

第五十届常会

临时议程项目 17
(GC(50)/1)

2006 年核技术评论

总干事的报告

概 要

- 为响应成员国的要求，秘书处每两年编写一份综合性的“核技术评论”，并在间隔年份进行简要修订。本报告重点阐述 2005 年的主要发展情况。
- “2006 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、核技术用于粮食和农业、人体健康以及水事和环境。可通过 www.iaea.org 网站查阅与“2006 年核技术评论”相关的其他文件，这些文件仅以英文提供，涉及的内容包括发展中国家的核电、乏燃料和高放废物的贮存和处置、昆虫不育技术（研究与发展）、用于癌症诊断和治疗的医学辐射成像技术的发展、中子束技术应用和铀燃料循环前端。
- 有关国际原子能机构核科学技术活动的资料亦可参阅国际原子能机构《2005 年年度报告》（GC(50)/4），特别是其中的“技术”部分，还可参阅《2005 年技术合作报告》（GC(50)/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. 未来发展	6
A.2.1. 不断增加的预期	6
A.2.2. 可持续发展与气候变化	7
A.2.3. 关键问题	8
A.2.4. 资源	13
B. 先进的裂变和聚变	15
B.1. 先进的裂变	15
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	17
D.1. 加速器	17
D.2. 研究堆	17
E. 放射性同位素应用和辐射技术	18
E.1. 放射性同位素应用	18
E.2. 辐射技术	19
E.2.1. 纳米技术用于工业和卫生	19
E.2.2. 工业流程监测	19
F. 核技术用于粮食和农业	20
F.1. 作物改良和保护	20
F.2. 牧业生产和健康	21
F.3. 食品质量和安全	22
G. 人体健康	22
G.1. 营养和健康相关环境研究	22
G.2. 核医学在成像和治疗中的应用	23
G.3. 剂量学和医学辐射物理学	24
G.4. 放射性药物	24
G.5. 辐射肿瘤学	24
H. 水事和环境	25
H.1. 水资源	25
H.1.1. 同位素水文学技术	25
H.1.2. 海水淡化	25
H.2. 环境	26
H.2.1. 排雷	26
H.2.2. 放射性核素示踪剂用于海洋循环与气候相关性研究	26
H.2.3. 海洋食物链中的生物积累	26
H.2.4. 利用特定化合物同位素分析揭示碳循环	26

2006 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 虽然目前核电的前景仍不明朗，但 2005 年是对核电期望值不断增加的一年。3 月，74 个国家政府的高级代表包括 25 名部长级代表齐聚巴黎，出席由国际原子能机构组织的审议核电未来作用的会议。绝大多数与会者确认，就很多发达国家和发展中国家而言，核电能够为满足 21 世纪能源需求和世界可持续发展作出重要贡献。造成这种期望值提升的原因是核电的业绩记录；伴随不断上涨的石油和天然气价格世界各地的能源需求日益增长；环境制约；一些国家对能源供应保证的关切以及若干国家雄心勃勃的发展计划。
2. 截至 2005 年 12 月 31 日，有 441 座核电厂在运行，27 座正在建造中。2005 年有四台新核电机组并入电网（日本两台，印度和大韩民国各一台），而加拿大一台闲置机组也重新并网。根据逐步取消核能的国家政策，有两座核反应堆退休，即德国的 Obrigheim 反应堆和瑞典的 Barsebäck-2。有三座新开工建造的核电厂：中国的岭澳-3、芬兰的 Olkiluoto-3 和巴基斯坦的 Chasnupp-2。Olkiluoto-3 是自 1991 年以来西欧新建的第一座核电厂。亚洲仍然是核电发展的中心，占到截至 2005 年底在建 27 座反应堆中的 16 座，以及最近并入电网的 34 座反应堆中的 24 座。
3. 过去 15 年一直稳定在低位的铀价格持续攀升，从 2002 年的每千克 25 美元上升至 2006 年 5 月的每千克 112 美元。在近 15 年中铀产量一直远低于消费量，因此当前的价格增长反映了这样一种日渐明朗的看法，即曾经弥补两者之间差额的二次来源正被逐步耗尽。
4. 截至 2005 年底，有八座电厂已完全退役，有关场址已解除监管供无条件使用。17 座反应堆已部分拆除并安全封闭，31 座反应堆正在实施场址最终解除监管之前的拆除，而 30 座反应堆正在进行长期封闭之前的最低程度拆除。
5. 芬兰、瑞典和美国在高放废物处置设施方面的进展处于领先地位。在芬兰，位于奥尔基洛托的最终处置库地下表征设施已于 2004 年动工建造。2005 年，在选定社区进行顺利的全民投票之后，匈牙利和大韩民国选出了各自的首个低放和中放废物处置库场址，在比利时，两个社区投票决定成为低放废物处置库候选场址。

6. 继续就水冷堆、气冷堆、液态金属冷却堆以及混和系统等各种反应堆类型开展有关先进堆设计的国家研究。“第四代国际论坛”的五个成员在 2005 年 2 月签署了一项“第四代核能系统研究与发展国际合作框架协议”。原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员已增加到 24 个，2005 年增加的成员是乌克兰和美利坚合众国。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”当前的活动包括完成有关该项目方法学用户手册的编写工作；在国家和多国研究中应用该方法学评定各种革新型核能系统；分析各种革新型核能系统在以可持续方式满足能源需求方面的作用和结构以及选择最适宜的领域进行合作开发。

7. 2005 年 6 月在聚变能方面取得重大进展，参加国际热核实验堆谈判的所有各方签署了联合声明，并就启动法国卡达拉奇建设达成一致意见。该决定标志着聚变能的发展进入了一个重要的新阶段——在与运行发电用聚变堆相关的条件下进行聚变技术的科学和工程论证。

8. 无论对于核能发电还是核能的所有其他应用，进步和改进都得到了持续不断的基础核研究的支持。作为一种有前途的能源，聚变的实现要求在许多领域开展研究，并要求有可靠的原子数据和核数据。研究堆应用为核技术的大多数领域提供了支持，本评论报告了新研究堆例如在同位素生产方面的应用、中子束应用和活化分析用于环境及粮食和农业领域。

9. 本评论还报告了基于加速器的技术、放射性同位素生产和纳米技术的一些新颖用途方面的发展情况。

10. 在粮食生产和粮食安全、人类和动物健康、水资源管理和环境方面，核技术继续发挥关键而且常常是独特的作用。例如，作物突变育种技术已导致利用许多国家原来无法耕种的土地生产稻米。在人体健康方面，稳定同位素应用正成为一种公认的、用来制定营养计划的工具。核医学正受益于计算技术的进步。可持续的水资源管理和海水淡化仍然是国际议程中的高度优先事项。水文样品同位素分析方面的新发展有希望加强同位素在水资源管理中的应用。采样和分析技术的进步有助于更好地了解环境。本评论也报告了所有这些领域的发展情况。

A. 动力应用

A.1. 当今的核电¹

11. 截至 2005 年底，全世界有 441 座核电厂在运行，发电总容量达到 368 吉瓦（电），提供了世界电力的约 16%。自 1986 年以来该百分数大致保持稳定，表明 19 年来核电增长速度与全球总电力增长速度持平。

12. 2005 年有四台新核电机组并入电网（日本两台，印度和大韩民国各一台），而加拿大一台闲置机组也重新并网。相比之下，2004 年有五台新建机组并入电网（一台机组重新并网），2003 年有两台新建机组并入电网（两台机组重新并网）。2005 年有两座核电厂退休，而 2004 年有五座退休，2003 年有六座退休。全球核发电容量在 2005 年期间净增加 325.9 万千瓦（电）。

13. 按照原子能机构关于建造工作从首次浇注混凝土开始的定义，2005 年有三座核电厂开工建设：中国的岭澳-3（100 万千瓦（电））、芬兰的 Olkiluoto-3（160 万千瓦（电））和巴基斯坦的 Chasnupp-2（30 万千瓦（电））。此外，保加利亚有两座核电厂恢复建造，以前将其列为“暂停建造”。2004 年有两座新厂开工建设，另外，俄罗斯联邦有两座核电厂恢复建造。2003 年有一座电厂开工建设。

14. 目前的扩展以及近期和远期的发展前景均集中在亚洲。如表 A-1 所示，截至 2005 年底在全世界 27 座在建反应堆中，有 16 座在亚洲。在最近并入电网的 34 座反应堆中，有 24 座在亚洲。

15. 日本拥有亚洲最大的核电计划。随着 Higashi Dori-1 于 3 月并入电网和 Shika-2 于 7 月并入电网，日本现有 55 座反应堆在运行中，一座在建。也是在 7 月，东京电力公司 2002 年关闭的 17 座反应堆中的最后一座恢复运行。日本计划在 2014 年前总共增加 10 台机组并网，从而使核电在日本电力中所占份额增加到 40%以上。

16. 随着 Ulchin-6 于 1 月并入电网，大韩民国运行中的机组已经达到 20 台。2005 年开始了 Kori-5 和 Kori-6 的场址筹备工作。核电占到了该国电力的 45%。

17. 除中国和印度正在特别计划大力发展核电外，亚洲其他地区核电的绝对和相对贡献均比较小。中国目前运行中反应堆有九座，在建反应堆有三座，其电力的 2%来自核电，中国计划到 2020 年将装机容量扩大到 40 吉瓦（电），使核电占供电量的 4%。

