的反应堆乏燃料年卸料量每年总计约 10 500 吨重金属。目前正在对乏核燃料采取两种不同的管理战略。第一个战略是对乏燃料进行后处理（或贮存以待今后进行后处理），以提取可用材料（铀和钚）来制造新的混合氧化物燃料。全世界卸出的乏燃料约有三分之一已经进行了后处理。第二种战略是考虑将乏燃料作为废物，并进行贮存以待处置。基于目前在安全和有效贮存乏燃料方面积累的 50 多年的经验，对湿法和干式贮存技术及其在对所有高放废物实施最终处置前处理不断增加的废物量的能力具有很高的信心。

33. 迄今，中国、法国、印度、日本、俄罗斯联邦和英国对其大多数乏燃料进行后处理，或实施贮存以待今后进行后处理。加拿大、芬兰、瑞典和美国目前选择直接处置。然而，美国在 2006 年 2 月宣布了“全球核能伙伴关系”，其中包括开发在美国使用的先进再循环技术。

---

<sup>8</sup> 有关原子能机构乏燃料和后处理活动的更详细资料可见最新的《国际原子能机构年度报告》相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）。

34. 大多数国家仍未决定采取哪种战略。它们目前正在贮存乏燃料，并在密切跟踪与上述两种选案相关的发展情况。

35. 2006 年，日本新的六所村后处理厂的调试工作于 3 月开始最后试验，预期需要 17 个月。六所村工厂的最终产品是混合氧化物粉末，并于 11 月首次进行了生产。商业规模的混合氧化物粉末生产预期在 2007 年下半年进行。该厂的最大后处理能力将是每年 800 吨铀，足以后处理日本乏燃料年产量的 80%。在中国，对该国第一个实验后处理厂的非放射性调试已经完成。新型再循环工艺的开发工作也在进行，如美国在不分离出纯铀的情况下再循环乏核燃料并制造添加进分离超铀元素的燃料以供先进快中子燃烧堆使用的雷克斯法。

36. 2006 年，在比利时、法国、德国和瑞士的 30 多座压水堆和两座沸水堆上以商业规模装入了约 180 吨民用来源的混合氧化物燃料。混合氧化物燃料组件在堆芯中所占份额从 25%到 50%不等。预期在 2010 年日本计划启动在 16 座至 18 座动力堆中装入混和氧化物燃料的“热铀”计划之前，对混合氧化物燃料的需求不会有实质性增加。在印度，约 50 个混合氧化物燃料棒束最近在一座加压重水堆（PHWR 220）中进行了试验性辐照。

37. 2006 年 8 月，比利时核燃料公司的迪塞尔混合氧化物燃料厂停产，计划到 2013 年完成退役。因此，现在还剩下法国和英国两个重要的混合氧化物燃料制造厂。

## A.5. 废物和退役<sup>9</sup>

38. 芬兰、瑞典和美国的处置库计划仍然是最完备的，但它们都没有可能在 2020 年之前较早的时间里将处置库投入运行。世界上一个正在运行中的地质处置库是美国的废物隔离中间工厂。它从 1999 年起开始接收研究和核武器生产活动产生的长寿命超铀废物，但从未接收过民用核电厂的废物。2006 年，美国环境保护署核准了废物隔离中间工厂 2004 年递交的第一次换证申请。换证时间要求每五年一次。法国关于乏燃料管理和废物处置的新立法规定，作为法国的政策，需要对乏燃料进行后处理和对可用材料进行再利用，同时还规定将深地质处置作为解决高放长寿命放射性废物的参考办法。该立法确定了在 2015 年之前为可逆深地质处置库申请许可证和在 2025 年之前开放该设施的目标。该立法还要求在 2020 年之前将第四代原型快堆投入运行，以便除其他任务外，特别检验长寿命放射性同位素的嬗变（另见第 60 段）。同样在 2006 年，英国放射性废物管理委员会得出结论认为，对英国而言，在选定处置库场址以前，最佳处置方案是能够进行“可靠的中间贮存”的深地质处置。

39. 11 月，瑞典核燃料和废物管理 SKB 公司向瑞典核电管理局提出了在奥斯卡港建设一个封装厂的许可申请。该封装厂是使用 KBS-3 方法实现最终处置的第一步。这种方

---

<sup>9</sup> 有关原子能机构废物和退役活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）。

法是将燃料封装在铜制密封容器内，然后存放到深约 500 米的岩床中。最终裁决预计到 2009 年后才会作出，因为已定于在这一年提交建设最终深地质处置库的申请。目前正在东哈马尔市的福什马克附近和奥斯卡港的拉克马地区进行最终处置库的场址调查。

40. 在美国，Big Rock Point 核电厂场址于 2006 年完成退役，并恢复绿地状态。因此，截至 2006 年，世界各地已有九座核电厂全部完成退役，有关场址已解除监管，供无条件使用。17 台机组已部分拆除并安全关闭，30 台机组正在实施场址最终解除监管之前的拆除，30 台机组正在进行长期封闭之前的最低程度拆除。

## **A.6. 影响核电未来的其他因素**

### **A.6.1. 可持续发展与气候变化<sup>10</sup>**

41. 联合国可持续发展委员会 2001 年第九届会议首次讨论了能源问题，所有各方均同意，“是否选择核能取决于各国自己。”虽然可持续发展问题世界首脑会议重申了这一结论，但可持续发展委员会仍将能源议题列入了其第十四届和第十五届会议的议程。2006 年可持续发展委员会第十四届会议是一次“审议会议”，它分析了能源政策变化和技术进步对实现可持续发展方面的进展的影响。2007 年 5 月举行的可持续发展委员会第十五届会议是一次相应的“政策会议”，这届会议没有就有关核能问题的新文本达成一致意见，使得可持续发展委员会第九届会议和可持续发展问题世界首脑会议作出的相关决定成为可持续发展委员会有关能源的有效协议。

42. 《京都议定书》于 2005 年 2 月生效，它要求大多数发达国家在“第一个承诺期”（2008—2012 年）限制其温室气体排放。不同的国家为满足《京都议定书》对其规定的限值采取了不同的政策。核电尽管温室气体排放量低，但并非处处都对其有益，然而从较长远观点看，限制温室气体排放将使核电越来越具吸引力。对于第一承诺期之后的减排，2005 年《联合国气候变化框架公约》缔约方会议第十一届会议决定设立特别工作组展开讨论。该工作组已在 2006 年 5 月和 11 月以及 2007 年 5 月三次举行会议。目前，讨论仍处于初期阶段，尚未开始涉及具体事项，如核电项目当前被排除在“清洁发展机制”之外的问题和“联合执行”问题。

### **A.6.2. 经济性**

43. 核电厂具有“前期投资密集”的费用结构，即建造费用相对昂贵，但运行费用相对便宜的特点。因此，现有运行良好的在运核电厂仍然是普遍具有竞争性效益的电力来源。但就新建电厂而言，核电的经济竞争性取决于可利用的替代能源，取决于一国

---

<sup>10</sup> 可从 IAEA.org 网站《2007 年核技术评论》的相关文件中查阅补充资料。有关原子能机构在能源相关可持续发展与气候变化方面活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）和 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>。

的总体电力需求及核电在市场结构和投资环境中的增长速度，取决于环境限制，以及取决于可能的政治和监管上的滞后或变化所带来的投资风险。因此，经济竞争性因国而异，因具体情况而不同。

44. 在日本和大韩民国，由于替代能源的成本相对较高，核电的竞争力上升。在印度和中国，迅速增长的能源需求促使它们发展所有的能源选择方案。在欧洲，由于电力和天然气价格较高以及根据《欧洲联盟排放贸易机制》实施的温室气体排放限制，建造新核电厂的经济理由更加充足。在美国，2005年的《美国能源法》使建造新核电厂的经济理由大为增加。过去，由于低成本的煤和天然气充足，没有温室气体排放限制，而且由于缺乏向新核电厂建设发放许可证的近期经验而存在着投资风险，因此，建造新核电厂一直不具有投资吸引力。“能源法”的规定，包括贷款担保、由政府支付与某些可能的许可证审批延迟相关的费用以及对最高 6000 兆瓦（电）的前期核电容量实施生产税减免，使核电公司和财团有了充足的经济理由，它们立即宣布它们有可能提出可能在美国新建 25 座反应堆的联合许可证申请。

### A.6.3. 安全性<sup>11</sup>

45. 核电营运者联合会公布的并复载于图 A-2 和 A-3 中的安全指标在 20 世纪 90 年代得到了明显改进。但是，最近几年一些领域的改进却止步不前。业绩最佳者与最差者之间的差距也仍然很大，为继续改进提供了相当大的空间。

