

第四十九届常会

临时议程项目 18
(GC(49)/1)

核技术评论——2005 年最新资料

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”，并在间隔年份提供简要最新资料。本报告即是这样一份最新资料，它重点阐述了主要在 2004 年值得注意的发展。
- “核技术评论——2005 年最新资料”评述了以下领域：原子数据和核数据、动力应用、粮食和农业领域的核技术、人体健康、水资源、海洋和陆地环境、研究堆应用、加速器应用以及工业过程监测。
- 有关国际原子能机构核科学技术活动的资料可参阅国际原子能机构《2004 年年度报告》(GC(49)/5)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2004 年技术合作报告》(GC(49)/INF/2)。
- 对该文件作了修改，以便尽可能考虑理事会的具体意见和成员国提出的其他意见。

核技术评论——2005 年最新资料

总干事的报告

目 录

正文摘要.....	1
A. 原子数据和核数据.....	3
B. 动力应用.....	4
B.1. 当今的核电.....	4
B.2. 前景.....	7
B.2.1. 最新中期预测.....	7
B.2.2. 可持续发展和气候变化.....	8
B.2.3. 当前的问题.....	9
B.2.4. 资源.....	13
B.2.5. 先进的裂变和聚变技术.....	14
C. 粮食和农业领域的核技术.....	15
C.1. 可持续土地管理和水利用效率.....	15
C.2. 作物改良.....	16
C.3. 作物保护.....	17
C.4. 改进牲畜的繁殖力和健康.....	18
C.5. 粮食安全以及植物和动物产品的安全.....	18
D. 人体健康.....	18
D.1. 营养学.....	18
D.2. 核医学.....	19
D.3. 放射治疗.....	20
D.4. 剂量学和医用辐射物理学.....	20
E. 水资源.....	21
F. 海洋环境和陆地环境.....	22
F.1. 海洋环境.....	22
F.1.1. 海产品中污染物的放射性示踪.....	22
F.1.2. 厄尔尼诺南徊现象的同位素示踪.....	22
F.1.3. 利用天然放射性核素的不均衡来示踪海洋内部碳汇.....	22
F.2. 陆地环境.....	23
F.2.1. 放射生态学研究.....	23
G. 研究堆应用.....	24
H. 加速器应用.....	25
I. 工业过程监测.....	25
I.1. 辐射加工——纳米技术.....	26

核技术评论——2005 年最新资料

总干事的报告

正文摘要

1. 2004 年是民用核电生产 50 周年。虽然目前核能的前景仍不明朗，但对它的期望值却在明显提升。经济合作与发展组织（经合组织）国际能源机构和国际原子能机构都上调了它们对核能的中期预测。国际原子能机构目前对 2030 年全世界核电装机容量的预测为 423—592 吉瓦（电），相比之下 2004 年底的预测为 366 吉瓦（电）。造成这种增长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、包括《京都议定书》生效在内的新的环境限制、一些国家对能源供应保障的关切、以及若干关键国家雄心勃勃的发展计划。

2. 在年终时在建的 26 座反应堆中，亚洲占 18 座，而最近并入电网的 30 座反应堆中亚洲占 20 座。芬兰已开始 Olkiluoto-3 号机组的挖方工作，这是自 1991 年以来西欧新建的第一个机组。法国电力公司在弗拉芒维尔为欧洲示范压水堆选定了场址，预计将于 2007 年开始建造。美国核管理委员会批准将另外 11 个许可证各延期 20 年（每座电厂的许可寿期总计为 60 年）。作为美国“2010 年核电计划”的一部分，该国能源部将与两个正在进行申请准备的国际投资财团共同出资，试验一种新的简化的许可证审批过程。

3. 核电在全球发电量中的份额稳定在 16%，这表明核电连续 18 年与全球总用电量保持同步增长。并网的新电厂有 5 个，其数量正好等于退休的电厂数量，但新增的装机容量总计为 4785 兆瓦（电），而退休的电厂容量仅为 1385 兆瓦（电）。此外，加拿大 1 台闲置的机组已重新并入电网。但是，2004 年动工建造的新项目仅有两个，而根据目前逐步取消核能的政策，德国的 Obrigheim 反应堆和瑞典的 Barsebäck-2 号反应堆已在 2005 年 5 月关闭。

4. 过去 15 年一直稳定在低位的铀价格持续攀升，从 2002 年的 25 美元/千克上升至 2005 年 6 月 29 日的 75 美元/千克。在近 15 年中铀生产一直远低于铀消费，因此当前的价格增长反映了这样一种日渐明显的看法，即弥补两者之间差额的二次来源正被逐步耗尽。

5. 截至 2004 年底，有 6 个核电厂已退役完毕，有关场址已解除监管，可供无限制地使用。17 座反应堆已部分拆除并安全封闭，33 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。为处理极低放射性的退役废物，一些国家引入了一种新的放射性废物种类——“极低放废物”，这种废物比传统低放废物需要较少的特殊处理，因此处置费用要低很多。2003 年在法国莫维尔启动的一个极低放废物处置库 2004 年达到了全面运行。

6. 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。瑞典在 2002 年开始进行的对两处候选场址的详细地质勘察正迅速进行，同时还开展了公众咨询。在美国，一个许可证申请的准备工作已取得良好进展。

7. 继续就各种反应堆类型开展有关先进堆设计的国家研究，包括水冷堆、气冷堆、液态金属冷却堆及混和系统。由美国发起的“第四代国际论坛”的 5 个成员在 2005 年 2 月签署了一份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 23 个。该项目完成了一系列测试其评定方法的案例研究，并于 12 月发表了有关“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”最新方法的最终报告。