¹ 原子能机构保存了运行中和已关闭反应堆以及在建反应堆的资料，最新“年度报告”（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf）和原子能机构网站 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPES/index.html> 对此均有介绍。还可特别参见“动力堆信息系统”（<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>）。

表A-1. 世界运行和建造中的核动力堆（截至 2005 年 12 月 31 日）^a

国 家	运行中反应堆		在建反应堆		2005 年供应的核电量		2005 年全年的总运行经验	
	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	万亿瓦 ·小时	占总发电量的 百分数	年	月
阿根廷	2	935	1	692	6.4	6.9	54	7
亚美尼亚	1	376			2.5	42.7	38	3
比利时	7	5 824			45.3	55.6	205	7
巴西	2	1 901			9.9	2.4	29	3
保加利亚	4	2 722	2	1 906	17.3	44.1	137	3
加拿大	18	12 599			86.8	14.6	442	8
中国	9	6 572	3	3 000	50.3	2.0	56	11
捷克共和国	6	3 368			23.3	30.5	86	10
芬兰	4	2 676	1	1 600	22.3	32.9	107	4
法国	59	63 363			430.9	78.5	1 464	2
德国	17	20 339			154.6	31.0	683	5
匈牙利	4	1 755			13.0	37.2	82	2
印度	15	3 040	8	3 602	15.7	2.8	252	0
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	55	47 593	1	866	280.7	29.3	1 221	3
大韩民国	20	16 810			139.3	44.7	259	8
立陶宛	1	1 185			10.3	69.6	39	6
墨西哥	2	1 310			10.8	5.0	27	11
荷兰	1	449			3.8	3.9	61	0
巴基斯坦	2	425	1	300	2.4	2.8	39	10
罗马尼亚	1	655	1	655	5.1	8.6	9	6
俄罗斯联邦	31	21 743	4	3 775	137.3	15.8	870	4
斯洛伐克	6	2 442			16.3	56.1	112	6
斯洛文尼亚	1	656			5.6	42.4	24	3
南非	2	1 800			12.2	5.5	42	3
西班牙	9	7 588			54.7	19.6	237	2
瑞典	10	8 910			69.5	44.9	332	6
瑞士	5	3 220			22.1	32.1	153	10
乌克兰	15	13 107	2	1 900	83.3	48.5	308	6
英国	23	11 852			75.2	19.9	1 377	8
美利坚合众国	103	98 145			780.5	19.3	3 087	6
总 计 ^b	441	368 264	27	21 811	2625.9	16%	11 991	8

a 数据来自原子能机构动力堆信息系统（<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>）。

b 注：总计中包括中国台湾的下列数据：

- 六台机组在运行，4904 兆瓦（电）；两台机组在建，2600 兆瓦（电）；
- 38.4 万亿瓦·小时核发电量，占 2005 年总发电量的 20.3%；
- 总运行经验 146 年 1 个月。

18. 印度于 6 月将一座 49 万千瓦（电）加压重水堆 Tarapur-4 并入电网。该国现有 15 座反应堆在运行中，另有八座反应堆在建。2004 年，核电占到供电量的 2.8%。印度的目标是到 2022 年将核电容量增加 10 倍，到 2052 年增加 90 倍。
19. 巴基斯坦电力的 2.8%来自两座运行中核反应堆。2005 年开工建造 30 万千瓦（电）压水堆 Chasnupp-2。计划要求到 2030 年再增加核电容量 800 万千瓦（电），从而使核电在电力中所占份额达到 4.2%。
20. 伊朗伊斯兰共和国正在建造一座核电厂，它于 2005 年签署了燃料供应协议，规定将乏燃料返回俄罗斯联邦。
21. 西欧现有 135 座核电厂在运行，一座在建，即 2005 年 8 月在芬兰开工建造的 Olkiluoto-3。根据德国和瑞典的逐步取消核能政策，有两座反应堆已经退休，即德国的 Obrigheim 和瑞典的 Barsebäck-2。荷兰政府批准 Borssele 核电厂的寿期延长到 2033 年，即 60 年寿期，英国政府批准 Dungeness-B1 和 Dungeness-B2 延寿 10 年。瑞典政府批准 Ringhals-1 和 Ringhals-3 提高出力 1.5 万千瓦（电），Oskarshamn-3 提高出力 25 万千瓦（电）的类似申请得到了监管者的支持，目前正在等待政府批准。其他提高出力申请是 Forsmark-1 提高出力 12 万千瓦（电）、Forsmark-2 提高出力 12 万千瓦（电）和 Forsmark-3 提高出力 17 万千瓦（电）。
22. 俄罗斯有 31 座核电厂在运行，四座在建，东欧有 39 座电厂在运行，五座在建。俄罗斯的 Bilibino-2 于 2005 年初获得了五年的许可证延长，是对前一年给予 Bilibino-1 类似延长的补充。这两座核电厂都是为偏远的楚科奇东北部地区供热和供电的 1.1 万千瓦（电）小型机组。
23. 在美利坚合众国，核管理委员会批准了另外九个许可证各更新 20 年（每座核电厂的许可寿期总计为 60 年），从而使截至 2005 年底获得批准的许可证更新总数达到 39 个。美国还颁布了新的能源立法，规定政府支付与某些可能的许可证审批延迟相关的费用，并规定对最高 600 万千瓦（电）的前期核电容量实施生产减免。核管理委员会正在审查三份早期场址许可证申请，它预计到 2007 年底前将收到四份建造和运行综合许可证申请，2008 年可能还会收到若干份申请。
24. 在加拿大，Pickering A-1 已成为近年关闭的八台机组中第四台重新并网的机组。此外，还就重新启动第五台和第六台机组即 Bruce A-1 和 Bruce A-2 的一项四年计划达成了协议。

A.2. 未来发展

A.2.1. 不断增加的预期²

25. 2005 年是对核电的预期继续增加的一年。3 月，74 个国家政府的高级代表包括 25 名部长级代表齐聚巴黎，出席由原子能机构组织的审议核电未来作用的会议。绝大多数与会者确认，对很多发达国家和发展中国家而言，核电能够为满足 21 世纪能源需求和世界可持续发展作出重大贡献。在这些国家中有许多目前尚无核电计划的国家，例如埃及、印度尼西亚、摩洛哥、波兰、土耳其和越南。正在启动核电计划的国家所面临的一个挑战是建立必要的支持性基础结构，包括法律和监管基础结构。³

26. 使预期值继续增加的贡献因素是核电不断延长的良好记录、全球能源需求的持续增长、新的环境制约因素、一些国家对能源供应安全的关切以及印度、中国、日本、大韩民国和俄罗斯联邦等国家明确的核电发展计划。

27. 核电不断延长的良好记录反映在表 A-1 所示 11 991 堆-年的经验、容量因子的提高、较低的发电成本和极好的安全记录。具有重大厂外后果的一次事故是 1986 年的切尔诺贝利事故。这次事故付出了生命的代价，并造成了广泛的灾难。但是它也带来了巨大的变化，包括建立了不断改进的“安全文化”，对经验教训的透彻分析以及共享最佳实践。近 20 年来，这种安全文化已经证明了它的有效性，而这种安全记录也为正在考虑建造核电厂的国家提供了依据。

28. 在所有的独立分析和预测中都预计在从现在起本世纪的以后时间里全球能源需求将持续增长。倘若世界要满足即使是发展中世界经济宏愿中的一小部分，也必须大幅扩大能源供应。2005 年石油和天然气价格飙升，反映了需求增长将快于供应这一市场预期。

29. 图 A-1 表示自 1960 年以来世界范围核电生产能力的历史增长情况以及 2005 年更新的原子能机构的高值和低值预测。2030 年低值和高值预测的差额为 222 吉瓦（电）。如图所示，该差额中的 66 吉瓦（电）即 30%来自西欧，52 吉瓦（电）即 23%则来自远东。

30. 虽然对核电的预期不断增加，但受原子能机构委托最近进行的全球民意调查表明仍然存在意见分歧。18 个国家的 18 000 人参加了这次调查。各国之间存在着很大的不一致。综合结果示于图 A-2。占 62%的多数人希望现有电厂继续运行，与此同时占 59%的多数人则不希望建造新电厂。接着，还提出了一个载于有关核电有很少温室气

² 有关原子能机构最新预测的更详细资料可在<http://nesisda2/rds-1/>上获得。在最新一份“年度报告”（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf）中和原子能机构<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/>网站上都介绍了原子能机构最近和当前有关中期预测数据收集和专家评估方面的工作。