46. 原子能机构的年度“核安全评论”（GC(51)/INF/2 号文件）更详尽地介绍了与所有核应用活动有关的安全信息和最新发展。

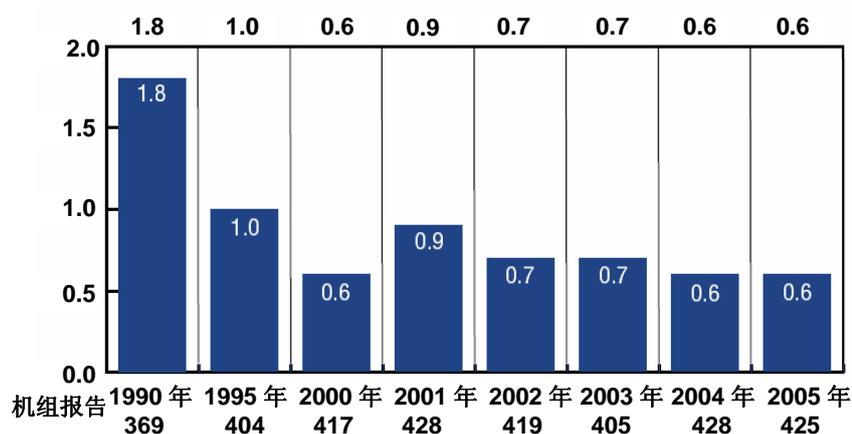


图 A-2. 每 7000 小时临界非计划紧急停堆次数。资料来源：核电营运者联合会 2005 年性能指标。

<sup>11</sup> 有关原子能机构核安全活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）和 <http://www-ns.iaea.org/>。

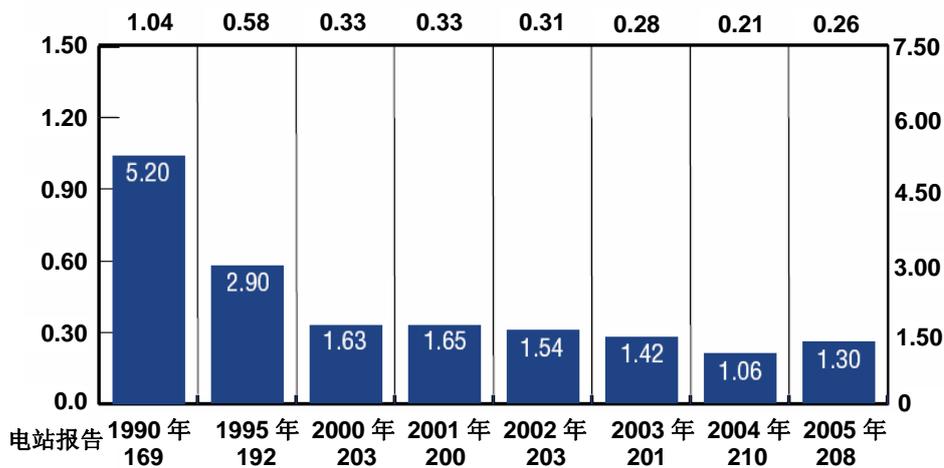


图 A-3. 核电厂每工作 20 万人·小时 (左边刻度尺) 和每工作 100 万人·小时 (右边刻度尺) 的工业事故数量。资料来源: 核电营运者联合会 2005 年性能指标。

#### A.6.4. 抗扩散性<sup>12</sup>

47. 在 2005 年《不扩散核武器条约》审议会上, 总干事提出了加强防扩散制度的七个步骤: 重申消除核武器的目标; 加强原子能机构的核查权限; 对燃料循环中具有扩散敏感性的部分实施更好的控制; 保护和控制核材料 (如加强《核材料实物保护公约》和尽量减少高浓铀的民用); 以实际行动证明核裁军承诺; 加强《不扩散核武器条约》履约机制; 以及处理各国的实际安全关切。“21 世纪核能利用的新型框架: 供应保证和防扩散保证”会议对更严格控制核燃料循环中扩散敏感性部分的问题进行了讨论, 讨论概述见 A.3 部分。

## B. 先进的裂变和聚变

### B.1. 先进的裂变<sup>13</sup>

#### B.1.1. 轻水堆

48. 在法国和德国, 阿雷瓦核能公司开发出了欧洲大型压水堆, 目的是满足欧洲电力公司的要求, 并通过高于法国 (N4 系列) 和德国 (Konvoi 系列) 最新系列压水堆的功率水平从规模经济中受益。在德国, 阿雷瓦核能公司正与来自芬兰、法国、荷兰和瑞

<sup>12</sup> 有关原子能机构抗扩散和保障活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) 和 <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>。

<sup>13</sup> 可从 GovAtom 网站《2007 年核技术评论》的相关文件中查阅补充资料。有关原子能机构先进裂变堆活动的更详细资料可见最新的“年度报告”相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>)。

士的国际合作伙伴一道开发 SWR-1000 的基础设计（一种具有非能动安全设施的先进沸水堆）。

49. 在日本，先进沸水堆机组享受到标准化和系列建造的好处。首批两台先进沸水堆机组于 1996 年和 1997 年开始商业运营，2005 年和 2006 年又有两台机组开始商业运营。中国台湾目前正在建造两台先进沸水堆机组。先进沸水堆 II 型的开发计划于 1991 年开始实施，其目的是部分地通过增加功率和规模经济大幅度减少发电成本。预计第一台先进沸水堆 II 型机组将在 2010 年晚些时候进行调试。同样在日本，已经为日本原子动力事业团的文殊-3 和文殊-4 两台机组完成了大型先进压水堆的基础设计，更大型的先进压水堆（APWR+）正处在设计阶段。

50. 在大韩民国，韩国标准核电厂（KSNP）系列机组正在获得标准化和系列建造的好处。韩国标准核电厂已有八台机组投入商业运营。积累的经验成为韩国标准核电厂经过改进的优化动力堆发展的基础，第一批机组按计划将于 2010 年和 2011 年投入商业运营。1992 年开始研制的韩国下一代反应堆现在被命名为“先进动力堆 1400”（APR-1400），其规模将更大，以受益于规模经济。第一台 APR-1400 型核电机组计划于 2012 年开始运行。

51. 在美国，1997 年对大型先进压水堆（燃烧工程公司的系统 80+）和大型沸水堆（通用电气公司的先进沸水堆）的设计进行了认证，并分别于 1999 年和 2006 年对西屋公司配备了非能动安全系统的 AP-600 和 AP-1000 型的设计进行了认证。由西屋公司牵头的一个国际小组正在开发模块式一体化 360 兆瓦（电）“国际反应堆的革新与安全项目”（IRIS）设计，其堆芯设计能够做到在四年燃料循环的基础上运行。规定的目标是 2008—2010 年进行设计认证。通用电气公司正在设计将经济规模与模块式非能动安全系统结合起来的“欧洲简化沸水堆”。无论“国际反应堆的革新与安全项目”设计还是“欧洲简化沸水堆”的设计目前都在接受监管评审。

52. 在俄罗斯联邦，目前 WWER-1000（V-320）机组的渐进型包括 1200 兆瓦（电）的 AES-2000 型设计和 WWER-1000 型（V-392）。第一台 WWER-1000 型（V-392）机组于 2006 年在中国田湾并入电网。中国、印度和伊朗伊斯兰共和国则正在建造新的机组。已计划在俄罗斯的诺夫夫洛尼兹场址建造两台机组。俄罗斯还开始了更大型 WWER-1500 型的设计开发工作。7 月，俄罗斯和哈萨克斯坦成立了一家合营企业，目的是完成供浮动式或陆基核能热电联供厂采用的 200 至 400 兆瓦（电）VBER-300 型反应堆的设计开发工作。

53. 中国核工业集团公司已经开发了 AC-600 型的设计，目前正在开发用于电力生产的 CNP-1000 型设计。中国核工业集团公司还在发展用于电力生产和海水淡化的 QS-600 型反应堆设计。

### **B.1.2. 重水堆**

54. 在加拿大，加拿大原子能有限公司的先进坎杜反应堆设计利用稍加浓铀燃料减少堆芯尺寸，这减少了反应堆慢化所需的重水量并允许利用轻水作为冷却剂。此外，作为“第四代国际论坛”的一部分，加拿大原子能有限公司正在开发一种利用超临界轻水冷却剂的革新型重水慢化设计。这种反应堆还将尽可能纳入非能动自然循环排热以及非能动安全壳排热。

55. 2005 年和 2006 年，印度在塔拉普尔将采用新的 540 兆瓦（电）重水堆设计的头两台机组并网。印度还在设计其渐进型的 700 兆瓦（电）重水堆，并且正在开发先进重水反应堆。这是一种具有非能动安全系统的重水慢化、沸轻水冷却、垂直压力管式反应堆，并经过优化以便使用钍燃料。

### **B.1.3. 气冷堆**

56. 全世界目前有 18 座运行中的二氧化碳冷却气冷堆，外加两座氦冷却试验堆。南非球床模块式反应堆有限责任公司正在开发 165 兆瓦（电）球床模块式反应堆，预计该反应堆将于 2010 年前后进行调试。南非政府已为该项目拨付启动资金，某些主要部件的订单也已经发出。在中国，10 兆瓦（热）高温气冷堆（HTR-10）的安全试验和设计改进工作继续进行，并制订了原型动力堆（HTR-PM）的设计和建造计划。