8. 随着 2005 年 6 月 28 日国际热核实验堆的参与方中国、欧洲联盟、日本、大韩民国、俄罗斯和美国宣布该堆将设在法国卡达拉什，又朝着实现“国际热核实验堆”的目标迈进了一步。国际热核实验堆的目的是通过建造一个功能性聚变电厂证明聚变能在科学和技术上的可行性。预计国际热核实验堆的建造将需要 8 年左右的时间，竣工之后将运行 20 年。它将是世界上第一个产能量至少超过耗能量 5 倍的受控核聚变反应装置。国际热核实验堆将为促进能源应用的核科学技术开辟新的视野，预计还将在其他许多领域带来衍生产品。

9. 核技术的发展非常迅速，并涉及许多应用领域。本最新评论尽管不能做到无所不包，但它涵盖了被视为对原子能机构成员国有重要意义的某些关键领域和趋势，它们与“千年发展目标”有关，并将在帮助实现这些目标和解决 2002 年约翰内斯堡可持续发展问题世界首脑会议上确定的水、能源、健康、农业和生物多样性等问题方面发挥作用。

10. 鉴于农业用水占全球用水量的 70%，利用多种稳定同位素评定各种耕作和水灌溉系统中的水利用效率（包括例如考察水灌溉安排对肥料使用效率的影响）对粮食和水的供给具有双重益处。利用诱变育种鉴别水利用效率高并适应在恶劣环境生长的作物改良品种有助于提高对有限水资源的利用效率。水资源管理也表明日趋侧重于对跨境含水层的管理，并利用同位素工具确定水的流动、水年龄和确定污染源。

11. 在人体健康方面，短寿命放射性核素正在帮助临床医生研究新陈代谢过程。发展最快的技术之一是正电子发射断层照相法，该方法利用了附着于生物标记的极短寿命放射性同位素，该技术与 X 射线计算机成像相结合，可为健康监测和诊断提供一个更

为有力的工具。随着图像引导放射治疗技术的采用，放射治疗领域正在出现新的挑战，该技术能够根据肿瘤和患者位置的变化进行追踪并保持射束的精确度。

12. 在海洋环境方面，通过利用同位素研究厄尔尼诺南徊现象可望对气候变化产生新的深入理解。对海洋吸收二氧化碳的能力以及由此对气候产生的影响都有了越来越多的认识。使用海水中铀-238 天然产生的钍-234 进行的研究正在帮助海洋学家更好地了解海洋在气候变化领域中的作用。通过核仪器仪表的使用，比如通过开发使用航空 γ 射线普查的遥感技术，还正在帮助了解陆地环境的放射生态学。

13. 研究堆和加速器不断发现新的用途。研究堆生产的放射性同位素在医疗和工业领域得到了广泛应用，而研究堆产生的中子束为利用中子散射和射线照相技术的各种应用提供了强有力的探测手段。基于加速器的核技术在新材料开发方面显示出有广阔前景，而加速器质谱测定法则激发了在碳-14 测龄技术、药物研究和环境监测方面的兴趣。

A. 原子数据和核数据

14. 原子数据和核数据继续为反应堆的规划和设计、电厂的运行和安全改进以及促进核设施退役活动提供基本依据。重要的技术发展包括原子能机构核数据库客户服务和编制更好的原子和核物理数据库。与美国国家核数据中心和核能机构等其他主要数据网络中心的联系依然卓有成效。特别在因特网和信息技术工具不断发展的激励下，正在为满足以方便、可靠和独立于平台的方式获得高质量核数据的国际需求进行更多的准备。

15. 所取得的显著效益可以归结于将原子能机构的核数据库和服务转移到其他通讯平台的结果。与美国国家核数据中心联合进行的这项共同努力导致在 2004 年年中完成了广泛的第一阶段工作。已经测试和安装了现代化软件和硬件技术，从而得以启动新的更加雄心勃勃的现代化方案，而且还导致开发出多平台核数据系统，使最终用户获得的可访问性和可靠性迈上一个新的台阶。确认了进一步的改进，并建议在 2005 年加以实施。

16. 原子数据和分子数据汇编与评价方面的不断进展不仅支持了“国际热核实验堆项目”，而且支持了致力于惯性约束聚变的其他研究和技术工作。更密切的合作范围以及对支持核聚变研究的数据需求的审查保证了全球重点。

17. 辐射的医学应用在不断增长，因此，为有效和安全的治疗规划以及设施本身的最佳设计提供可靠数据对于确保辐射医学应用的成本效益和广泛实用性至关重要。为了以最佳条件生产能达到安全医学应用所需纯度的氟-18、锶-82 和碘-123 等放射性同位素，需要深入了解这些数据。癌症发病率以及预计今后几年发病率将有惊人的上升要

求为征服这种疾病齐心协力并制订相应的战略，辐射肿瘤学家和医学物理学家正在极力寻求适当的支持性原子数据和分子数据，以帮助推出有希望的治疗方法。

B. 动力应用

B.1. 当今的核电¹

18. 截至 2004 年底，全世界有 440 个核电厂在运行。在 2004 年期间，核电提供了世界电力的 16%。自 1986 年以来该百分数大致保持稳定，表明 18 年来核电增长速度与全球总电力增长速度持平。

19. 全球核电厂能量可利用因子从 2003 年的 81%上升到到 2004 年的 83%左右。相比之下，10 年前即 1994 年全球核电厂能量可利用因子为 76%。

20. 表 B-1 扼要介绍了截至 2004 年 12 月 31 日世界各地核电状况。

21. 2004 年有 5 台新建核电机组并网发电（乌克兰 2 台，中国、日本和俄罗斯联邦各 1 台），此外加拿大有 1 台闲置机组重新并网。相比之下，2003 年有 2 台新建机组并网发电（此外加拿大有 2 台机组重新并网），2002 年有 6 台新建机组并网发电。