³ 补充文件可在IAEA.org网站“2006年核技术评论”下获得。

体排放的简要资料中的问题。此后，赞成发展核电的百分数从 28% 上升到了 38%，而反对发展核电的百分数则从 59% 下降到 47%。

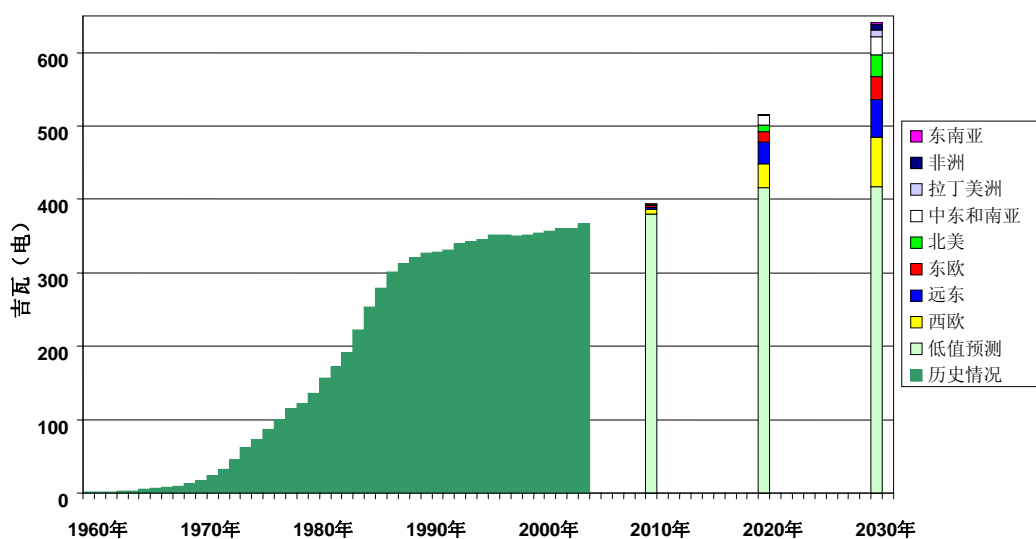


图 A-1. 世界各地核电生产装机容量。深绿色条表示 1960 年至 2005 年的历史增长情况。浅绿色条表示原子能机构对 2010 年、2020 年和 2030 年的最新低值预测。其他颜色表示原子能机构对世界不同地区的低值和高值预测之间的差额。（SEA = 东南亚；LA = 拉丁美洲；ME&SA = 中东和南亚；NA = 北美；EE = 东欧；WE = 西欧）



图 A-2. 全球民意调查的综合结果。来源：“全球核问题和国际原子能机构：民意调查” 18 个国家的最终报告，2005 年。

A.2.2. 可持续发展与气候变化⁴

31. 联合国可持续发展委员会在 2001 年举行的第九次会议上首次讨论了能源问题，并对核能与可持续发展之间的关系问题进行了详尽的辩论。会议取得了两方面的成果。第一，各方同意对最后文件可以保留不同意见，其中注意到一些国家认为核能是促进可持续发展的一个重要因素，而另一些国家则不然。第二，各方一致认为“对核能的选择取决于各国”。在可持续发展委员会 2006 年和 2007 年再次讨论能源问题时，核电将是下次会议议程的一部分。

⁴ 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在最新“年度报告”的相关部分（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/capacity_building.pdf）和原子能机构网站 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml> 获得。

32. 《京都议定书》于 2005 年 2 月生效，该议定书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。投资者过去没有注意到核电具有极低程度的温室气体排放的优势，因为对温室气体排放不加限制或不征税意味着避免排放温室气体并没有任何经济价值。

33. 2005 年 12 月在蒙特利尔举行的《联合国气候变化公约》（气候公约）缔约方第十一次会议是《京都议定书》生效后举行的第一次会议，因此也作为《京都议定书》缔约方第一次会议。这次会议正式通过了“气候公约”缔约方第七次会议初步通过的《京都议定书》执行规则，即“马拉喀什协定”。关于第一个承诺期（2008—2012 年）之后的减排问题，会议决定在一个“不限人数的特别工作组中开始讨论这个问题，该工作组的目的应当是尽早和及时完成任务，以确保第一个承诺期和第二个承诺期之间没有空白期”。在这些讨论中，有关核电的一个重要问题是，目前在第一个承诺期中将核电方案排除在《京都议定书》三项灵活机制中的两项（具体是“清洁发展机制”和“联合实施机制”）之外这一做法的最终结局将会怎样。

A.2.3. 关键问题

经济性

34. 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。但就建造新电厂而言，核电的经济竞争性取决于若干因素。首先，它取决于可利用的替代能源。一些国家的替代能源很丰富，而另一些国家却较少。其次，它取决于一个国家的电力总需求以及对这种需求的增长速度。第三，它取决于市场结构和投资环境。其他因素是相同的，在重视迅速回报的自由化市场中，核电“前期投资密集”的费用结构对私人投资者的吸引力不及对政府的吸引力，因为政府能够看得更远些，特别是在能够确保实现有吸引力的投资回报的监管市场中尤其如此。在自由化市场中的私人投资还将取决于能源相关外部费用和效益（如污染、温室气体排放、废物和能源供应安全）在多大程度上已经内部化。相反，政府投资者能够将这类外部因素直接纳入其决策之中。同样重要的是监管风险。对核电的政治支持因国而异，而且在某一国家内，这种支持会随着时间而变化。投资者必须权衡可能要求中途取消项目或推迟项目以及增加费用从而损害最初有吸引力的投资等在政治上进行调整的风险。不同的国家也有不同的核准程序。一些程序的可预见性低于另一些程序，而从投资者角度看，这种代价高昂的干预或推迟会造成较大的风险。

35. 图A-3 概述了最近进行的七项研究提供的新的建设费用估算。⁵ 除燃油发电（只在 一项研究中做了估算）外，每一项费用范围的高值至少比低值高出一倍。这种情况不 仅部分地归因于各项研究所采用的不同的技术假设，而且也归因于以上所列因素。此 外，在图A-3 范围内只包括内部化费用。例如，倘若对改进国家能源自给赋予足够高 的优先地位，则在具体情况下的优先选案就可能不是最廉价的了。

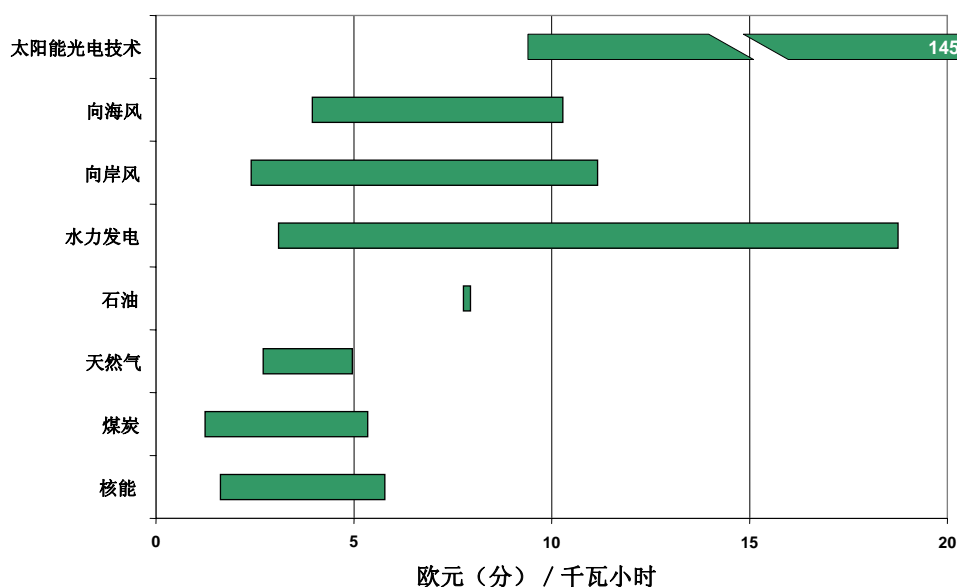


图 A-3. 在最近对有关不同国家电力生产技术的七项研究中估算的新电厂建造相关归一化价格的范围。

安全性⁶

36. 核电厂运行经验的国际交流以及特别是广泛宣传“汲取的经验教训”是维护和加强核电厂安全运行的重要组成部分。运行经验的收集、共享和分析均是至关重要的安全管理要素，并有明确的经验性证据表明，借鉴核电厂的运行经验已经导致并将继续导致核电厂的安全改进。促进交流的国际机制包括世界核电营运者联合会（核电营运者联合会）和原子能机构。定期举行原子能机构/核能机构联合事件报告系统会议是这

⁵ 《核电的未来前景》，麻省理工学院，美国马萨诸塞州剑桥市（2003 年）；《核电的经济前景》，芝加哥大学，美国伊利诺斯州芝加哥市（2004 年）；《电力生产成本》，皇家工程学院，英国伦敦（2004 年）；法国经济、财政和工业部能源和原材料总署，法国巴黎（2003 年）；经济、贸易和工业省，日本东京（2004 年）；《安大略省基荷电力生产替代技术的归一化单位电力成本比较》，Matt Ayres、Morgan MacRae和Melanie Stogran，加拿大能源研究院，加拿大阿尔伯达省卡尔加里市，2004 年；《电力生产成本预测：2005 年最新报告》，核能机构和国际能源机构，经济合作与发展组织，巴黎，2005 年。

⁶ 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/Anrep2005/safety_nuclear.pdf）和原子能机构网站 <http://www-ns.iaea.org/>。

种全球性经验交流过程的一个补充部分，在该过程中能够详细讨论和分析最近发生的事件。

37. 核电营运者联合会在 20 世纪 90 年代公布的并复载于图 A-4 和 A-5 中的安全指标得到了明显改进。但是，最近几年一些领域的改进却止步不前，如图 A-4 所示非计划紧急停堆的情况。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。自 1986 年切尔诺贝利事故以来，为改进反应堆安全特性作出了巨大努力，但仍然有一些设施应当将核安全援助作为一个优先事项。

38. 原子能机构的年度“核安全评论”（GC(50)/INF/2）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。