57. 在日本，一座 30 兆瓦（热）高温工程试验堆（HTTR）于 1998 年开始运行，氦生产装置的安全试验和耦合工作正在继续进行。建造一座 300 兆瓦（电）原型动力堆的问题也在考虑之中。

58. 俄罗斯联邦和美国继续研究和开发用于燃烧钷的 284 兆瓦（电）燃气轮机模块式氦反应堆（GT-MHR）。法国就气冷热堆概念和气冷快堆概念均制订了积极的研究与发展计划，而美国能源部则继续努力开展先进气冷堆燃料的资格认证工作。为了验证气冷快堆的关键技术问题，法国计划在 2017 年前后开始运行一座 50 兆瓦（热）级的试验堆。

### **B.1.4. 液态金属快堆**

59. 在中国，25 兆瓦（电）钠冷池式中国试验快堆正在建造之中。该反应堆预计在 2009 年年中首次达到临界，并于 2010 年年中并网。接下来的两个发展阶段将是设计工作已于 2005 年开始的一座 600 兆瓦（电）原型快堆以及 1000—1500 兆瓦（电）快中子示范堆。

60. 在法国，凤凰快堆在 2009 年关闭之前还将再运行四个辐照周期。它将进行辐照试验，以支持法国的嬗变研究与发展计划以及关于未来创新型设计的研究工作。在“第四代国际论坛”的框架内，法国计划在 2020 年前后调试一座 250—600 兆瓦（电）原型钠冷快堆，以验证经过改进的经济性和得到加强的安全特性。

61. 在印度，快中子增殖试验堆自 1985 年以来一直在运行，现在正在卡尔帕卡姆建造一座 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆。该增殖堆预定在 2010 年 9 月前进行调试。

62. 在日本，2005 年开始了筹备工作，以便对 280 兆瓦（电）原型快中子增殖堆“文殊堆”在其重新启动前对其作必要的改造。为了发展先进燃料和材料以及用于少量锕系元素燃烧和嬗变的技术，实验性快增殖堆“卓越堆”将开始对氧化物弥散强化铁素体钢、含 5% 镅的铀钚混合氧化物燃料和同时含有镓镅的混合氧化物进行辐照。

63. 在大韩民国，韩国原子能研究所开展了有关 600 兆瓦（电）KALIMER-600 先进快堆概念的研究、技术开发和设计工作，并于 2006 年完成了概念设计。从 2007 年起，钠冷快堆技术的开发工作将在第四代钠冷快堆协作项目框架内进入一个新的阶段。

64. 俄罗斯的 BN-600 是世界上最大的在运快堆，现已运行了 26 年。800 兆瓦（电）的 BN-800 型快堆正在建造中，计划于 2012 年进行调试。俄罗斯还在开发关于先进钠冷快堆和液体重金属冷却堆的各种概念，特别是铅冷 BREST-OD-300 型反应堆概念和铅-铋共晶体冷却 SVBR-75/100 型反应堆概念。

65. 美国正在“全球核能伙伴关系”的框架内实施先进燃烧试验堆的初步研究与发展计划，以验证锕系元素嬗变以及对以后的商业示范厂具有重要意义的革新型技术和设计特征。在“第四代国际论坛”范围内，美国开展活动的重点是气冷快堆、铅冷快堆和小型模块式钠冷快堆。

### **B.1.5. 加速器驱动系统**

66. 与次临界核反应堆相结合的粒子加速器具有比其他反应堆少生产长寿命放射性废物和嬗变锕系元素和某些长寿命裂变产物的潜力。

67. 在中国，研究与发展活动侧重于高能质子加速器物理学和技术、外源驱动的次临界堆芯反应堆物理学、核数据和核材料研究。在日本，日本原子能署建议采用额定功率为 800 兆瓦（热）铅-铋共晶体冷却快中子临界堆芯，并已开始嬗变实验设施的概念设计研究。在大韩民国，韩国原子能研究院的加速器驱动系统混合动力萃取堆的研究与发展活动正处在 1997 年开始实施的 10 年计划的第三阶段。该阶段包括完成混合动力萃取堆堆芯的概念设计和继续研究关键技术。

68. 在欧洲，比利时、法国、德国、意大利、西班牙和瑞典的国家研究与发展计划正集中于验证加速器驱动系统概念中的基础概念。其中包括欧洲联盟框架计划范围内的 EUROTRANS 和 EUROPART 这两个综合项目。EUROTRANS 正在制订初步设计方案，并支持发展适合于欧洲加速器驱动系统示范装置的技术。EUROPART 正在发展与 EUROTRANS 系统技术相匹配的燃料循环技术。

69. 在俄罗斯，加速器驱动系统最近研究与发展计划的突出重点包括在联合核子研究所发展和建造杜布纳次临界装置，以及充实莫斯科库尔恰托夫研究院俄罗斯研究中心采用闭合核燃料循环的临界和次临界熔盐堆概念。

### **B.1.6. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”**

70. 随着白俄罗斯、日本、哈萨克斯坦和斯洛伐克的加入，原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员 2006 年增加到 28 个。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”提供了一个研究核电选择方案和相关要求的国际性公开论坛。它有助于逐步建立发展和部署革新型核能系统的能力，并帮助成员国协调相关协作项目。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”已经发展出一套既适合于发展中国家也适合于发达国家从经济性、安全性、环境、废物管理、抗扩散、实物保护和基础结构方面评定革新型核能系统的方法学。目前正在对革新型核能系统进行 11 项评定。第二阶段的活动于 2006 年开始，内容包括根据来自目前开展的评定研究的反馈意见进一步发展“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的方法学和用户手册，以及确定便于部署创新型核能系统的创新型体制和基础结构方案，其中包括：审议地区方案，统一许可证审批程序和安全要求，以及制订侧重发展中国家需求的新筹资方法。第二阶段还将协调协作项目，包括确定研究与发展需求。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”还将特别确定用户对革新型核能系统（侧重于中小型反应堆）的共同要求，并与技术拥有者和使用者一道确定开发和布署这类反应堆需要采取的行动。

71. 2006 年，“第四代国际论坛”的成员数目由于中国和俄罗斯的加入而增加到 13 个。“第四代国际论坛”通过签订系统合同和协议对 2002 年选择的六类下一代核能系统的研究活动进行了协调，“第四代核能系统技术路线图”将这六类核能系统描述为：气冷快堆、铅合金液态金属冷却堆、熔盐堆、钠液体金属冷却堆、超临界水冷堆和超高温气冷堆。“第四代国际论坛”感兴趣的成员 2006 年签署了四个“系统安排”，涉及就钠冷快堆系统、气冷快堆系统、超高温气冷堆系统和超临界水冷堆系统开展协作。上述安排规定了“第四代国际论坛”成员参加各种技术的合作研究与开发的框架。

### **B.2. 聚变**

72. 随着将自持燃烧等离子体确定为下一个重大目标，受控核聚变研究正在取得稳步进展。近年来，通过在被称之为惯性约束的方法中同时使用激光和辐射，或者在俗称为托卡马克的系统中采用磁场约束来约束和熔化轻核、氘和氚，在实现上述目标方面已经取得了重要进展。大型新设施目前正在建造之中，采用磁性约束最突出的一个设施是国际热核实验堆。参加建造世界上最大的聚变实验设施这种独一无二的国际科学努力的合作伙伴代表了世界一半以上的人口。国际热核实验堆各参与方于 2006 年 11 月 21 日签署了关于承诺在法国卡达拉什建设国际热核实验堆的两个正式协定：“关于成立联合实施国际热核实验堆项目国际热核实验堆国际聚变能组织的协定”和“联合实施国际热核实验堆项目国际热核实验堆国际聚变能组织特权和豁免协定”。原子能机构总干事担任了这两项协定的保存人，而这两项协定将在接下来的一年中在各自国家的首都完成批准程序。ITER（国际热核实验堆）一词在拉丁语中的意思是“大道”，这种实验堆是和平利用核聚变的一个重要阶段，并将推动大多数下一代磁性约束聚变研究，同时逐步建立起建造被称之为“DEMO”的聚变电厂的科学技术。

73. 惯性约束是主要的替代方案，将受到目前正在设计或建造的若干主要设施或计划的支持，即美国的“国家点火装置”、法国的“兆焦耳激光装置”和日本的“高速点火实验计划”。