22. 2004 年有 5 台机组退休，即英国的 4 台 50 兆瓦（电）机组和立陶宛 1185 兆瓦（电）的 Ignalina-1 号反应堆。相比之下，2003 年和 2002 年分别有 6 台和 4 台机组退休。

23. 按照原子能机构关于建造工作从浇注第一罐混凝土开始的定义，2004 年有 2 个核电厂开工建造，即印度的 500 兆瓦（电）原型快增殖堆和日本的 866 兆瓦（电）Tomari-3 压水堆。此外，俄罗斯联邦的 2 个核电厂 Kalinin-4 和 Balakovo-5 重新恢复了建造工作，这两个核电厂此前已被列入“暂停建造”。另外，芬兰已开始为 1600 兆瓦（电）的 Olkiluoto-3 号核电厂进行场址准备工作。2003 年和 2002 年分别有 1 台和 7 台机组开工建造。

24. 目前的扩展以及近期和远期的增长前景均集中在亚洲。如表 B-1 所示，截至 2004 年底，世界各地在建的 26 座反应堆中²，有 17 座分别位于中国、大韩民国、日本或印度。在最近并网发电的 30 座反应堆中，有 20 座位于远东和南亚。

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/Anrep2004/index.html>) 和原子能机构网页 <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>)。

² 总计中还包括了台湾。

表 B-1. 世界运行和在建核动力堆（截至 2004 年 12 月 31 日）^a

国家	运行中反应堆		在建反应堆		2004年供应的核电量		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	年数	月数
阿根廷	2	935	1	692	7.3	8.2	52	7
亚美尼亚	1	376			2.2	38.8	37	3
比利时	7	5 801			44.9	55.1	198	7
巴西	2	1 901			11.5	3.0	27	2
保加利亚	4	2 722			15.6	41.6	133	2
加拿大	17	12 113			85.3	15.0	509	7
中国	9	6 602	2	2 000	47.8	2.2	47	11
捷克共和国	6	3 548			26.3	31.2	80	10
芬兰	4	2 656			21.8	26.6	103	4
法国	59	63 363			426.8	78.1	1 405	2
德国	18	20 679			158.4	31.8	666	0
匈牙利	4	1 755			11.2	33.8	78	2
印度	14	2 550	9	4 092	15.0	2.8	237	5
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	54	45 468	3	3 237	273.8	29.3	1 176	4
大韩民国	19	15 850	1	960	124.0	38.0	239	8
立陶宛	1	1 185			13.9	72.1	38	6
墨西哥	2	1 310			10.6	5.2	25	11
荷兰	1	449			3.6	3.8	60	0
巴基斯坦	2	425			1.9	2.4	37	10
罗马尼亚	1	655	1	655	5.1	10.1	8	6
俄罗斯联邦	31	21 743	4	3 775	133.0	15.6	791	5
斯洛伐克	6	2 442			15.6	55.2	106	6
斯洛文尼亚	1	656			5.2	38.9	23	3
南非	2	1 800			14.3	6.6	40	3
西班牙	9	7 585			60.9	22.9	228	2
瑞典	11	9 469			75.0	51.8	322	1
瑞士	5	3 220			25.4	40.0	148	10
乌克兰	15	13 107	2	1 900	81.1	51.1	293	6
英国	23	11 852			73.7	19.4	1 354	8
美利坚合众国	104	99 210			788.6	20.0	2 975	8
总计 ^b	440	366 311	26	20 826	2618.6	16%	11 588	6

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以下数据：

- 6 台机组在运行，4884 兆瓦（电）；2 台机组在建，2600 兆瓦（电）；
- 37.9 万亿瓦·小时核发电量，占 2004 年总发电量的 20.9%；
- 140 年零 1 个月的总运行经验。

25. 在亚洲地区，日本的装机容量最大，它有 54 座反应堆在运行，3 座反应堆在建。截至 2004 年底，东京电力公司 2002 年停运的 17 座反应堆有 16 座已恢复运行。这使 2004 年核电在日本电力中所占份额从 2003 年的 25% 提高到 2004 年的 29.3%，如表 B-1 所示，但仍低于 2002 年和 2001 年所占 34% 的份额。

26. 大韩民国 19 座反应堆在运行，1 座反应堆在建，2004 年总电力的 38% 来自核电。

27. 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。印度有 14 座运行中反应堆，2004 年底其电力的 2.8% 来自核电。但是印度还有 9 座反应堆在建，其中包括 2004 年在 Kalpakkam 开工建造的 500 兆瓦（电）原型快增殖堆，印度当前的目标是到 2050 年核电将提供 25% 的电力。

28. 中国在 2004 年底有 9 座运行中反应堆，2 座反应堆在建，其电力的 2.2% 来自核电，中国计划到 2020 年将装机容量扩大到 32—40 吉瓦（电），使核电占供电量的 4—5%。除已在建的机组外，中国国务院在 2004 年还正式批准了至少 7 吉瓦（电）新装机容量。

29. 随着 Kalinin-3 号反应堆在 2004 年 12 月并网发电以及 Kalinin-4 号和 Balakovo-5 号恢复建造，该年底俄罗斯联邦有 31 座反应堆在运行，另有 4 座反应堆在建。乌克兰的 Khmel'nitski-2 和 Rovno-4 已并入电网，目前有 15 座反应堆在运行，2 座反应堆在建。东欧目前唯一的另一座在建反应堆是罗马尼亚的 Cernavoda-2。如上所述，立陶宛的 Ignalina-1 已在 2004 年底退休。