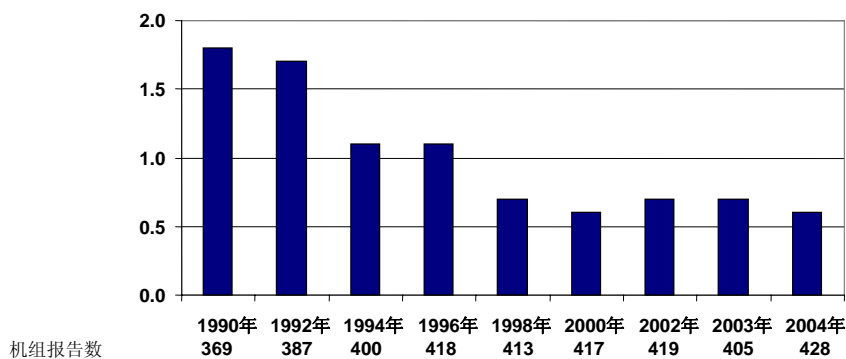


图 A-4. 每 7000 小时临界的非计划紧急停堆次数。来源：核电营运者联合会 2004 年实绩指标。

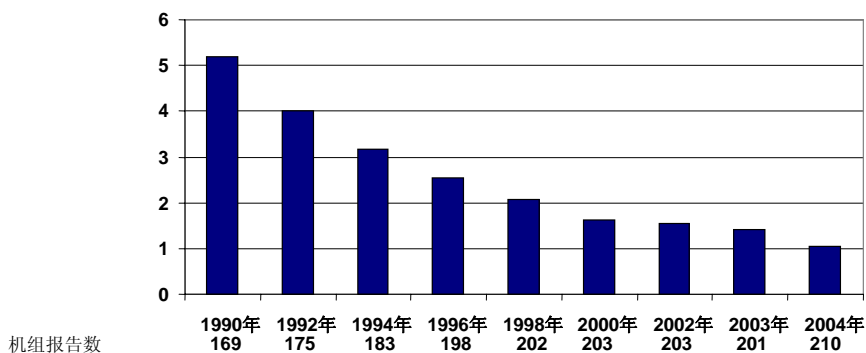


图 A-5. 核电厂每 100 万人-工作小时的工业事故数。来源：核电营运者联合会 2004 年实绩指标。

乏燃料、后处理、废物和退役⁷

39. 目前世界上 441 座正在运行的核电厂每年产生一万多吨乏燃料重金属，其中不足三分之一经后处理作为混合氧化物燃料再循环使用。其余乏燃料重金属则放置在临时贮存设施中。目前贮存有大约 19 万吨重金属。大部分重金属贮存在水中，但越来越多的重金属则采用干法贮存，后者已成为新的离堆临时贮存的优选方法。干法贮存具有模块化优势，这种特点随着时间分散了基建投资，而且从较长时期看，干法贮存中采用的更简化的非能动冷却系统减少了运行和维护方面的要求和费用。

40. 目前后处理民用乏燃料的全球能力约为每年 5000 吨重金属。日本六所村的在建新设施将使该能力每年增加 800 吨重金属。六所村的通铀调试于 2004 年开始，计划于 2006 年开始用实际乏燃料进行热调试，并计划于 2007 年投入商业运行。目前全球混合氧化物燃料的制造能力约为每年 200 吨重金属，预计到 2010 年将增加到每年约 350 吨重金属。

41. 当前旨在改进所有在运商业后处理厂（和六所村）所采用的普雷克斯流程的研究工作包括先进的普雷克斯流程、其他水法工艺和若干非水工艺。

42. 利用后处理燃料的最高效方式是在快堆中使用。快堆已在法国、德国、印度、日本、俄罗斯联邦、英国和美国建造并投入运行。但是，促进后处理和再循环的早期经济因素在 20 世纪 70 年代之后已经减弱，其中部分原因是核电容量增长放缓，部分原因是铀资源估算持续走高，还有部分原因是二次能源的获得。只有一座俄罗斯联邦的 BN-600 型快堆目前还在作为动力堆运行，它使用的不是后处理燃料，而是新的高浓铀燃料。然而，印度于 2004 年开始在卡尔帕卡姆建造一座 50 万千瓦（电）的原型快中子增殖堆，并且一些国家也正在进行这方面的研究工作（见 B.1 部分）。

43. 芬兰、瑞典和美国在建立高放废物最终处置库方面走得最远，尽管目前预期在 2020 年以前这些处置库不大可能投入运行。芬兰和美国各选择了一个场址，它们目前正在对其场址进行必要的研究。美国尤卡山处置库的许可证申请原定于 2004 年向美国核管会提交，但现已推迟。瑞典正在对两个可能的场址进行研究。

44. 2005 年 11 月，在持续三年的全国性磋商之后，加拿大核废物管理组织提出了一项管理加拿大乏燃料的“分阶段适应”建议方案。在今后 30 年期间，乏燃料将继续贮存在反应堆现场，将选择一个适合于深部地质处置库的场址，并将决定是否还要建造一个浅层地下临时贮存中心设施，以供在大约 30 年后开始接受乏燃料。无论是否建造临时中心设施，深部处置库都将在大约 60 年后开始接受乏燃料。

⁷ 补充文件可在IAEA.org网站“2006年核技术评论”下获得。有关原子能机构在退役、乏燃料和废物方面活动的更详细资料可在最新“年度报告”的相关部分（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf 和 http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/radioactive_waste.pdf）以及原子能机构网站 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NEFW/index.html> 和 <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>获得。

45. 在法国，比尔地下研究实验室关于在粘土构造中处置的调查研究已经取得良好进展。法国 1991 年核废物研究与发展法令特别要求在 15 年后由议会采取进一步的行动，而且为了准备在 2006 年采取这类行动，2005 年开始进行了一场正式的公开辩论。这场辩论以自 1991 年以来开展的有关分离和嬗变、地质处置以及整备和长期临时贮存等三项重要方案的研究为基础。预计新法律将阐明为推进所有这三项方案所应采取的近期和中期步骤。

46. 在低放和中放废物的处置方面，比利时、匈牙利和大韩民国在 2005 年取得了令人瞩目的进展。在比利时，至少两个社区投票决定成为国家低放废物处置库的候选场址。在匈牙利，巴塔帕蒂地区的居民以压倒多数票决定该地区作为国家低放废物和中放废物最终处置库的场址。在大韩民国，庆州被指定作为首个低放废物和中放废物处置库场址，但条件是要进行成功的地质场址评定。这项指定是在几乎 90% 的庆州投票者认可后作出的，相比之下，另外三个候选社区的认可比例为 67% 至 84%。

47. 美国 Trojan 和 Maine yankee 核电厂的退役工作于 2005 年完成。除独立的乏燃料贮存设施外，这两个厂址均已解除监管，不受限制地作为公共用地。因此，截至 2005 年底，世界各地有八台机组已全部完成退役，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，31 台机组正在实施场址最终解除监管之前的拆除，而 30 台机组正在进行长期封闭之前的最低程度拆除。

抗扩散性⁸

48. 过去几年，对抗扩散性的关注不断增加。抗扩散性是指一个核能系统具有能够防止核材料被转用或未申报的生产或技术被滥用的特性。作为“第四代国际论坛”和原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的一部分，对固有抗扩散特性问题，即对由核能系统的技术设计所产生的那些特性的关注与日俱增。这些特性在有关先进聚变的 B.1 部分作了概述。

49. 2006 年 1 月，俄罗斯总统弗拉基米尔·普京建议成立一个国际中心系统，以便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。2006 年 2 月，美国宣布了“全球核能伙伴关系计划”，目的是开发不分离钚的先进循环技术；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；开发在提供能源的同时消耗再循环乏燃料的先进堆以及开发非常适宜发展中国家需求的安全和可靠的小型反应堆。

⁸ 有关原子能机构在抗扩散和保障方面活动的更详细资料请参阅最新“年度报告”的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/safeguards.pdf>）和从原子能机构网站 <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html> 获得。

A.2.4. 资源⁹

50. 目前估计在可回收资源中价格低于每千克 80 美元的已探明常规铀资源为 380 万吨铀，价格低于每千克 130 美元的为 470 万吨铀。2006 年 5 月底铀的现货市场参考价为每千克 112 美元。就这两类资源而言，这些估计价格在过去两年已经提高，这是由于又有一些新的资源被发现以及将一些资源从高位价类重新划归低位价类。

51. 未被发现的常规铀资源将使价格低于每千克 130 美元的估计储量再增加 710 万吨铀。这一数量既包括预计存在于已探明矿床中或已探明矿床附近的资源，也包括存在于地质上有利但尚未勘探的区域中更具推测性的资源。估计还有另外 300 万吨铀的推测资源，其生产成本还未确定。

52. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。非常规铀资源包括磷酸盐矿床中存在的约 2200 万吨铀和海水中含有的多达 40 亿吨铀。从磷酸盐中回收铀的技术成熟，估计成本为每千克铀 60—100 美元。从海水中提取铀的技术只得到实验室规模的验证，目前估计提取成本为每千克铀 300 美元。地壳中钍的储量为铀的三倍。虽然钍现有估计储量加上其他资源总计超过 450 万吨，但认为这类估计储量仍很保守。它们没有涵盖世界所有地区，而且历史上疲软的市场需求也限制了钍的勘探。

53. 图 A-6 对已探明常规铀资源的地理分布与 2004 年铀产量分布情况进行了比较。三个国家即澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦占已探明常规资源的 50%和产量的 60%。

54. 2004 年铀产量总计为 40 263 吨铀，仅占世界反应堆需求量（67 320 吨铀）的约 60%。其余部分由以下五类二次来源提供：天然铀库存、浓缩铀库存、来自乏燃料的后处理铀、铀-235 被来自后处理乏燃料的钚-239 部分取代的混合氧化物燃料和贫化铀尾矿再浓缩（贫化铀含量低于 0.7%铀-235）。