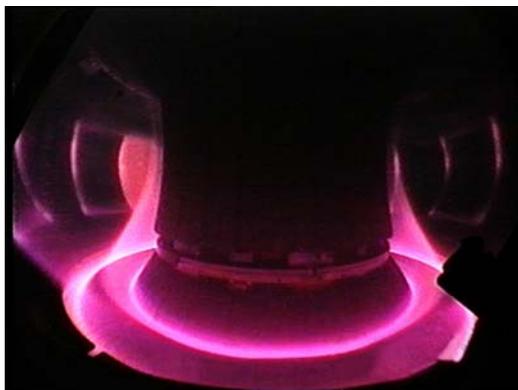


图 B-1. 聚变等离子体诊断（德国 ASDEX 改进型托卡马克装置中的辉光等离子体）。

74. 开发聚变能仍然需要克服难以克服的技术上的挑战，这种挑战无论从科学上、技术上还是从其对资源的要求来看都极为严峻，因此，任何一个国家或者小的国家集团都无法长期保持必要的研究势头。原子能机构提供了一个有助于促进国际合作的论坛，10 月在中国成都召开的“2006 年聚变能大会”就证明了这一点。来自 39 个国家的 700 多名从事聚变的科学家和工程师出席会议并交流了最新发展情况和成果。

75. 实验性聚变研究严重依赖于监测和分析等离子体特征的能力（图 B-1）。原子能机构倡议建立的诊断用新数据库是朝着确保这种研究在国际公认的程序和数据的基础上进行而迈出的重要一步。已经对若干电荷交换过程的新截面进行了测量和（或）计算，以估算出等离子体的温度和压力。

## C. 原子数据和核数据

76. 更多的国家正在对最新的和更精确的原子数据库和核数据库不断提出要求，这些数据库对于确保可靠和可信地分析各种核应用活动是非常必要的。国际热核实验堆项目的核准产生了对聚变研究活动同样增加的需求。

77. 大量高质量数据库的开发工作和建立需要原子能机构予以支持和鼓励。最近几年采取的重要国际和国家主动行动包括 2005 年 5 月经合组织核能机构汇编和发布的 JEFF-3.1（裂变和聚变联合编评）数据库以及 2006 年 12 月美国汇编和发布的 ENDF/B-VII（核数据编评文件）数据库。这两个数据库都载有推荐的核数据，这些数据收入了通过近来的直接测量、原子能机构数据发展项目和反映对广泛的核过程增进了解的模拟研究所取得的进展。因此，由于美国和欧洲全面测量的结果，取得了继续改进各种重要中子反应截面质量的成果。

78. 2006 年的进展包括完成了钷-铀燃料循环研究中直接使用的高质量中子截面数据库、中子截面标准的全面重新编评、聚变等离子体诊断用原子数据和分子数据，以及核医学中治疗放射性核素的最佳生产用截面数据库。为了量化钷-232 以及镭-231 和 232 截面的不确定性，生产了重要的协方差数据，这些数据文档已迅速被国家和国际核应用数据库所采用。同样，中子截面标准数据库也已被核物理学界所采用。这些数据对选定的一套反应进行了重新编评，为所有后续的核数据测量和这些重要核参数的编评提供了基础和基准。

## D. 加速器和研究堆的应用

### D.1. 加速器

79. 材料科学和生物医学研究正在推动着加速器、新型分析技术和改进核仪器仪表领域的发展。在低能领域，正在开发和利用专用于放射性碳加速器质谱测定应用的小型低压仪器。在这种能级的另一端，很多用户对同步加速器光源提出了越来越多的需求。目前正在对以下同步加速器进行调试：英国的 Diamond、法国的 Soleil 和澳大利亚的澳大利亚同步加速器。约旦的 SESAME、印度的 Indus-2 和亚美尼亚的 Candle 正处在设计或建造阶段。对强中子束源有着广泛的需求，以便应用于生物医学和材料研究以及在先进裂变堆和聚变堆的极端运行环境中使用的潜在材料的辐射损伤研究。

### D.2. 研究堆

80. 大多数研究堆的主要应用仍然是放射性同位素生产、中子束应用、硅掺杂和核能系统的材料辐射以及为人力资源发展提供教学和培训。在研究堆的特征和能力及其运行和利用方面有着广泛的多样性。表 D-1 和表 D-2 以及图 D-1 和图 D-2 都是基于在原子能机构研究堆数据库中获得的数据。

81. 在《2006 年核技术评论》所报告的在建新研究堆中，澳大利亚开式水池轻水反应堆于 2006 年 8 月 12 日首次达到临界，并于 2006 年 11 月 3 日实现了 20 兆瓦的满功率运行。中国先进研究堆按计划将在 2007 年底以前投入运行，其主要活动是放射性同位素生产、硅掺杂和中子束应用。摩洛哥的铀氢锆 II 型反应堆正处于调试阶段。

82. 澳大利亚开式水池轻水反应堆是一座使用低浓铀燃料（铀硅化物燃料）和水冷却的 20 兆瓦水池型反应堆。该堆是一座将用于放射性同位素生产、辐射服务和中子束研究的多功能研究堆，其紧凑堆芯设计的目的是实现高效率中子生产。在澳大利亚开式水池轻水反应堆上计划安装八个中子束仪器。该设施可进一步扩展，并具有增加第二个中子导向厅的潜力。一套设备将使得能够在不同温度、压力和磁场下开展研究。

83. 上述这些设施预期在分时的基础上对国家和国际用户开放，类似于法国格勒诺布尔的那些设施和德国的 FRM-II 设施。

84. 随着对核能重新表现出的兴趣和聚变能的发展，研究堆的材料研究应用继续受到高度关注。因此，研究堆将在先进反应堆材料开发方面发挥至关重要的作用。此外，通过地区协作和网络化，研究堆的更有效管理、利用以及资源和专门知识共享正方兴未艾，特别是在满足地区需求的中子束应用和放射性同位素生产方面尤其如此。

**表 D-1. 按研究堆功能状况分列的研究堆的地域分布**

	在运	关闭	退役	在建	计划建造	合计
非洲	9	1	0	1	1	12
美洲	66	127	73	2	1	269
亚洲及太平洋	55	18	10	6	1	90
欧洲	115	96	87	1	1	300
合计	245	242	170	10	4	671

**表 D-2. 按研究堆功率水平分列的在运研究堆的地域分布**

	功率≤100 千瓦	0.1 兆瓦< 功率≤1 兆瓦	1 兆瓦<功率 ≤10 兆瓦	功率>10 兆瓦	合计
非洲	2	2	2	3	9
美洲	30	19	13	4	66
亚洲及太平洋	23	6	15	11	55
欧洲	65	11	18	21	115
合计	120	38	48	39	245

85. “降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”寻求将使用高浓铀燃料的研究堆转换为使用低浓铀燃料。到 2006 年底，已有 48 座研究堆转换为使用低浓铀燃料，还有约 50 座研究堆在可获得低浓铀燃料的情况下能够实现这种转换。但是，对于若干特定的研究堆，需要甚高密度铀-钼燃料才能从高浓铀转化为低浓铀，特别是对于某些高端运行而言尤其如此。这类燃料的开发对于发展研究堆乏燃料管理的后端方案也非常有益，因为这类燃料将可利用当前的现行技术和设施进行后处理。就此而言，必须继续对高密度低浓铀燃料开发和认证方面的国际合作给予支持。20 世纪 90 年代开始的甚高密度铀-钼弥散的初始辐照试验确定了这些燃料很有前景的辐照行为。在不同国家随后进行的实验确定了在高功率和高温下燃料行为的缺陷。详细的辐照后检查表明，燃料性能问题不是铀-钼燃料颗粒性能差所产生的，而是辐照过程中在燃料和铝基体之间形成的反应层的膨胀行为所致。对甚高密度低浓燃料的需求要求制订一个详尽的燃料制造开发、堆外表征、辐照试验、辐照后检查以及燃料性能评价和模拟的计划。可以采用若

干可能的补救办法来纠正已知的燃料性能问题：这些办法从相对小修小改到用另一种材料替代铝基体或完全除去这种基体（块状燃料）的燃料和基体化学变化。目前，阿根廷、加拿大、法国、德国、大韩民国、俄罗斯和美国正在对所有这些差异情况开展合作研究。最近所报道的不同实验的辐照后结果表明，在铀-钚弥散燃料的铝相中加入大约 2%至 5%的硅能够有效地解决在高功率和高温下的膨胀问题。目前正在为开发甚高密度块状铀-钚燃料进行深入研究。