30. 西欧在运行的核电机组从 2001 年的 148 台减少到 2004 年底的 137 台，主要是由于在 20 世纪 50 年代至 60 年代英国有 10 台小型机组退休（8 台 50 兆瓦（电）机组和 2 台 123 兆瓦（电）机组）。西欧目前没有在建机组，但芬兰在 2004 年开始了 Olkiluoto-3 的挖方工作。此外，在法国议会通过必要的法律后，法国电力公司也为 1 座示范欧洲压水堆选择了场址，预计该压水堆将于 2007 年开始建造。这 2 个设施将是预定建造的欧洲第一批压水堆。随着 20 世纪 70 年代和 80 年代建造的核电厂老化，法国已开始逐步采取“以核代核”路线。至于英国，2003 年能源政策白皮书没有建议新的核电厂，而是引述了核电厂的费用和尚未解决的废物问题，但不排除在某个时刻需要新增核容量的情况下采用核方案。

31. 在美利坚合众国，核管理委员会（美国核管会）已批准另外 11 个许可证各延长 20 年（每个核电厂得到许可的寿期总计为 60 年），从而使截至 2004 年底已批准许可证延长的总数达到 30 个。美国 104 个核电厂中约四方之三已经获得、已经申请或开始打算申请这类许可证延长。美国能源部已批准对 2 个工业财团的财政援助，以便核电厂许可证审批示范项目能够利用美国核管会颁发的新的联合许可证。这种援助是美国核电 2010 年计划的一部分，其目的是在 2010 年之前部署新的核容量。

32. 在加拿大，核电生产的近期发展形式是重新启动近几年内关闭的 8 台核电机组（加拿大总共有 22 台核电机组）中的部分机组或全部机组。首批 2 台这类机组于 2003 年重新启动。第 3 台机组 Bruce A-3 于 2004 年重新启动，安大略省当局已批准有关重新启动 Pickering A-1 的安大略电力生产计划。

33. 在拉丁美洲，阿根廷、巴西和墨西哥各有 2 台运行中核电机组，阿根廷有 1 台核电机组在建。

34. 南非有 2 台运行中核电机组。

B.2. 前景

B.2.1. 最新中期预测³

35. 原子能机构每年发布核能最新中期预测。图 B-1 展示了 2004 年最新资料以及经合组织国际能源机构（能源机构）《2004 年世界能源展望》中提供的最新参考假想方案。图中每个三重条的左侧条为原子能机构的低值预测，它设想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。该低值预测标有“L”，并按地区分列核电产量细目。

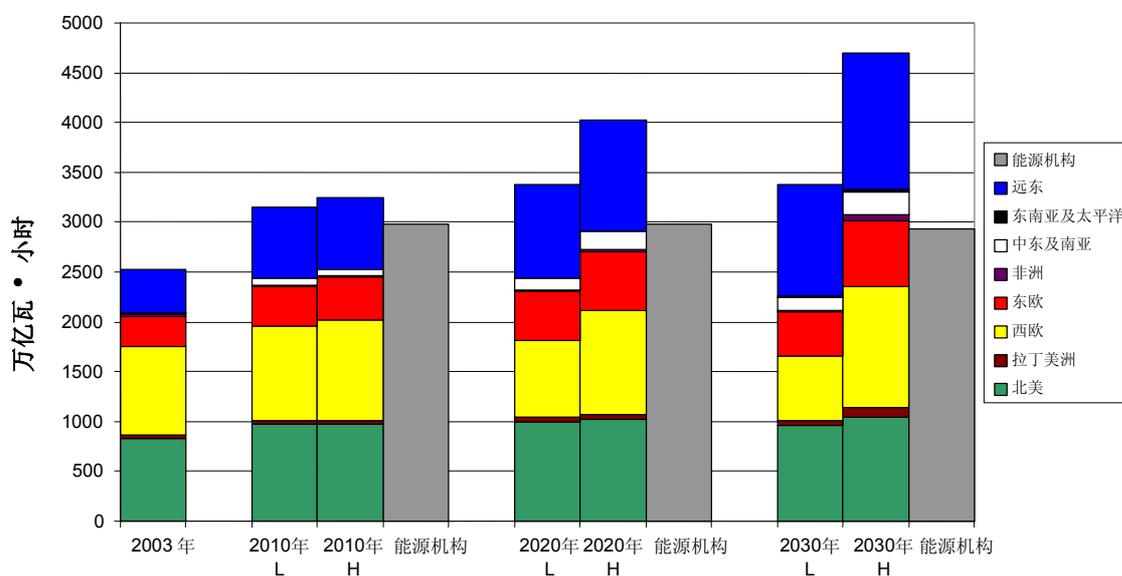


图 B-1. 2003 年全球核电发电情况和直到 2030 年的三项预测。

³ 有关原子能机构最新预测的更详细资料可见 <http://nesisda2/rds-1/>。原子能机构有关中期预测资料收集和专家评价的近期和当前工作已在最新“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）及其网页 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/> 中作了介绍。

36. 每个三重条的中条为原子能机构的高值预测，除已明确在进行的核项目外，它还包括了其他已合理规划和建设的核项目。高值预测条标有“H”，并且也按地区分列核电产量细目。

37. 为便于比较，每个三重条的右侧条表示能源机构《2004 年世界能源展望》所载最新参考假想方案。能源机构的参考假想方案隔年更新，该假想方案是众所周知在有关能源政策和市场的国际讨论中被频繁引用的参照点。它基本上是基于与原子能机构低值预测相同的方案。图 B-1 中二者之间数值差别最大的部分源于能源机构对东欧的预测值较低。