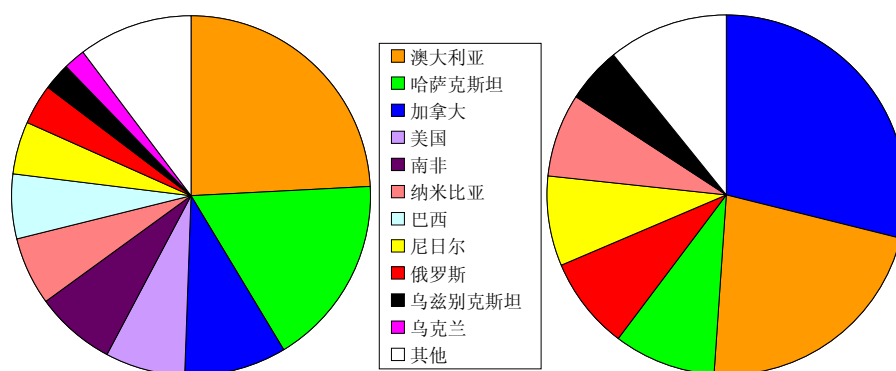


图 A-6. 已探明常规铀资源的地理分布（左）和 2004 年铀产量的地理分布（右）。

⁹ 有关原子能机构核资源活动的更详细资料请参阅最新“年度报告”的相关部分（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_fuel_cycle.pdf）以及从原子能机构网站 http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_home.html 和 IAEA.org 网站“2006 年核技术评论”下获得。

55. 在这五类二次来源中，最大的贡献来自从 20 世纪 50 年代后期开始核电的商业利用直到大约 1990 年所积累的库存。在此期间铀产量自始至终超过商业需求量，这主要是由于核电生产的增长速度比预期缓慢，加之大量产品被用于军事目的。自 1990 年以来这种情况已经扭转，库存量也已下降。然而准确资料不易获得，而今后可能作出的将军用材料用于商业目的的政治决定也增加了另一个不确定因素。

56. 鉴于采用混合氧化物燃料的反应堆数量相对很少以及可利用当前后处理和反应堆技术再循环的数量有限，乏燃料作为混合氧化物燃料再循环利用并没有明显改变对铀的需求量。通过乏燃料后处理回收的铀即通常所说的堆后料目前只在法国和俄罗斯联邦进行再循环利用。现有数据表明，它只占世界需求量的不足 1%。

57. 贫铀库存量相当大，2005 年初估计约为 150 万吨铀。然而，再浓缩工艺目前只在离心浓缩厂有经济效益，因为这类工厂有剩余能力，且运行成本较低。虽然目前还没有完整的数据，但欧洲联盟（欧盟）的统计资料表明，2004 年俄罗斯联邦交付的再浓缩尾料占向欧盟反应堆交付的总铀量的 6%。

58. 由于过度生产和能够获得二次来源，从 20 世纪 80 年代初期直至 1994 年铀价普遍下跌，而且 1990 年至 1994 年的低价格导致了世界许多铀工业部门的大幅度裁减。然而从 2001 年开始，铀价反弹到了自 20 世纪 80 年代以来从未有过的水平，从 2001 年至 2006 年现货价格上涨超过六倍。

59. 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. 与各种核技术有关的资源可利用年数

反应堆/燃料循环	以 2004 年世界核发电量计的已探明常规资源的可利用年数	以 2004 年世界核发电量计的常规总资源的可利用年数
当前的燃料循环（轻水堆，一次通过式）	85	270
通过再循环利用的纯快堆燃料循环	5000—6000	16 000—19 000

B. 先进的裂变和聚变¹⁰

B.1. 先进的裂变

60. 近期内，大多数新核电厂很可能是在现有设计基础上逐渐改进。从长远看，综合了根本性变革并有希望大幅缩短建造时间和降低基本投资的更多革新型设计可能有助于开创一个核电新时代。若干革新型设计出现在小型（小于 30 万千瓦（电））到中型（30 至 70 万千瓦（电））范围的反应堆中。这类设计可能对发展中国家采用核电以及对于边远地区颇具吸引力。

61. 先进设计力求在以下三个主要领域实现改进：降低成本、加强安全和抗扩散。

62. 就降低成本而言，一些设计着重进一步开发成熟战略，即通过开发更大型机组实现规模经济；通过采用模块系统和及早解决许可证审批问题缩短建造进度；标准化和系列建造；多机组建造以及增加当地参与，而其他设计则强调降低成本的新战略，包括系列生产的经济性；加强程序和数据库的精确度以消除过度设计；开发“智能”部件以探测初期故障和降低对高成本冗余度和多样性的依赖；被动安全系统；进一步开展概率安全分析以支持电厂简化和知情风险的监管决策；减少需要核级标准的部件和提高热效率。

63. 在安全方面，技术改进工作包括加大水装载量（对水冷反应堆而言）、降低功率密度、增加负反应性系数、具有成熟的高可靠性的冗余度和多样性安全系统以及被动冷却和冷凝系统。

64. 在抗扩散方面，综合了各种先进设计的固有措施涉及核材料的化学形态；其质量和体积、辐射场、释热和自发中子产生率；将民用设施和材料用于武器生产所需改造的复杂性以及限制接触核材料的设计特点。

65. 阿根廷、中国、欧盟、法国、德国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国正在进行大型先进轻水堆的重要设计工作。加拿大和印度正致力于先进重水堆的设计，而中国、法国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、南非和美国正在开发先进的气冷堆设计。南非已完成了 16.8 万千瓦（电）球床模块式高温堆示范机组的设计和安全评审，正在进行许可证审查。在液态金属冷却快堆方面，中国、法国、印度、日本、大韩民国和俄罗斯联邦正在从事开发活动。

¹⁰ 有关原子能机构先进聚变活动的更详细资料可在最新“年度报告”的相关部分（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_power.pdf）和原子能机构网站<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>获得。有关原子能机构聚变活动的资料也可在最新“年度报告”（http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2005/nuclear_science.pdf）中获得。2005 年《核聚变》期刊上登载了国际聚变研究委员会编写的一篇概述最近 10 年聚变研究进展的现状报告（《核聚变》第 45 期（2005 年）A1 至 A28）。

66. “第四代国际论坛”和原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”作为两项促进创新的主要国际努力正在对上述主动行动提供补充。“第四代国际论坛”已对广泛的革新型概念进行了审议，并在 2002 年选择了六类反应堆系统供今后开展双边和多边合作，这六种类型是：气冷快堆、铅合金液态金属冷却堆、熔盐堆、钠液态金属冷却堆、超临界水冷堆和超高温气冷堆。加拿大、法国、日本、英国和美国在 2005 年 2 月签署了“第四代核能系统研究与发展国际合作框架协议”。该协议澄清了有关联合研究和其他合作活动的明确基本原则，并为目前能够谈判“第四代国际论坛”的具体项目奠定了基础。

67. 2004 年，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”发表了经修订的导则和评价各种革新型核能系统的方法学。当前的活动包括完成“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法学用户手册的编写工作以帮助用户评定各种革新型核能系统；在国家和多国研究中应用这种方法学评定各种革新型核能系统；分析各种革新型核能系统在以可持续方式满足国家、地区和全球能源需求方面的作用和结构以及选择最适宜的领域进行合作开发。2005 年，随着乌克兰和美利坚合众国的加入，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员已增加到 24 个。

B.2. 聚变

68. 2005 年 6 月，参加国际热核实验堆谈判的所有各方签署了一份联合声明，并就在法国卡达拉奇建造场址达成了一致意见。该决定标志着聚变能的发展进入了一个重要的新阶段——在与运行发电用聚变堆相关的条件下进行聚变技术的科学和工程论证。2005 年 12 月，印度成为国际热核实验堆第七个成员。

69. 核聚变能的利用提出了很多挑战，包括增加了对获得可靠、全面的原子数据和分子数据的需求。随着国际热核实验堆建造的日益临近，很多原子、分子和等离子体-表面相互作用问题越发显得重要。国际聚变研究委员会¹¹已确定了若干重要问题，如氙的存量和去除、边缘等离子体物理和重元素杂质等问题。2006 年将启动一项主动行动，研究和量化对了解壁部件吸收氙问题有直接影响的聚变堆安全壳壁材料的侵蚀性能。

70. 对约束等离子体物理学的增进了解导致改进了有关优化聚变电厂运行的参数。球形托卡马克和仿星器（用于利用磁场约束热等离子体以维持受控核聚变反应的装置）等可选磁约束方案在实现运行参数方面也取得了显著进展。世界上最大的仿星器文德尔施泰因-7X 正在德国建造，按计划在 2010 年以前投入运行，该仿星器将推动有关聚变电厂稳态运行问题的研究。

71. 对惯性聚变研究方面物理学的增进了解已导致设计和制造了两台用于聚变点火实验的兆焦耳激光设施；美国的“国家点火装置”正在利弗莫尔建造，兆焦耳激光设施

¹¹ 国际聚变研究委员会 2005 年在《核聚变》期刊上发表了一篇概述最近 10 年期间聚变研究进展的“聚变研究现状报告”（《核聚变》第 45 期（2005 年）A1 至 A28）。