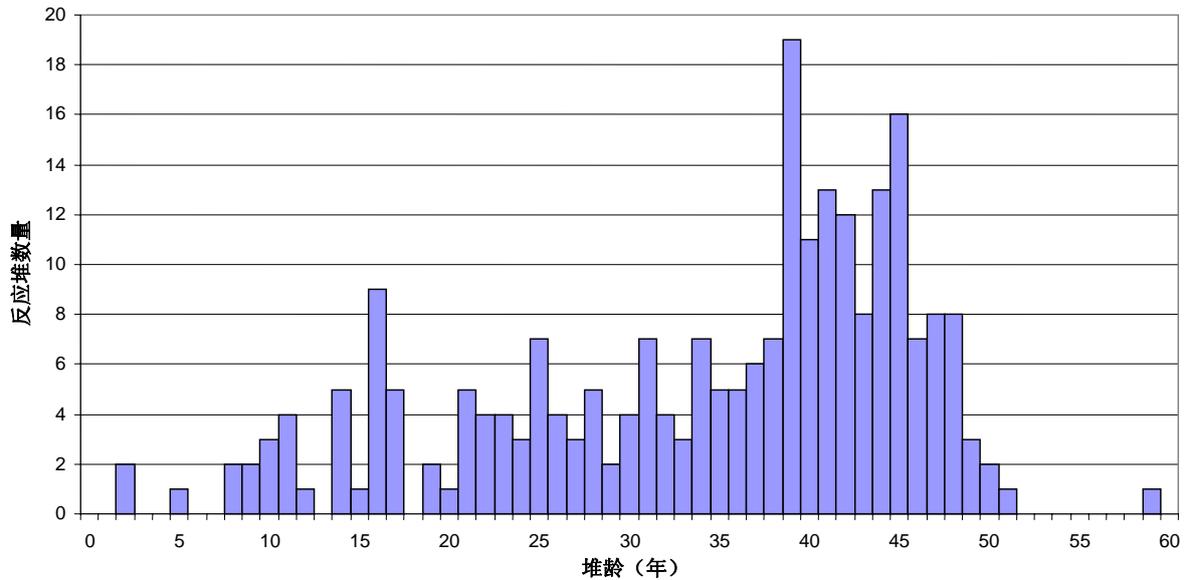


图 D-1. 正在运行的研究堆的堆龄分布。

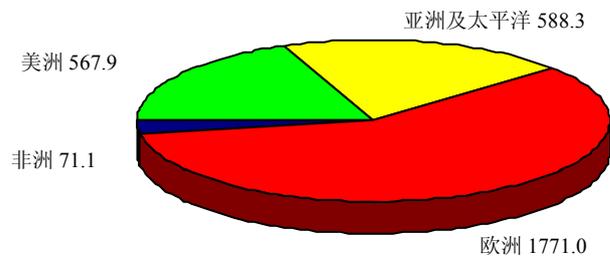


图 D-2. 以兆瓦计的在运研究堆的装机容量（合计为 2938.2 兆瓦）。

## E. 放射性同位素应用和辐照技术

### E.1. 放射性同位素在健康领域的应用<sup>14</sup>

86. 放射性同位素正在为改善大多数国家的卫生保健作出显著贡献。在全球范围内，例如在诊断核医学和放射性核素治疗领域，涉及使用同位素的医疗程序的数量有所增长，需要各种同位素程序的数量也随之相应增加。世界各地有 60 多座研究堆在医学放射性同位素的生产方面发挥着至关重要的作用，有至少 11 座反应堆正在一些国家建造或计划建造。正如原子能机构最近进行的调查<sup>15</sup>所表明的那样，估计还有约 350 个回旋加速器正在利用，大多专用于生产正电子发射断层照相使用的同位素。

87. 最近，在同位素需求方面增长最为显著的是：氟化脱氧葡萄糖（FDG/<sup>18</sup>FDG）形式的回旋加速器生产的氟-18，用于正电子发射断层照相法探测应用以及对各种类型癌症进行分期和治疗随访；反应堆生产的放射性核素治疗用镭-177，用作例如治疗神经内分泌肿瘤的标记肽或减轻骨痛的标记磷酸盐。此外，对放射性核素治疗用铪-90 也有很大的需求，从而对分离和纯化来自乏燃料的母体放射性核素铯-90 的兴趣日益增加。随着医学中心正电子发射断层照相装置的增加，对可从放射性核素发生器获得的正电子发射放射性核素特别是锆-68/镓-68 的兴趣也不断增加。获得这类发生器不仅将有助于没有回旋加速器的中心开展正电子发射断层照相研究，而且还增强了用镓-68 产品进行正电子发射断层肿瘤成像的信息质量。由于铜-64/铜-62 用于正电子发射断层成像和剂量测定的优点，对铜放射性同位素的兴趣也一直有增无减。

### E.2. 辐射技术

88. 2006 年举行了三次重要的国际会议，它们分别是辐射加工国际会议、第十一届提哈尼辐射化学专题讨论会和第七届电离辐射和聚合物国际专题讨论会。这些会议涵盖了辐射技术的基础和应用的各个方面，其中广泛讨论了聚合物的辐射接枝问题。辐射为接枝提供了一种非常有利的技术手段，接枝的定义是在另一种材料的主链上嫁接或生长出一种不同材料的能力。

#### E.2.1. 聚合物的辐射接枝

89. 研究和发展工作的当前趋势表明，聚合物辐射接枝目前有三个主要发展方向，即吸附剂、薄膜以及用于医学和生物技术。对聚合物材料而言，这种“不同”材料最典型的是一个单体，而“主链”是一种聚合物或另一种固体。在被接枝部分和材料之间形成一个化学键。下图 E-1 是日本评价包括聚合物接枝在内的辐射加工工业应用的一个实例。

---

<sup>14</sup> 可从 IAEA.org 网站《2007 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

<sup>15</sup> 《成员国用于放射性核素生产的回旋加速器指南》，2006 年，原子能机构-DCRP/CD。

## 聚合吸附剂

90. 接枝聚合作用在工业上用于金属离子和恶臭气体的吸附剂生产技术。通过利用预辐射接枝技术进行的金属离子吸附剂合成研究和发展已导致开发了能够用于消除砷、铅和镉等有毒金属离子以及回收铀和钷等金属的吸附剂。



图 E-1. 辐射加工工业应用的演进。

## 聚合薄膜

91. 燃料电池是一种用于各种固定和便携式应用很有前景的电源。燃料电池的性能在很大程度上取决于电池芯中的薄膜，该薄膜必须在温度升高时的不利氢氧环境中具有稳定性。薄膜起到防止反应性气体混合的分离膜作用，还作为一种从阳极向阴极传导质子的电解质。当前获得低成本质子传导聚合物电解质薄膜的最有前景的途径之一是利用辐射接枝技术。该方法允许使用可以适应特殊应用的各种广泛的基膜和单体。通过辐射接枝制造的薄膜由于使用商业廉价材料而提供了一种有成本竞争力的方案。

## 用于医学和生物技术的聚合物

92. 为再生医学目的，利用先进技术再造各种组织和器官的可能性受到了很大的关注。称为“细胞薄片工程”的一种方法利用通过对经电子束辐射的温度敏感性聚合物进行辐射诱发接枝制成的温度敏感性培养物表面。被接枝的聚合物的厚度和密度按纳米级精确调准。这些表面允许通过简单的温度调节以非侵入方式收获细胞。收获后的细胞薄片被用于包括眼表、牙周韧带、心脏膜片、食道和各种其他组织在内的各种组织再造。

## F. 粮食和农业领域的核技术

### F.1. 利用同位素跟踪污染物

93. 同位素技术和核技术在确定不同土地利用实践和农业活动所产生的污染物来源方面具有重要作用<sup>16</sup>。若污染物具体来源不明，则环境规划人员、农户或决策者在决定最适当的管理战略以减少污染物的影响时将面临困难。例如，为促进作物生长而施用的化肥和农家肥以及用于控制作物和牲畜疾病的杀虫剂如进入小溪、湖泊和河流，都可能成为污染物。在这些水环境中，它们会毒害鱼类，引起水道中的水草过度生长，并有可能影响娱乐活动，随后给旅游业造成经济损失。土壤、水或沉积物样品中的稳定同位素和沉降放射性核素都能够帮助精确确定集水区中这类农业污染物的来源。沉降放射性核素如铯-137、铅-210 和铍-7 系气载放射性核素沉降物，它们来自人类活动，如核武器试验和其他来源，主要是切尔诺贝利事故，还来自宇宙射线的自然碰撞。这些放射性核素沉降物附着在土壤颗粒中，因此可作为指纹，用于跟踪土壤颗粒从它们在农业集水区的源点至水道的运动。此外，农业集水区的化肥、农家肥、杀虫剂和放牧动物排泄的粪便都携带着明显的稳定同位素特征（如碳-13 和氮-15）。因此，由于不同的农业利用和动物放牧模式，一个集水区的各个具体区域可能有着截然不同的稳定同位素特征（自然生物标记物）。这些不同的标记物为环境土壤科学提供了一种“取证工具”，可用来核查水道中诸如硝酸铀、磷酸盐和杀虫剂之类的一系列污染物的来源。

94. 利用稳定同位素特征进行土壤研究还有助于认识气候变化。碳-13 和氮-15 等同位素可用作指纹，用来调查土壤是如何作为温室气体汇集地的。土壤中碳同位素和氮同位素情况的变化，可能反映土壤有机物受大气中温室气体水平和土地利用活动的变化的影响而发生的变化。