38. 原子能机构的低值预测预计 2030 年核发电量为 3379 万亿瓦·小时，与 2003 年相比核发电量提高 34%。意味深长的是，自 2000 年以来原子能机构的低值预测逐年上调。图 B-1 所示 2020 年 3378 万亿瓦·小时比原子能机构 2000 年预测的 2020 年数值提高了 60%。（原子能机构 2000 年的预测只考虑到 2020 年。）

39. 原子能机构的高值预测表明从 2003 年至 2030 年核发电量增长 86%。高值预测逐年的变化较小，且变化模式也不大一致。如果一并考虑这些预测的演变情况，即可认识到一种前景相当良好但增长速度并不引人注目的工业内涵。高值预测中合理的中期项目一览表相当稳定，每年有越来越多的这类项目从前景有望提升为正在进行的实际项目。

40. 图 B-1 表明世界不同地区之间存在明显的差异。如上所述，核电的扩展集中在远东，在所有预测中该地区的增幅最大。在原子能机构的高值预测和低值预测中，东欧的发展显著，但北美的增长非常一般。对西欧的低值预测中出现收缩，这是因为核电厂的退休速度超过了新建速度，但在高值预测中有明显扩展。尽管中东及南亚是从 2003 年很低的基础起步，但在原子能机构的两个预测中，该地区的增长速度均较高。

41. 能源机构参考假想方案所采用的地区划分与原子能机构略有不同，虽然图 B-1 没有列出这种参考假想方案的地区细目，但基本模式与原子能机构的低值预测大致相同，即远东及南亚扩展，西欧收缩，而北美则稳定。

B.2.2. 可持续发展和气候变化⁴

42. 从较长远观点看，核电的发展前景除其他外将特别取决于它将如何充分地有助于满足日趋增长的全球能源需求，并减轻与能源利用有关的环境负担。关于日趋增长的全球能源需求，2004 年没有就促进可持续发展的能源需求进行重要的国际讨论。联合国可持续发展委员会将在 2006 年和 2007 年第十四届和第十五届会议上再次讨论能源问题。

⁴ 有关原子能机构在可持续发展和气候变化能源相关方面活动的更详细资料可见最新“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）的相关章节和原子能机构网页 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>。

43. 关于环境保护，2004 年主要的全球性发展出现在 11 月，因为俄罗斯联邦批准了《联合国气候变化框架公约》“京都议定书”。其结果是，批准该议定书的附件 I 国家⁵总计占 1990 年附件 I 二氧化碳排放量的 55% 以上，并且该议定书已于 90 天后的 2005 年 2 月 16 日生效。

44. “京都议定书”生效对核电发展几乎没有什么直接影响。该议定书仅涵盖第一个承诺周期 2008—2012 年，且不同国家已经采用不同的政策来满足其“京都议定书”限值。尽管核电的温室气体排放量非常低，整个核燃料链的温室气体排放量大致与风能和太阳能相同，仅为 2—6 克碳/千瓦-小时，但并非所有国家的政策都有利于核电。然而，从较长远观点看，预计向“限碳”经济发展将使核电越来越具吸引力。过去投资者看不到核电具有最低程度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。“京都议定书”目前是广泛、协调地限制温室气体排放的唯一有效途径，因而也是对核电避免温室气体排放赋予实际经济价值的一个重要步骤。

B.2.3. 当前的问题

经济

45. 正如在美国和其他地方继续许可证延长步伐所证明的那样，运行良好的现有核电厂仍然是普遍具有竞争性而又有利可图的电力来源，尽管美国以外地区的许可证延长周期普遍较短和较为频繁，或采取“滚动延长”的形式。

46. 对于新建的核电厂，核电的竞争性尤其取决于它必须与之竞争的其他方案的费用、投资者前景以及核电将在其中运作的能源和电力市场。如表 B-2 所示，最近对新核电厂及其主要竞争者的费用概算所展示的范围反映了不同的技术、国家资源状况和投资者前景。表 B-2 的范围涵盖了最近报告的反映当前经验的两项概算。据加拿大原子能有限公司估算，建成中国浙江秦山 3-1 和秦山 3-2 号机组所需的费用为 1500 美元/千瓦（电）（或根据表 B-2 中所用的汇率为 1163 欧元/千瓦（电）），据报告 Olkiluoto-3 欧洲压水堆的价格为 1920 欧元/千瓦（电）。

47. 2004 年电力市场 2 个重要的持续趋势是市场日趋自由化以及对温室气体排放的限制更加严格。例如，在 2004 年，欧洲联盟 15 个成员国的电力市场（在 2004 年欧盟扩大之前）已对非隶属客户全面开放，2004 年期间日本整个电力市场的 40% 已经开放（2005 年将增加到 60%）。于 2003 年 10 月发布的欧盟指令也确定了将于 2005 年 1 月 1 日生效的有关二氧化碳排放的欧洲联盟排放贸易机制，并在 2004 年期间制订了旨在确定装置初始排放许可量的“国家分配计划”。截至 2004 年底，欧洲委员会已经完成对 21 项“国家分配计划”的评定。欧洲委员会无条件地批准了 15 项“国家分配计划”，有条件地批准了另外 3 项，并“部分拒绝”了其余的 3 项。