也正在法国波尔多附近建造。预期这些设施将准备就绪供 2008 年至 2010 年进行实验。称为快速点火方案的新的惯性聚变方案也正在拟订,并需要使用超强激光器。在日本大阪“实现高速点火实验”中,微微秒以下超强激光器已处于后期开发阶段。

C. 原子数据和核数据

72. 对于基础核物理研究以及成功地规划、设计和运行核电厂及相关的后处理和废物处理设施,乃至对于核医学和特定核基分析技术等方面的应用来说,广泛和全面的原子数据和核数据是一个必要的先决条件。对使用加速器驱动系统的兴趣日益增长,这将导致对用于反应堆物理学/工程学目的以及辐射输运计算的高质量可靠核数据的需求增加。

73. 已经产生了更多旨在确保增强对裂变和聚变评估的信心的可靠数据,包括铀-238 热中子截面、热散射律数据、用于聚变装置和加速器驱动系统中子物理学计算的最新截面等一些重要参数以及其他一些重要的原子参数和核参数。例如,原子数据和核数据汇编与评价方面的其他进展继续产生了有关等离子体模型和聚变堆中重元素杂质的原子数据和分子数据。

D. 加速器和研究堆的应用

D.1. 加速器

74. 带电粒子加速器尤其是质子加速器和电子加速器的应用继续促进了高级材料、保健以及物理和生命科学等领域的重大进展。显著的趋势是出现了例如在显微机械加工、纳米技术和细胞辐照技术中使用聚焦离子束等诸多新应用。

75. 对粒子束应用领域非标准材料行为的兴趣不断发展。例如,有关研究正在导致增进对下一代隔热材料的结构与特性之间关系的认识。

76. 两种新的脉冲散裂源(一种可利用粒子加速器生产中子束的工艺)正在日本和美国建造。现有的散裂源如英国的 ISIS 和瑞士的 SINQ 都在进行升级,并且在物理学、半导体物理学、磁学和生物学领域的新应用正在兴起。

D.2. 研究堆

77. 放射性同位素生产、中子束应用、硅掺杂和材料辐照继续作为许多研究堆设施的主要应用领域。一些新研究堆正在进行建造,如澳大利亚的 OPAL 反应堆、中国的中

国先进研究堆和摩洛哥的 TRIGA-II，还有一些新研究堆最近已进行调试，如德国的 FRM-II 和尼日利亚的微型中子源反应堆。在比利时，一个新的加速器驱动辐照设施 MYRRHA 正处于后期开发阶段。MYRRHA 拟作为欧洲的一个多用途研究设施。

78. 德国的 FRM-II 是为利用中子束而设计的，其特征是包括一个次级中子源和供特殊试验用的中子导向装置等附件。这些特征有益于开展软物质聚合物、生物物种以及液体和有序物质的研究。另一方面，尼日利亚的微型中子源研究堆将广泛用于对环境、粮食和农业等领域的应用开展活化分析。

79. 预计澳大利亚的 OPAL 反应堆和中国的中国先进研究堆等多用途研究堆将于 2006 年开始运行，其主要活动是放射性同位素生产、硅掺杂和中子束应用。¹²

80. “降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”谋求将使用高浓铀燃料的研究堆转换为使用低浓铀燃料。根据“降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”开展的其他活动是继续支持高密度低浓铀燃料的开发和认证以及促进利用低浓铀靶件生产裂变钼-99。

81. 目前存在的关切是，如果现在不对满足今后的研究堆辐照需求给予充分重视，那么今后获得放射性同位素的可靠性就会出现問題。钼-99 目前只有四个主要工业生产者，但有更多的研究堆被用来辐照高浓铀/低浓铀靶件。目前没有明显的趋势表明工业公司正在考虑转向使用低浓铀靶件，“降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”的参与者已经开始更加集中关注这一问题。阿根廷国家原子能委员会对利用当地生产的低浓铀靶件以中等规模定期生产钼-99 成功地进行了论证，这是在这方面取得的一项显著进步。

E. 放射性同位素应用和辐射技术

E.1. 放射性同位素应用

82. 各种形式的 150 多种不同的放射性同位素正在以各种应用方式用于具有经济意义的许多部门，包括医药、食品加工、工业、农业、结构安全和研究。扩大放射性同位素的应用范围并将这类应用所带来的好处传播到发展中国家的潜力依然很大。目前至少有 25 个国家生产放射性同位素，而据原子能机构/经合组织的一项调查¹³报告，还有 30 多个国家有可能成为同位素的生产国。医学领域占到同位素应用的大多数，其次是工业和研究领域。

¹² 补充文件可在 IAEA.org 网站“2006 年核技术评论”下获得。

¹³ 《同位素的有益利用和生产》，经合组织核能机构和原子能机构第 5293 号出版物，2005 年。

83. 放射性核素发生器系统继续在提供适用于核医学、肿瘤学和介入心脏病学各种应用的诊疗和治疗用放射性同位素方面发挥关键的作用。钷-90 用于放射性核素治疗受到鼓励，因为母体放射性核素锶-90 可以从乏燃料后处理中大量获得。在回收锶-90 之后大规模集中分离钷-90 或制造放射性核素发生器可能成为拥有燃料后处理设施国家的一个主要放射性化学过程。

84. 许多发展中国家对建造放射性同位素生产用医用回旋加速器的兴趣日益增涨。正在探讨将利用浓缩碲靶生产碘的放射性同位素作为一种经济的生产模式。

E.2. 辐射技术

E.2.1. 纳米技术用于工业和卫生

85. 德国已经开发出具有强化表面机械性能的辐射固化聚合物基纳米复合材料。通过辐射固化含有大量纳米级改性硅胶和氧化铝填充物的丙烯酸制剂，已经生产出透明的抗划擦涂层。

86. 宏观聚合物凝胶现已成为公认的生物材料，一般用作软性隐形眼镜片、水凝胶伤口敷料和受控给药装置。人们对微观聚合物凝胶即微凝胶和纳米凝胶的合成、特性和应用的兴趣日益增涨。纳米凝胶属次微米级交联聚合物结构，其大小类似于溶解状态的单聚合物分子。这种凝胶具有一些潜在用途，例如作为药物和基因载体、聚合药物、生物标记物以及作为分离和吸附生物分子的物质。纳米凝胶大多通过乳液聚合方式获得。波兰的一个小组提出了通过对稀释溶液的短时间脉冲电子辐照进行单聚合物线团的分子内交联的方法，该方法的优点是不存在传统工艺中需要的单体、交联剂和其他潜在的有毒化合物。

87. 直接书写技术采用的电子束平版印刷术已经被广泛用于制造纳米级集成电路装置。英国格拉斯哥市大学研究人员使用电子束平版印刷工具在 100 纳米栅距上制作直径小到 20 纳米的部件，提供了供细胞工程使用的纳米点阵。

E.2.2. 工业流程监测

88. 放射性示踪剂和密封源技术继续在各行各业中被广泛用来更好地控制生产过程、提高工艺效率、加强产品质量和数量以及核实通过其他方法取得的资料。

89. 工业流程断层照相术可以提供关于化学反应器指定截面密度分布的详细资料。 γ 射线透射断层照相术目前被化学工艺系统开发商和制造商用来测量工艺容器或管道内空间密度的分布情况。然而，由于工业流程塔的地点、环境和不同设计的多样化，供现场应用的标准工业断层扫描仪的开发过程变得十分复杂。作为工业流程和系统不可或缺的一种诊断工具，利用放射性同位素源的便携式/可搬运式断层照相成像系统的开发在今后将具有重要意义。

90. 主要在核医学领域使用的单光子发射计算机断层照相技术不久可能用于工业堆的诊断。通过单光子发射计算机断层照相取得的资料将比其他方法得到的资料更可靠，且更有针对性。 γ 射线发射断层照相术是工业堆流动动力学研究的一种新方法。例如，滴流床反应堆的液流分布就是用这种技术研究的。图 E-1 表示对精炼厂可以见到的工业塔上液流径向分布进行研究的一个例子。

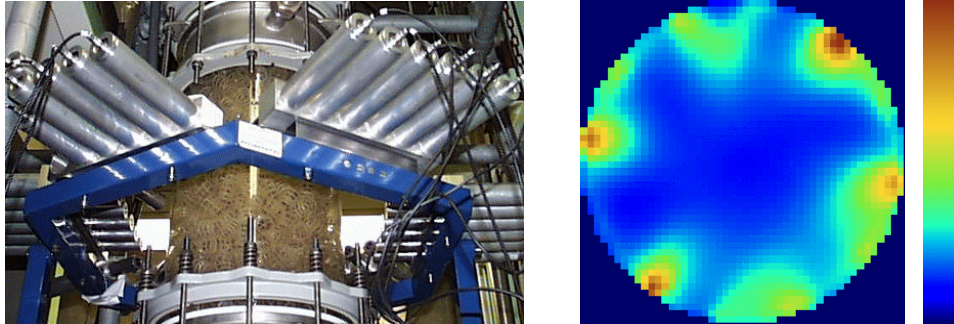


图 E-1. 工业塔周围安装了一个带有 36 个准直探测器的断层照相系统。喷射标有 1.9 吉贝可得-99m 的液相，结果表明在塔壁上出现了一些水沟。

F. 核技术用于粮食和农业

F.1. 作物改良和保护

91. 核技术为植物育种人员提供了有益的工具，并在作物改良方面发挥了重要作用。核技术在这一领域的应用包括利用 γ 射线、X 射线和快中子加强种质变异性的突变诱发；用作遗传指纹识别、绘图和标记物辅助选择方面探测剂的核酸标记以及用于分析基因功能的诱变方法。