### F.2. 作物改良

95. 诱变在开发新的和改良的作物品种方面可发挥主要作用。在过去 10 年中，作物改良领域的诱变研究增加，范围进一步扩大，确定和认识特定基因的作用也被纳入了研究范围。

96. 目前正在利用这一技术开发营养品质更高包括其抗营养剂含量更少的作物品种。诱变引起的遗传变种会改变影响各种生物化学途径的基因的表现。例如，草酸钙（针状晶体化合物，见于各种有毒植物中）不是一种营养物质或有益的钙源，它在大剂量时会具有毒性。它存在于许多叶状且营养丰富的蔬菜中，包括菠菜、唐莴苣和其他食用蔬菜。通过诱变尽量减少草酸有可能使蔬菜变得更有营养和更易消化。

---

<sup>16</sup> 可从 IAEA.org 网站《2007 年核技术评论》的相关文件中查阅补充资料。

97. 目前正在调查宇宙射线的诱变效应及其在自然突变和自然演变中的作用。自 20 世纪 70 年代在阿波罗飞船执行第 16 次飞行任务时进行的首次国际实验调查宇宙射线对不同有机物的影响起，中国农业科学院启动了一项“太空育种计划”，该计划已培育出一系列新的作物突变体，包括能够抵抗水稻致枯真菌疾病的超高产水稻品种和具有水果般硕大体型的番茄和辣椒等蔬菜。

98. 辐射杂交制图是一种基于用致命剂量的  $\gamma$  辐射或 X 射线对体细胞进行辐照以便对染色体进行分段的技术。随后，通过将体细胞引入微细胞对其进行拯救，然后再将微细胞与适当的受体细胞相结合。开发这一技术是为了便利对人类染色体组进行排序，这一能够对全部染色体组进行制图的方法现已被转用于植物系统。业已开发出一些作物如大麦、玉米、小麦和棉花的辐射杂交图，供详细分析它们的染色体组和排列其染色体组的顺序之用，这将有助于确定和转移影响有用的农艺特征、质量特征和耐受性特征的基因，进而进行作物改良。

### **F.3. 提高牲畜的繁殖力和健康**

99. 在寻求繁殖和生产更多和更好的牲畜与牲畜产品的过程中，分子和核相关技术发挥了而且将继续发挥重要作用。利用办法包括对蛋白质、脱氧核糖核酸和核糖核酸进行识别、控制和表征及跟踪。磷成像和能够使样品-结果一步完成的微应用流体学等探测技术的发展以及纳米技术的利用，提供了在实验室和现场条件下引进和使用更敏感、更快速和更健全的装置的可能性。

100. 稳定同位素正越来越多地用于动物繁殖和健康应用。通过碳-13 或氮-15 标记饲料或将碳-13 或氮-15 标记化合物直接加入瘤胃（反刍动物的第一个胃），可深入了解碳水化合物的新陈代谢情况和蛋白质与营养物质的摄入情况。也可用生产的反刍动物肥料对碳和氮在土壤和植物中的去向进行绘图。这类信息有助于制订饲料最佳利用战略，也有助于提高整个繁殖系统的效率和可持续性。通过比较动物体内液体或产品中的稳定同位素特征和潜在饲料的稳定同位素特征，可以对饲料作出选择并记录发生的变化，还可通过这种比较将热带草类和其他饲料的摄入情况区分开来。这类信息还可用于非侵入性地确定动物产品的来源。这种办法将来有可能被用来确定野生动物作为动物疾病携带者可能扮演的角色，候鸟在禽流感从地方性疾病传播到非疫区的过程中所发挥的作用即属于这种案例。稳定同位素标记水（氧化氘）稀释技术正越来越多地被用来确定瘦体组织、脂肪含量、身体构成及小牛的体内水和奶总摄入量。传统上，体液中的氧化氘浓度用同位素比质谱测定法测定，但近来的研究显示，还可使用一种费用相对较低的技术，即红外谱测定法，而且其精确度相同。

### **F.4. 利用昆虫不育技术防治虫害**

101. 放飞不育昆虫的所有大面积昆虫防治计划目前都使用放射性同位素辐照器进行昆虫绝育，这是一项业经证明可靠的技术。但现有辐射源的换装及新辐射源的采购和国际运输正在出现问题，至少有一个主要生产商已完全退出市场。一种使用 X 射线辐照

的替代技术正在开发之中，巴拿马新建的一处防治螺旋虫设施将完全使用 X 射线实施昆虫绝育。今后，开发 X 射线设备并将其用于昆虫不育技术和相关计划的活动有可能大量增加。

#### F.4.1. 利用昆虫不育技术防治果蝇

102. 利用昆虫不育技术作为大面积虫害综合治理计划的一部分来防治主要农业虫害的活动继续扩大，2006 年，又有一些新设施开始运行。2006 年 9 月，在巴西巴伊省茹阿泽鲁一处地中海果蝇大规模饲养设施落成，它最初的专门任务是生产大约 1 亿只不育雄蝇。该设施的发展除其他外，特别得到了原子能机构技术合作计划的支助，它将为巴西干旱的东北地区圣弗朗西斯科河周围各灌溉区迅速扩大的商业水果（芒果、葡萄等）生产区提供服务。预计该设施将来扩大后，还会生产一些 *Anastrepha spp* 果蝇并进行大规模的果蝇拟寄生物饲养。在以环境友好的方式控制果蝇从而减少杀虫剂的应用方面，该项目潜力很大。最终目标是通过建立得到贸易伙伴正式确认的低果蝇流行区和无果蝇区，从而取消费用高昂的收获后处理环节。

103. 在西班牙，在主要的柑橘产区巴伦西亚，建立了另一处地中海果蝇饲养和不育设施，该设施将每周繁殖 4 亿只不育雄蝇。根据粮农组织/原子能机构粮食和农业领域核技术联合计划与巴伦西亚政府农业、渔业和粮食司之间的谅解备忘录，提供了技术支助。



阿根廷巴塔哥尼亚地区苹果和梨产区。

104. 美利坚合众国动植物卫生检验局现已正式确认阿根廷整个巴塔哥尼亚地区为该国的第一个无果蝇区。这一重大成功是联邦政府、省政府和水果行业 10 年共同努力的结果。国家组织和国际组织包括国家农业技术研究所、粮农组织和原子能机构对这一努力的技术支持，为这一成功作出了贡献。这一成就将使得巴塔哥尼亚可以向美国出口新鲜水果和蔬菜，而无需进行任何检疫处理。据国家食品安全和质量服务机构估计，这意味着每年可节省 200 万美元。继这一成功之后，农业、牲畜、渔业和粮食秘书处现已宣布，它已核准向阿根廷东北部面积为 5.6 万公顷的两个主要柑橘产区（恩特雷里斯省和科连特斯省）也涉及实施昆虫不育技术的一个新的果蝇防治计划提供启动资金。

#### F.4.2. 利用昆虫不育技术防治螺旋虫

105. 在巴拿马，一个饲养大约 1 亿只新世界螺旋虫蝇的新设施于 2006 年 7 月落成。在过去 30 年中，螺旋虫根除计划的成功有赖于墨西哥-美国根除螺旋虫委员会设在墨西哥恰帕斯州图斯特拉-古铁雷斯的大规模饲养设施，该设施向墨西哥、中美洲和加勒比

所有的根除计划提供了不育蝇。近年，虽然其繁殖量减少，但它还一直提供不育蝇用于维持巴拿马东部的不育蝇屏障，并向牙麦加正在进行之中的根除计划提供不育蝇。

### **F.4.3. 利用昆虫不育技术防治蚊虫**

106. 人们不仅有兴趣利用昆虫不育技术防治传播疟疾的按蚊，还有兴趣利用它防治传播重要病毒疾病的蚊虫如登革病毒和基孔肯亚病毒等。在意大利里米尼启动了一个防治登革病毒传播媒介 *Aedes albopictus* 的试验性昆虫不育技术试点项目。开发出了大量生产雄性虫蛹用于不育和放飞的方法。在里米尼的一个地区进行了大规模的不育雄蚊放飞，对这一病毒传播媒介的密度产生了实际的影响。这一种类的蚊虫也是近来印度洋岛屿特别是雷乌尼翁岛上爆发的一个主要流行病基孔肯亚热的罪魁祸首。

## **F.5. 食品质量和安全**

### **F.5.1. 安全监测：测量杀虫剂残留物**

107. 经验证的分析方法对于实施粮食安全监测计划至关重要。需要将这类方法在发展中国家的实验室中的实效和可适用性加以优化。此外，有关的实验室质量保证协议也要求在报告结果时对相关不确定性作出估计。原子能机构塞伯斯多夫实验室的农业化学品股协助制订了此类协议，以便在制定供监管计划用来分析粮食和环境样品中杀虫剂残留物和其他污染物的薄层层析法的过程中，利用放射标记化合物优化样品准备、萃取、清洁和分析步骤。协议还有助于估计与这些方法相关的测量不确定性。