⁵ 附件 I 国家系指截至 1992 年的经合组织国家加上当时处于经济转型的国家。

表 B-2. 近期研究得出的比较费用概算

	麻省理工学院 ^a	芝加哥大学 ^b	皇家工程科学院 ^c	能源和原材料总署 法国 ^d	经济、贸易和工业部 日本 ^e	加拿大能源研究院 加拿大 ^f	核能机构/ 国际能源机构 ^g
归一化价格 ^h	欧元 分/千瓦·小时 ⁱ	欧元 分/千瓦·小时	欧元 分/千瓦·小时	欧元 分/千瓦·小时	欧元 分/千瓦·小时	欧元 分/千瓦·小时	欧元 分/千瓦·小时
核	5.2	3.2-5.5	3.3	2.8	3.8	3.4-5.8	1.6-5.3
煤	3.3	2.6-3.2	3.6-5.0	3.2-3.4	4.1	3.1-3.8	1.2-5.3
天然气	2.9-4.3	2.7-3.5	3.1-4.0	3.5	4.5	4.7-4.9	2.9-5.0
石油					7.8		
水力发电							3.1-18.8
禽肥			9.7				
向岸风			5.3-7.7				2.4-11.2
向海风			7.9-10.3				4.0-9.5
波浪/海洋			9.4				
太阳光电							9.4-145.4
基础价 ^j	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)	欧元/千瓦 (电)
核	1550	930-1395	1642	1413	2026	1525-1931	832-1945
煤	1008	916-1132	1042-1171	1000-1100	1975	1040	557-1819
天然气	388	388-543	428	505	1191	462	329-1001
石油					1953		
水力发电							1194-5413
禽肥			2628				
向岸风			1057				756-1266
向海风			1314				1269-2032
波浪/海洋			1999				
太阳光电							2606-7877

- a. 《核电的未来前景》，麻省理工学院，美国马萨诸塞州剑桥市麻省理工学院（2003年）。
- b. 《核电的经济前景》，芝加哥大学，美国伊利诺斯州芝加哥市芝加哥大学（2004年）。
- c. 《电力生产成本》，皇家工程科学院，英国伦敦（2004年）。
- d. 法国经济、财政和工业部能源和原材料总署，法国巴黎（2003年）。
- e. 经济、贸易和工业部，日本东京（2004年）。
- f. 《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。
- g. 《发电成本预测：2005年最新资料》，核能机构和国际能源机构，经济合作与发展组织，巴黎，2005年。
- h. 电力归一化价格系指为涵盖运行所需的母线价格加上按年计算的电厂基本建设费用。
- i. 利用2004年11月11日的汇率将不同研究工作中采用的国家货币转换为欧元。
- j. 基础价是在所有资金支出同时发生的情况下将需支付的数额。基础价不计利息费。

安 全⁶

48. 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必要组成部分。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。原子能机构/核能机构联合事件报告系统定期会议是这种全球性经验交流过程的一部分，在该过程中能够详细讨论和分析最近发生的事件。

49. 除其他原因外，特别是由于这种信息交流和分析，核工业的总体安全记录继续得到改进。世界核电营运者联合会 2003 年的统计数字表明，非计划自动紧急停堆的低比率稳定在 20 世纪 90 年代初的约三分之一的水平上，而且，业已很低的工业事故率也在继续下降。

50. 原子能机构的年度“核安全评论”更详尽地介绍了与所有核应用有关的安全信息和最新发展。

退役、乏燃料和废物⁷

51. 关于退役，目前的趋势继续倾向于立即拆除。在美国，一个原因是要在现有废物处置场址仍然开放的时候并在费用增加之前利用这些场址。接近该过程终点的核电厂包括 Yankee Rowe 和 缅因州 Yankee（2004 年底二者的退役工作均已完成 90%，并计划在 2005 年实施“无限制排放”），大岩角（退役工作已完成 85%，也计划在 2005 年实施无限制排放），特洛伊（退役工作已完成 95%，并计划在 2005 年终止许可证）和康涅狄格州 Yankee（计划在 2007 年实施无限制排放）。立即拆除战略的例外情况主要包括多机组场址，对这些场址，计划一旦所有机组均达到其运行寿期终点时即行拆除。

52. 既使在战略相似的情况下，就具体的核电厂情况而言，立即拆除的原因也往往不同。例如在德国，立即拆除似乎也是首选方案，德国东部 Greifswald 场址的大规模立即拆除项目（原先有 5 座反应堆在运行，1 座接近运行和 2 座在建）极大地促进了保留关键的工作人员和重新雇用很多的运营人员。

53. 最近的一项重要发展是某些国家采用了一个新的放射性废物类别，即甚低放废物。2003 年在法国 Morvilliers 开启了 1 个甚低放废物处置库，该处置库于 2004 年达到

⁶ 有关原子能机构核安全相关活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关章节（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）和原子能机构网页 <http://www-ns.iaea.org/>。

⁷ 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见最新“年度报告”的相关章节（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）以及原子能机构网页 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html> 和 <http://www-ns.iaea.org/home/rtws.asp>。

全面运行。西班牙也正在考虑建立 1 个甚低放废物处置库。甚低放废物分类旨在以远低于传统低放废物的处置费用处理大部分退役废物。

54. 关于乏燃料，其存量在继续增长。但是，乏燃料已经在反应堆和临时贮存场址中安全地贮存了数十年，随着贮存库的适度扩大，这些现场和临时设施能够提供多年的所需贮存。

55. 就高放废物而言，芬兰、瑞典和美国在处置设施方面已取得很大进展。芬兰 2004 年开始了 Olkiluoto 地下实验室的建造工作，该实验室将用于表征当地的地质概况，随后可能将其并入最终处置库。该处置库的建造将于 2011 年开始，并于 2020 年投入运行。瑞典已经开始对 2 个候选场址展开详细的地质调查。瑞典核燃料和废物管理公司希望大约在 2008 年之前提出一项最终场址建议。在美国，新墨西哥州废物隔离中间工厂于 1999 年开始接收军用超铀废物进行永久处置，美国政府于 2002 年决定继续建造尤卡山处置场址。尤卡山场址的运行计划于 2010 年开始。2004 年的重要发展是，法院裁定环境保护局就该场址制订的条例不如法律所要求的那样严格。倘若该决定维持不变，将可能需要或是修改设施的设计，或是修改法律。