92. 由 γ 射线、X 射线、快中子或化学剂引发的诱发突变已导致在植物育种方面取得了一些重大成功。50 多年来，植物育种人员选择和使用了一些有益的突变体。迄今为止，在世界范围 160 多个植物品种中，粮农组织/原子能机构突变体品种数据库已经列出了近 2500 种正式注册的突变体品种。例如，越南已经公布了一个高品质和耐盐的水稻突变体栽培品种（VND95-20），这是排名前五位的出口稻米品种之一，种植面积占到湄公河三角洲 100 万公顷出口稻米区的 28%。估计仅孟加拉国、印度、菲律宾和越南的耐盐水稻栽培品种的目标面积就达到了 430 万公顷。

93. 破译基因功能目前是遗传学的一个重要目标。大量容易获得的脱氧核糖核酸序列信息和诱发突变体越来越成为基因研究的关键要素，因为它们提供了用来系统发现基因并对其进行功能分析的资源。“基因组定向诱导突变技术”是可以用来迅速确定目标基因突变体的技术的一个例子。这种技术目前正在用于水稻、小麦和大麦，而且作

为一种用来解剖控制或影响不同作物重要特征的基因的方法，它表现出了重要的潜力。

94. 不育昆虫的使用和跨界运输迄今为止尚未列入《国际植物保护公约》“第 3 号国际植物检疫措施标准”——“外来生物防治物的输入和释放行为准则”，因为生物防治物被定义为“自我复制的生物体”。2005 年 4 月，经修订的题为“生物防治物和其他有益生物体的出口、运输、进口和释放导则”的“第 3 号国际植物检疫措施标准”得到核准，其中明确把不育昆虫作为有益生物体包括在内。¹⁴此外，《国际植物保护公约》“植物检疫术语汇编”中也列入了“不育昆虫”和“不育昆虫技术”这两个术语。这将为“不育昆虫技术”一词在成员国的适用提供便利，并表明根据世贸组织《实施卫生和植物检疫措施协定》，使用不育昆虫作为植物害虫综合治理的一部分现已得到国际上的承认。

F.2. 牧业生产和健康

95. 在动物健康领域，分子诊断法和核相关诊断法尤其令人关注，因为它们可以把探测动物疾病试验方法的灵敏度和特异性提高到以往无法企及的水平。尽管增加了对非放射性方法的使用，但由于要达到较高的灵敏度，仍然需要使用放射性同位素对蛋白质、脱氧核糖核酸和核糖核酸进行识别和表征。微细加工技术、微应用流体学和纳米技术领域的发展提供了生产在各种不同条件下运行的更加灵敏、快速和健全的装置的可能性。所谓的“单芯片实验室”装置提供了能将复杂的实验室诊断方法（样品处理、目标放大和探测以及探测差异）综合在一个小型化装置中的能力。目前发展诊断装置的一个重要目的就是要让它可以用在这一领域，从而缩短实施预防或控制措施的反应时间。除比较传统的核技术外，核基基因表达法还可以让人们更深入地了解营养、繁殖和疾病因素，从而导致通过简便易行的操作就可以提高牲畜繁殖力。

96. 历史上，放免分析一直是动物繁殖和饲养领域的一项主要技术，它利用放射性同位素来测量生物样品中特定分子的浓度。放射性同位素还作为涉及核苷酸标记的许多技术的基础。通过在人工合成的短脱氧核糖核酸探针中植入放射性同位素（如磷-32、磷-33 或硫-35），研究人员找到了确定脱氧核糖核酸多形性（使得可以确定影响有利特性的基因）和确认母体和（或）计量特定生物样品中脱氧核糖核酸或核糖核酸数量的方法。随后进行的试验可以确定哪种动物承载了优良的有利基因形式，而且这种信息可以用来改进选择的准确性，并反过来提高繁殖力。此外，脱氧核糖核酸多形性的确定和示踪可有助于对所期望种类的基因表征和突出遗传保存。双能 X 射线吸收测量法、磁共振光谱学和计算机断层照相法等新技术可以提供各种方法来原因身体组成、畜体品质和肌肉发育状况，而不必屠宰牲畜。

97. 最近在改进有关瘦素（在脂肪组织新陈代谢和调节中发挥关键作用的一种蛋白质激素）和胰岛素样生长因子的放免分析特性方面的发展，以及对这些因子作用机制的

¹⁴ 补充文件可在IAEA.org网站“2006年核技术评论”下获得。

深入认识表明，存在着对它们加以使用的可能性（单独使用，或者与氧-18 和氢-2 标记的水结合起来使用），也存在着使用碳-13 或碳-14 二氧化物的吸入率技术评定动物的营养、繁殖和能量状况的可能性。在畜牧研究中，用于元素分析的质子诱发 X 射线发射法、质子诱发 γ 射线发射法、热电离质谱测定法、感应耦合等离子体质谱测定法和 X 射线荧光光谱测定法等非侵入性核技术越来越在营养学和毒物学方面找到用武之地。

F.3. 食品质量和安全

98. 食品控制系统需要把整个食品生产链考虑在内，以确保打算供人类消费的植物和动物产品的质量、安全和卫生，这些方面对于跨境贸易也很重要。更多国家的政府目前都在实施这一概念，这部分地是由于消费者对食品安全日益关注的结果。核技术和相关技术有助于各国政府通过制订方法学、指标和导则来实施食物链方案，从而通过良好的农业实践包括实施最佳水管理实践方面的协调一致方案从源头保护食物链免受安全危险。这方面的活动包括改进实验室质量管理和分析技术，以满足有关农药、毒枝菌素和兽药残留物的国际标准。这些活动还包括粮农组织/世卫组织营养法典委员会第 28 届会议通过了协力制定的《利用质谱测定法鉴别、确定和定量测定残留物法典准则》。

99. 最近又有五个国家颁布了有关各类食品的协调统一的条例，这在一定程度上表明，在实施以往通过的、与使用电离辐射有关的国际标准方面已经取得了成功，这些标准现已被全世界 50 多个国家用来防治由食品传播的病原体和虫害。

100. 与实施消费者保护国际标准和促进农业贸易有关的其他活动包括一个应对影响农业的核紧急情况的政府第一行动在线数据库。¹⁵ 通过合作努力对《国际贸易中使用的事态性核污染后食品中放射性核素指导水平法规》进行修订并将其范围扩大到包括其他放射性同位素和将其适用时间延长到核事故或放射性事件发生后一年以上，也将加强受影响地区的国际贸易。

G. 人体健康

G.1. 营养和健康相关环境研究

101. 稳定同位素技术过去一直被用作营养研究的工具，但现在也用于制订和评价营养计划。由于仅使用稳定（非放射性）同位素，这项技术可适用于最弱势群体即婴儿和儿童。与常规技术相比，稳定同位素的使用增加了测量的敏感性和特异性。例如，根

¹⁵ 该数据库可以通过以下网址进入：<http://www.iaea.org/programmes/nafa/dx/emergency/index.html>。

据稳定同位素技术测量的人体组成（肌肉质量）的变化，能够更好地了解营养干预的效能。正如世卫组织最近所突出强调的那样，这类技术能够解决对当地有关艾滋病毒/艾滋病患者营养状况的适当的可持续粮食战略进行评价的需求，并强调了将营养纳入应对艾滋病毒/艾滋病综合措施的重要性。

G.2. 核医学在成像¹⁶和治疗中的应用

102. 正电子发射断层照相成像是现今大多数医疗成像会议中的主要议题，而且有关正电子发射断层照相法的出版物也显著增加（见图 G-1）。这项技术使用附着于生物学标志物的极短寿命放射性同位素，使得核医学医师能够在分子一级跟踪器官功能。尤其是，随着称为氟-18 脱氧葡萄糖的放射性标记葡萄糖或 C11-胆碱的使用，能够在葡萄糖和氨基酸新陈代谢方面对器官进行研究。正电子发射断层照相影像与 X 射线计算机断层照相影像融合，可提供各个患者体内复杂的细节和真实定量的健康变化，从而导致治疗疾病方式的改变。

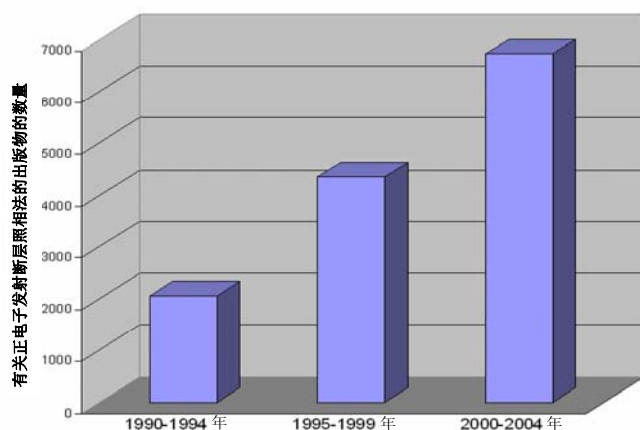


图 G-1. 最近 15 年，各种生物医学科学期刊中有关正电子发射断层照相法的科学出版物的发展情况（来源：联机医学文献分析与检索系统），同时反映了这项技术对癌症和其他疾病成像的影响。