## **G. 人体健康**

### **G.1. 核心脏病学方面的进步**

108. 核技术创新战略推动着核心脏病学领域实现了从对冠状动脉到心肌的血流量以及心脏将血液泵进主动脉的能力进行评定向分子成像的转变。将正电子发射断层照相-计算机断层照相混合系统中正电子发射断层照相扫描仪和现代计算机断层照相扫描仪提供的信息结合起来，现在可以在很早阶段就能对冠状动脉疾病进行评定。对于患有糖尿病、高血压和血脂水平高等疾病的患者而言，这种技术尤其具有重要的附加值。这种细胞一级复杂的结构和分子信息可用于对未来严重的甚至可能致命的心肌事件开展个人危险评定。开展个人危险评定后才可以提出关于改变生活方式的建议，或者进行早期医疗干预，从而滞缓心血管疾病过程和减少相关危险因素。

109. 从临床角度看，在心血管疾病的不同阶段对最适当诊断方式的选择将取决于临床处理的性质和所提出的具体问题。随着发达成员国和发展中成员国越来越重视预防和与之相伴随的人口老龄化，非侵入性心脏成像技术将继续进一步发展，并对全世界患有心血管疾病的患者的管理产生影响。

## G.2. 放射疗法的当前技术水平

110. 在放射治疗方面，通过正电子发射断层照相法/计算机断层照相法以及磁共振成像法实现的对肿瘤的认识和描述使得可以对放射治疗进行规划，以便既考虑到计算机断层照相扫描仪上观察到的解剖特征，又考虑到正电子发射断层照相和磁共振成像技术产生的分子成像。

111. 利用新技术开展放射治疗正变得越来越普遍。三维适形放射治疗包括虚模拟技术或计算机断层照相模拟技术以及三维治疗计划。这种疗法旨在通过对辐射束实行三维聚焦的方式使得辐射束产生的剂量分布与肿瘤体积的形状更加吻合。强度调制放射疗法便是从三维适形放射治疗逐步演变而来。首先由内科医师按照常规治疗方法具体列出剂量分布计划，然后采用十分精密的计算机算法算出各射束范围内射束方向和强度的最佳配置，以实现规定的剂量-体积分布。这一过程由配有多叶准直仪的直线加速器完成。一种被称为“射波刀”的机器采用机器人驱动的动作方式，能使高度聚焦的辐射束做到更精确。可以用强度调制放射疗法做出比用标准的三维适形放射治疗法可能更适形的剂量分布。这反过来又意味着可以极大地缩小暴露于高剂量的正常组织的体积。然而，尽管以极高的精度调节剂量分布的做法极大地减轻了放射治疗的负面影响（发病率），但与更简便的技术相比是否会治愈更多的癌症患者或延长其寿命，这一点仍有待观察。

112. 克服肿瘤和人体器官移动问题的方法也在迅速发展。由于呼吸、消化和患者每次治疗所处位置的微小差异，人体器官会在放射治疗期间以及不同治疗之间出现位移。这种位移可能导致对肿瘤周围的正常组织施用过度剂量，而对肿瘤本身却治疗不足。图像引导放射治疗技术涉及在治疗前以及治疗期间给躺在诊察台治疗位上的患者照相。这一技术用于确定肿瘤和器官位置移动情况并对位移进行跟踪，从而使得有可能将放射治疗调整到适合当前位置。结合与呼吸运动同步进行的用于调节治疗用辐射束开关的呼吸“门控”系统，这一技术可以在肿瘤与辐射束一致的情况下将治疗限制在呼吸循环部分，从而增加对肿瘤部分的剂量，减少周围组织接受的剂量。在综合断层照相治疗仪（见图 G-1）中，用直线加速器替代了 X 射线管，对患者的治疗以直线加速器围绕患者旋转进行，并利用二元多叶准直仪对辐射剂量进行调节。探测器自动记下直线加速器发出的穿过患者身体的辐射，并在进行治疗的同时生成质量很高的图像。由于所达到的精密程度，这一过程和图像引导放射治疗一般被称之为适应性放射治疗。

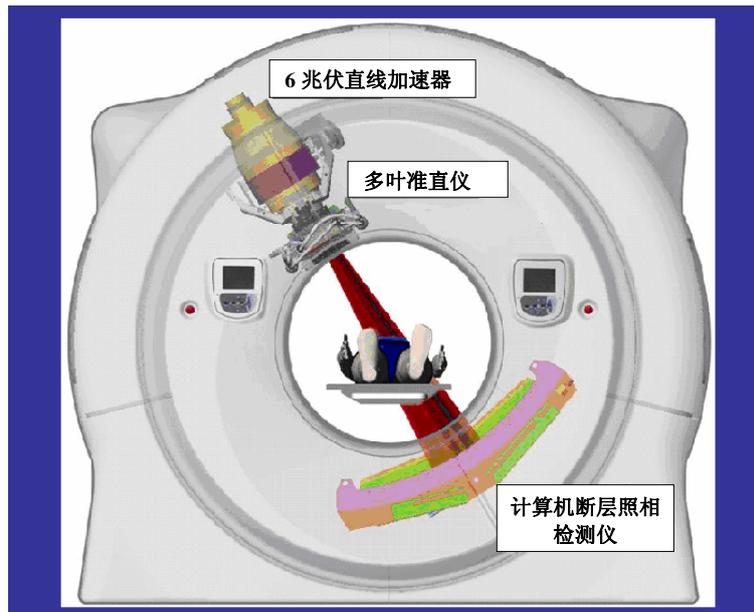


图 G-1. 断层照相综合治疗法。

### G.3. 营养学

113. 全球当前的状况显示，存在着对有效营养干预的紧迫需要，因为一方面，有 1.7 亿儿童体重不足，而且营养不良成为全世界超过一半儿童死亡中的一个重要因素，而另一方面，又有 10 多亿成年人体重超常。这通常被称之为“营养不良双重负担”现象。其结果是，对于在营养不良和传染性疾病仍很普遍的同时还越来越有必要治疗饮食相关疾病如心脏病和糖尿病的国家而言，它们的保健系统因此背上了沉重的负担。

114. 利用核技术特别是利用稳定同位素技术可有助于制定和评价营养干预措施。原子能机构在人体营养学的活动正特别重点关注在“机遇窗口”期即怀孕和生命头两年期间预防和治疗营养不良的重要性。

115. 在发展中国家更广泛地应用这种与营养计划有关的技术是应用营养学最新发展的一个实例。对分析设备如营养学项目专用的同位素质谱仪使用的增加将极大地促进在不久的将来增加对稳定同位素技术的应用。尤其令人关注的是霍氏转换红外光谱仪这种费用比较低廉设备的最新发展，这种设备可用于对氘（氢的一种稳定同位素）进行分析，从而评定身体成分和测定母乳喂养婴儿的母乳摄取情况。

## H. 水和环境

### H.1. 用于水资源管理的同位素数据

116. 地表水体和含水层中水资源的出现和分布在很大程度上由当时的气候体系所决定。增进对水循环和气候变化潜在影响的了解被认为是水资源可持续管理努力的一个

关键要素。降水、河流和地下水中的同位素含量特别是稳定氧和氢同位素以及氚有助于了解水循环和气候之间的关系。因此，同位素数据在揭示气候变化对水资源的影响方面非常有益。目前在世界范围内对冰川堆积和消融速率的研究在很大程度上依靠对冰核及其与当前降水中同位素的关系进行同位素分析。同位素应用于水资源管理的其他方面还取决于现代降水中同位素的组成。

117. 由于认识到同位素数据的这种重要应用，一些国家正在采取步骤在国家规模上扩大同位素数据的利用。2006 年期间，印度启动了一个项目，重点是收集和解释降水、河流径流和地下水的同位素组成。泰国也启动了类似的工作以建立国家数据库。

118. 这些国家的努力将进一步加强原子能机构自 1961 年以来一直运作的“全球降水同位素网”。图 H-1 示出了在北半球 1 月典型寒冷月份测量的氧同位素在降水中的分布，表明同位素对温度有很强的依赖性（较寒冷地区具有较低的同位素比率）。来自“全球降水同位素网”的同位素数据为各国有针对性地解释和利用其国家或当地同位素数据提供了一种手段。除帮助了解气候对水循环的影响外，“全球降水同位素网”数据对于评定和管理地下水资源、确定污染源和鉴定水果蔬菜产地等各种应用也至关重要。