56. 2002 年的“加拿大核燃料废物法”为加拿大核废物管理组织设定了建议一项乏核燃料管理方案的最后期限为 2005 年 11 月。2005 年 5 月，加拿大核废物管理组织公布了建议草案以征求意见和进行审查，并提出一个分 3 阶段进行的“逐步适应”方案。首先是乏燃料在反应堆现场贮存 30 年左右。在此期间将选择一处处置库集中场址并建造一个地下研究实验室。第二阶段也将持续 30 年左右。根据“社会发展趋势”，在此阶段可将乏燃料转移到集中场址进行临时贮存。在第三阶段将乏燃料放入处置库中。将由子孙后代在第三阶段决定是否关闭处置库和关闭的时间，并决定需要实施何种关闭后监测。

核技术和防止核武器扩散⁸

57. 2003 年和 2004 年的若干发展突出说明了国际上已经认识到与核燃料循环敏感部分有关的核武器扩散危险。披露的许多有关未申报铀浓缩活动和乏燃料后处理活动的情况以及发现存在国际敏感核技术黑市突出强调了需要改进对这些核燃料循环部分的控制。为响应这一要求已经提出了一系列建议，包括原子能机构总干事的建议，其目的是通过有关加强保障、改进核材料和核设施实物保护以及支持当前核出口控制系统的措施来加强防止核扩散制度。此外，还继续进行有关开发今后抗扩散核动力技术的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代倡议”框架方面的工作。

⁸ 有关原子能机构在防扩散和保障方面活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关章节 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>) 和原子能机构网页 <http://www.iaea.org/OurWork/SV/Safeguards/index.html>。

B.2.4. 资源⁹

58. 如图 B-2 所示，2004 年，铀的美元价格继续其在 2003 年开始的大幅上涨。起作用的因素包括若干铀矿的生产中断、美元疲软、以及库存和二次供应量减少。2005 年年中的现货价格达到 75 美元/公斤，相比之下 2004 年年初 40 美元/公斤。在中期内，预计需求增长将对原子能机构高值预测和低值预测（B.2.1 部分）中的价格造成压力，并且至少还会对直到 2010 年的能源机构参考假想方案中的价格造成压力。

59. 2004 年出版的原子能机构和经合组织核能机构两年期“红皮书”《2003 年的铀资源、生产和需求》所载的最新资料报告 2002 年的铀产量为 36 042 吨铀，与 2001 年的产量 37 020 吨铀相比稍有下降。2002 年的产量满足了世界反应堆需求（66 815 吨铀）的大约 54%，其余部分则通过第二手来源满足，包括民用和军用库存、铀后处理以及贫化铀再浓缩。

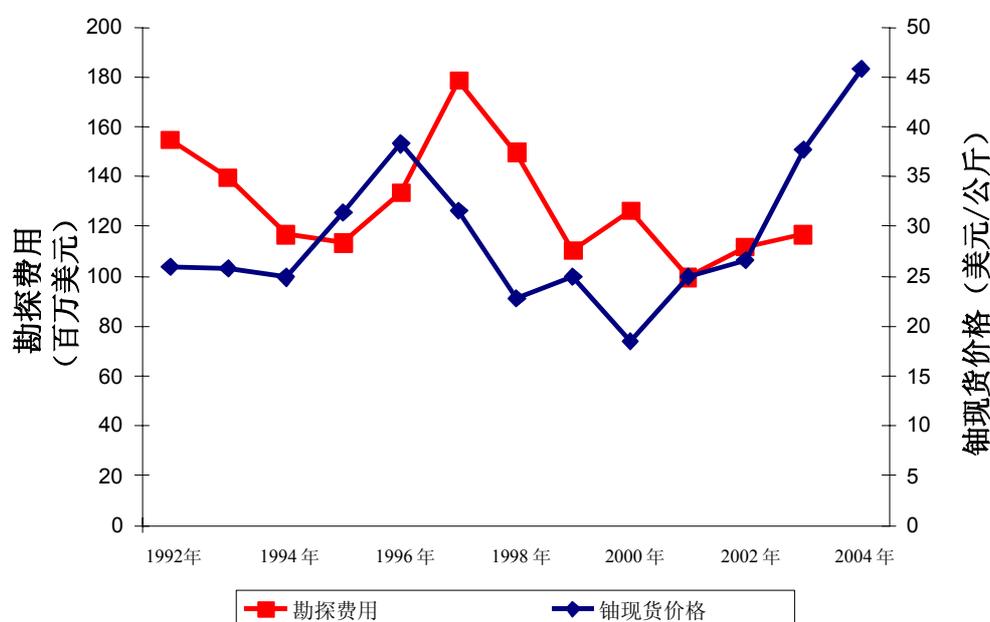


图 B-2. 1992—2004 年铀的市场价和勘探费用。

60. 自 20 世纪 90 年代初以来铀产量持续下降并不完全是由于价格低所致。更严格的规章制度以及对环境问题日益关注也起了作用。例如，在 20 世纪 40 年代和 50 年代，加拿大从发现铀矿到生产铀之间的间隔时间通常为 3 至 10 年。在 20 世纪 60 年代和 70 年代，这一时间平均为 11 至 16 年，而 2003 年“红皮书”指出，自 20 世纪 80 年代以来，约 10 至 20 年的间隔时间在许多国家已经很常见。

⁹ 有关原子能机构核资源相关活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关章节（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）和原子能机构网页 http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/nfcms_home.html。

61. 如图 B-2 所示，历史上的价格上涨之后通常伴随着 1 年左右之后铀矿勘探费用的增长。迹象表明这些趋势将继续下去，因此当所有数据落实后，2004 年的勘探费用曲线会明显上升。