103. 在过去数十年的时间里，计算机速度的提高促进了医疗成像技术领域的变革。在下一个十年内，预计最现代化的放射学科将获得面阵平板摄影板，从而实现“无胶片化”并完成向数字技术的转变。弃用化学法处理胶片具有很好的成本效益，并可导致图像的质量和可靠性均有实质性的改进，因此具有导致总体降低诊断用 X 射线对患者产生照射的潜力。这些进展加之计算机断层照相系统固有的数字性质，为建立能够包含各个患者完整医疗档案包括其一生所有成像研究资料的电子医疗记录系统奠定了基础。

104. 核医学疗法应用方面的主要发展是治疗淋巴瘤的放射性标记分化抗原簇 20 单克隆抗体和专门治疗神经内分泌肿瘤的放射性标记肽的日常使用。这最终将促进与常规化疗相比副作用明显减少的靶向疗法进入一个全新时期。还向核医学界提供了用于有效缓解的各种放射性药物。这些药物对于不能实施治疗的癌症转移情况特别有用，从而

¹⁶ 补充文件可在IAEA.org网站“2006年核技术评论”下获得。

能够以成本效益好的方式改善生活质量。放射性标记治疗抗体正在导致患者保健得到显著改善，并在与化疗制剂结合使用后提高了总体存活率。

G.3. 剂量学和医学辐射物理学

105. 目前，癌症治疗的前沿技术称为“剂量绘画”，功能成像方面的进展催生了这项技术。随着磁共振成像的出现，已有可能进行光谱研究或获得能够呈现不同活性水平肿瘤区域的磁共振成像功能影像。但在最近几年，正电子发射断层照相法已成为功能成像的主要推动技术。目前已经有可能在肿瘤内定位可能需要更高辐射剂量水平的区域，例如，由于细胞似乎缺氧或由于局部供血正在快速扩张而抗辐射的区域，或许可发现一个侵入性病灶。这种能力几乎肯定将导致将不同的剂量施用于肿瘤中不同的功能部位。通过功能成像研究可以改变从一个治疗疗程到下一个疗程的剂量绘画，以定期监测肿瘤的反应。

G.4. 放射性药物

106. 锝-99m 仍然是世界范围内诊断核医学领域最广泛使用的放射性同位素，每天要进行四万多次这类疗程。放射性药物在诊断核医学中的使用继续以每年 10—15% 的速率增长。

107. 治疗用放射性药物的使用不断增加，并正在开发利用发射粒子的放射性核素的多种新放射性药物。用于治疗癌症和关节炎的若干基于钷-90 的放射性药物目前已处于临床试验阶段，预期今后将有广泛的应用。镱-177 是一种理想的治疗用放射性核素，它具有足够长的半衰期，易于制备而且制成品也易于运输，因此正在受到关注。

G.5. 辐射肿瘤学

108. 最近几年，放射治疗领域的主要进展是通过若干高质量临床试验发现放射治疗添加药剂能够提高肺癌、宫颈癌、乳腺癌、头颈部癌、胃癌、直肠癌、脑癌和前列腺癌等很多常见癌症患者的存活率。但在某些病例中，这种做法的代价是增加了毒性。目前正在继续研究，以期采用将能保持药剂对癌组织的放射致敏效应同时又能减少对健康组织的毒性的方式来改进药剂及其靶分子。也正在对以下方面进行研究：监测化学改进剂对辐射效应的缓发毒性，以及确认有助于癌细胞在辐照后未被杀死的靶分子和对健康组织造成辐射损伤的靶件。

109. 最近 20 年见证了近距离疗法的持续发展，这种疗法是将密封放射源置于靶组织的近旁或使之与靶组织接触。利用这种模式，能够安全地对某一局部靶体积在短时间内施用高辐射剂量。较新的高剂量率源、远程控制技术、外科技术和治疗规划软件促进了这种有效治疗模式的快速发展。特别是，最近开发的高剂量率钴-60 源由于与其他源相比不太经常需要更换而使现代高剂量率近距离疗法能够得以施展。

H. 水事和环境

H.1. 水资源

H.1.1. 同位素水文学技术

110. 地下水管理是关系到人类可持续发展的一个关键问题，特别是在半干旱和干旱地区尤其如此。水需求量的日益增加和地表水资源的有限可利用率（以及在很多情况下的质量问题）已导致急遽开发地下水以供供水、灌溉和工业使用。对于合理规划而言，充分了解含水层的性质（地下水来源、补给和更新途径、易受污染的脆弱程度和水体之间的相互联系）是制订可靠发展战略的一个先决条件。

111. 原子能机构已开始着手汇编和传播世界范围内含水层和河流同位素数据的工作。还在利用这些数据绘制化石水专题地图，以帮助决策者采用更好的地下水管理实践。

112. 20 世纪 50 年代，双入口气源质谱仪的开发宣告了同位素在水文学和地质学中应用的迅猛发展。水文样品同位素分析新技术的发展则为革新同位素在水资源管理中的应用提供了广阔的前景。基于激光技术的便携式仪器仪表已经可供桌面使用或现场使用。与双入口质谱仪相比，这种相对廉价、技能要求低和低成本的仪器仪表可以最低廉的运行成本由研究人员和类似的专业人员进行操作，而且能够克服当前由于缺乏易使用的同位素分析方法而构成的阻碍同位素在水文学中更广泛应用的障碍。激光同位素仪器的使用能够促进在世界范围内进行大量同位素测量，从而有助于提供必要的资料，以应对诸如了解和管理含水层补给、确定地下水流动模式或建立地表水和地下水之间关系等一些关键的水文地质挑战。

H.1.2. 海水淡化

113. 在全球淡水需求量不断扩大和可能比大型动力堆更适于进行海水淡化的中小型反应堆发展的驱动下，利用核能淡化海水的工作不断取得进展。在核能淡化海水领域，日本已积累了超过 143 堆-年的经验，哈萨克斯坦在阿克套快堆于 1999 年停堆之前也已积累了 26 堆-年的经验。

114. 印度正在对卡尔帕卡姆核能淡化海水示范厂进行全面调试，该厂若干年来一直利用反渗透技术进行海水淡化，预定于 2006 年开始采用多级闪蒸工艺进行海水淡化。2004 年，印度对位于特朗贝的 CIRUS 重水研究堆的一个低温蒸发装置进行了调试，以便利用其慢化剂余热从海水生产高质量淡水。2005 年，韩国原子能研究院申请建造一座五分之一规模、配有海水淡化装置的 6.5 万千瓦（热）系统一体化模块式先进原型反应堆的建造许可证。巴基斯坦已开始建造与卡拉奇核电厂现有加压重水堆相匹配的一座用于论证目的的多级蒸馏厂。中国正在核能与新能源技术研究所建立一个试验系统，用以确认多效蒸馏工艺的热工水力学参数。在埃及，预热反渗透试验设施的建造工作预定于 2006 年完成。

H.2. 环境

H.2.1. 排雷

115. 核技术对于探测包括地雷在内爆炸物的适用性的调查已表明，特别在潮湿情况下不能充分可靠地探测出小于 100 克的目标，而且基于中子反向散射体的技术只适用于干燥地带，因为被探测的是爆炸物中的氢组分。迄今很难确定任何单一的核技术具有优势或能够作为一线探测技术。核技术更有可能作为在初步查明某一非特异可疑样品/部位之后的“确认”手段。对于非特异可疑部位，还需采取一些非核技术。因此，在原子能机构协调下，发达国家和发展中国家的一些小组正在继续进一步研究开发各种技术的综合利用，研究工作也涉及不同能量的中子（以及适合于现场应用的中子源）。

H.2.2. 放射性核素示踪剂用于海洋循环与气候相关性研究

116. 海洋循环是控制我们气候的关键过程之一。清洁取样和分析技术以及高精度质谱测定方面的最新进展在很大程度上促进了利用放射性核素作为海洋过程示踪剂的能力。这些技术是最近实施的“国际海洋生物地球化学循环国际研究计划”的一个促进因素，该计划的目的是协调有关示踪元素及其同位素海洋循环的研究工作。预期这项计划将显著地增进对海洋放射性核素行为的了解。

H.2.3. 海洋食物链中的生物积累

117. 放射性核素和金属能够被水中的有机体积累，如果排泄少于摄入，其浓度就会增加，这个过程称为生物积累，它会使某种污染物在食物链中有可能具有更大的毒性。一些研究已表明，有毒的放射性核素和钋、硒、锌和镉等金属污染物也可能发生生物积累。似乎与生物群中蛋白质结合的金属更有可能被生物积累，但至今还没有对评价海洋食物链中各种金属的生物积累情况进行过系统评定。原子能机构海洋环境实验室已开始利用放射性示踪剂对各种金属进行调查，以测量其在不同海洋食物链中生物积累的可能性。

H.2.4. 利用特定化合物同位素分析揭示碳循环

118. 海洋中含有的二氧化碳量是大气中的 50 倍，而且其每年吸收的二氧化碳量占人类燃烧化石燃料产生的二氧化碳量的 30—40%。因此，海洋在全球碳质量平衡中发挥着至关重要的作用。碳同位素（碳-14 和碳-13）使地球化学家能够跟踪全球二氧化碳循环，这类技术在评定今后的缓解方案时将非常有价值。同位素化学家已经成功地将这些碳同位素技术适用于较小的样品，并使之与气相色谱-同位素比质谱测定法结合在一起，从而使得有可能分析不足百万分之一克有机化合物中的碳同位素比，并使得能够确定环境中发现的有机化合物和污染物的更多来源、污染路径和去向。