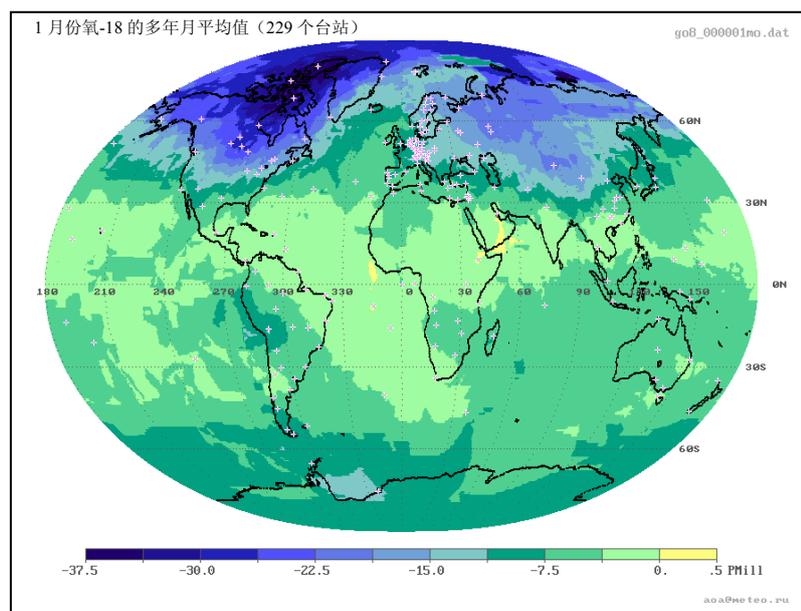


图 H-1. 同位素对温度的依赖性：1 月份的氧同位素。

## H.2. 海洋环境和陆地环境

### H.2.1. 海洋沉积物中放射性粒子的微量分析

119. 进入海洋环境的天然和人工放射性核素很大一部分与生物、矿物或核来源的粒子有关。例如，众所周知，海洋中天然存在的钍、铀和铅放射性同位素是沉积海洋粒子

在降至深海的过程中排出的<sup>17</sup>。在海洋沉积物中发现的一些人工放射性核素以显微“热粒子”形式出现。这类粒子在被海洋有机物或人摄取的情况下可能成为具有放射学意义的点源，因而，需要对海洋中的热粒子进行长期评定以及确定其性质和生物地球化学行为。现在可以利用包括扫描电子显微镜、基于同步加速器的显微 X 射线技术和显微质谱测定技术如次级离子质谱法和电感耦合等离子体质谱学等在内的各种显微成像和分析技术。

### H.2.2. 支持海产品安全的放射性示踪剂

120. 双壳类软体动物（如珠蚌、牡蛎和扇贝）的海水养殖是全球性和经济上不断增长的活动，但这种活动经常处于危险之中，因为这些海产品易于生物积累有毒金属达到超出海产品安全和出口导则的水平。

121. 放射性示踪剂的使用为采取减轻这些危险的管理战略提供了成本效益好的诊断方法。放射性示踪剂使得能够灵敏地追踪目标有机物（双壳类、鱼、虾）和整个海产品链中有毒金属的摄取、定位和消除情况。例如目前已知，扇贝在其组织中生物浓集了大量有毒金属镉，达到往往高于国际上推荐的导则的水平。利用镉-109 自动射线照相放射性示踪剂进行的研究已证明，镉几乎无例外地浓集在肾和消化腺中（见图 H-2），肾和消化腺一般不为消费者食用，因此在进入食物链之前就能够消除。因而，这些示踪剂研究为贝类养殖业提高供应国际市场的海产品的质量提供了实际测量手段。

自动射线照相图

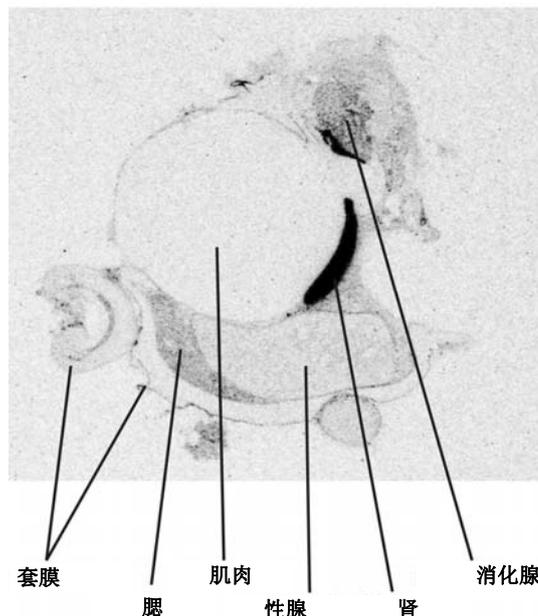


图 H-2. 扇贝中黑色区域表示镉-109 放射性示踪剂浓集区  
(来源：C·鲁莱罗，加拿大 IML)。

<sup>17</sup> 可从 IAEA.org 网站《2007 年核技术评论》的相关文件中查阅补充资料。

### H.3. 大气污染监测

122. 悬浮颗粒物引起的空气污染是对人类健康构成的一种威胁，特别是在大城市尤其如此。污染微颗粒能够深入肺中，而且可能在那里停留相当长一段时间。有效的空气质量管理意味着要了解引起空气污染的颗粒来源。核分析技术（X 射线荧光分析、中子活化分析和离子束技术）是能够用于确定空气颗粒物元素成分的工具。在了解元素成分后，可以确定颗粒来源，或者能够评定不同类型污染源的相对贡献。例如，确定污染是来自车辆、工业还是跨境来源。在这类信息的基础上，能够就减少排放的行动作出决定，例如减少或禁止使用含铅汽油，或改善城市交通基础设施。在东南亚可以看到采取这类措施所取得的具体成就。核分析技术能够同样用于测量污染对策措施的有效性。



图 H-3. 用于进行大气污染或氡监测的大容积空气取样器。

### H.4. 大气圈中的氡

123. 氡是一种从地表不断进入大气圈中的天然放射性气体。氡-222 的半衰期（3.82 天）与二氧化硫、氮氧化物和臭氧等很多大气污染物的寿命差不多。因此，正在越来越多地利用氡测量来研究大气过程，特别是用于测试大气环流和输运模型。

124. 氡浓度随风向而变化，特别是在沿海附近，从海洋进入大气圈的氡流量要比从土壤进入大气圈的氡流量要低得多。这意味着可以将氡用作衡量气团与陆地接触程度的一种指标。这种应用的一个实例是将氡测量作为世界气象组织“全球大气观测网”计划的一个组成部分纳入其中。“全球大气观测网”的目的是在全球和地区规模上对大气圈的化学组成和选定的物理特征进行可靠观测；为科学界提供预测今后大气状况的手段，以及组织开展评定工作以便为制订环境政策提供支持。目前，大气研究的这些需求正在推动在若干地区改进氡探测系统的工作。

## H.5. 参考材料和分析质量

125. 环境监测要求进行越来越准确的测量和获得可复验的结果，以便除其他外，特别是保持对粮食安全和国际贸易的信任。在世界范围内，实验室正在两个主要方面为确保测量结果的可比性和质量加强提供各种手段。第一个方面是适当的测量基础结构，主要涉及国家计量学机构和提供必要的校准标准。第二个方面是获得包括参考材料在内的质量保证和质量控制手段。这些参考材料与普通样品类型相似，含有已知数量的例行分析物质。在环境监测和研究中使用的材料类型和分析物质的数量很大，因此，实验室对适当参考材料的需求非常强烈。

126. 核技术和参考材料从两个方面密切相关。首先，核和相关分析技术（如中子活化等）被认为是用于新参考材料表征的基准技术。其次，参考材料通常适用于检验通过核分析技术获得的测量结果的质量。目前，对放射性核素、稳定同位素、示踪元素、有机污染物等表征的高质量 and 计量学上充分确定的参考材料的需求不断持续增加（见图 H-4）。为了确保对测量结果有适当的信任度，国际标准化组织和分析化学国际溯源合作组织等国际机构正在对参考材料制备领域给予更多关注。

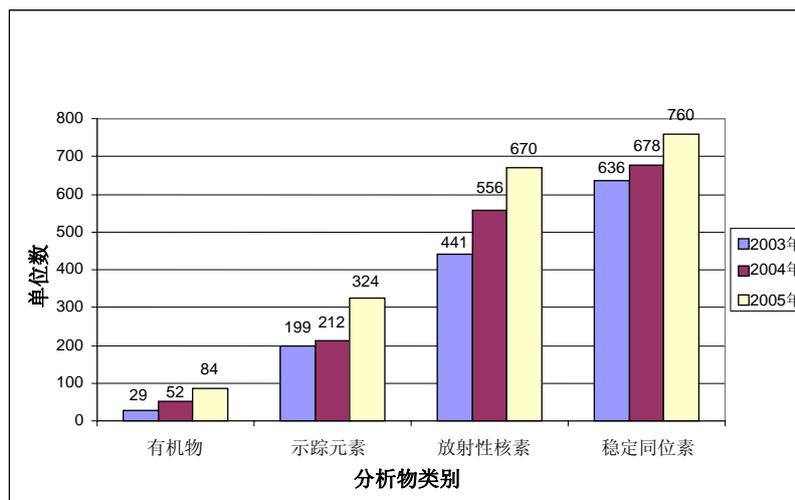


图 H-4. 原子能机构 2003 年、2004 年和 2005 年分发的参考材料单位数。