B.2.5. 先进的裂变和聚变技术¹⁰

62. 为了应对如在 B.2.3 部分中所概述的核电当前面临的挑战，很多国家正在致力于改进先进的反应堆-燃料循环系统的经济性、安全性、废物管理和抗扩散性。在先进核电厂的设计方面，工作重点是使电厂的运行、检查、维护和维修更加简便。近期内，大多数新核电厂可能会是建立在成熟系统基础之上的渐进型设计，同时体现技术进步和通常的规模经济性。从较长期看，重点是革新型设计，其中若干设计属于中小型堆范畴（最大为 700 兆瓦（电））。这些设计设想利用在工厂加工的部件包括完整的模块单元进行建造，以便于在现场进行快速安装，同时形成可能的系列生产经济性，代替规模经济性。目前正在进行某些可以非现场换料运行的设计。可以预见的较小型机组的其他优势是更容易筹措资金、更适宜小型电网或边远地区以及可用于地区供热、海水淡化和其他非电力应用。这类优势将提高这些机组对许多发展中国家以及一些工业化国家的吸引力。

63. 中国、法国、德国、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国正在大型渐进型轻水堆设计方面作出重要努力。中小型渐进型轻水堆设计方面的主要工作正在中国、法国、日本、俄罗斯联邦和美国进行。阿根廷、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国正在开发革新型轻水堆设计（即那些在设计方案或系统配置中体现彻底变更概念的设计）。

64. 加拿大和印度正在致力于先进重水堆的设计，而中国、法国、德国、日本、俄罗斯联邦、南非、英国和美国正在开发先进的气冷堆设计。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进行开发活动。铅合金和钠液态金属冷却快堆系统以及气（氦）冷快堆方面的开发活动正在“第四代国际论坛”范围内和在俄罗斯联邦进行。印度、大韩民国、日本、俄罗斯联邦、美国和欧盟的 8 个国家正在开展快中子能谱混合系统（如加速器驱动系统）的研究工作。

65. “第四代国际论坛”和原子能机构的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”这两个旨在促进革新的主要国际努力正在补充上述许多主动行动。“第四代国际论坛”的成员是阿根廷、巴西、加拿大、法国、日本、大韩民国、南非、瑞士、英国、美国和欧洲原子能联营。“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 6 类反应堆系统供今后开展双边和多边合作，这 6 种类型是：气冷快

¹⁰ 有关原子能机构在先进裂变技术方面活动的更详细资料可见最新“年度报告”的有关章节（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）和原子能机构网页 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NENP/NPTDS.html>。有关原子能机构在聚变方面活动的资料亦可查阅最新“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2004/index.html>）。

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。

66. 原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的成员是：阿根廷、亚美尼亚、巴西、保加利亚、加拿大、智利、中国、捷克共和国、法国、德国、印度、印度尼西亚、大韩民国、摩洛哥、荷兰、巴基斯坦、俄罗斯联邦、南非、西班牙、瑞士、土耳其、乌克兰和欧洲委员会。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”于 2003 年发表了一份初始报告，该报告概述了核电的潜力，并详细说明了评价革新型概念的准则和方法学。2004 年通过在一系列案例研究中试用检验了这一方法学，并于 12 月发表了有关“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”最新方法学的最后报告。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”下一阶段的工作是促进成员国利用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”最新方法学来评定革新型核能系统，根据成员国考虑的战略来定义和模拟革新型核能系统配置假想方案，并确定下个阶段可能实施的合作研究与发展的可能框架和实施方案，以促进革新型核能系统的发展。

67. 当前大多数有关核聚变的实验和理论研究均集中在国际热核实验堆方面。国际热核实验堆的“工程设计活动”阶段已经完成，随着 2005 年 6 月 28 日国际热核实验堆的参与方中国、欧洲联盟、日本、大韩民国、俄罗斯和美国宣布该堆将设在法国卡达拉什，距离“国际热核实验堆”的实现又靠近了一步。国际热核实验堆的目的是通过建造一个功能性核聚变电厂证明聚变能在科学和技术上的可行性。建造国际热核实验堆大约需要 8 年时间，建成之后将运行 20 年。国际热核实验堆将是世界上第一个产能量至少超过其耗能量 5 倍的受控核聚变反应装置，它将为促进能源应用的核科学技术开辟新的视野，预计还将在其他许多领域带来衍生产品。

68. 有关其他磁约束方案的研究也在继续进行，而法国和美国的国家计划正在集中发展惯性约束。美国的“国家点火装置”将按计划于 2008 年建成。有关原子能机构资助的聚变和其他主题相关研究的资料可参见报告“协调研究活动：2004 年年度报告和统计资料”（<http://www-crp.iaea.org>）。

C. 粮食和农业领域的核技术

C.1. 可持续土地管理和水利用效率

69. 世界范围内粮食需求日益增长给土地和水资源的可持续性带来了巨大压力，并使有关耕作系统的研究议程从简单地确认一种增加产量的方式转向开发在不使自然资源退化的情况下增加产量的方案。研究议程的这种演变既带来了应用现有核技术的新挑战，也带来了解决环境可持续性相关问题的新应用。主要挑战之一是如何在更大范围生态系统、流域和自然景观水平上而不只是在小块土地和田间层次上应用核技术来解决水土保持问题；而另一个挑战则是如何确定能够高效利用水土养分资源和适应恶劣环境（如干旱、盐碱和恶劣营养条件）的作物。当前正在探索各种核技术在农场和范

围更广的生态系统规模上判断不可持续的实践和确认管理实践。这些核技术包括磷-32和氮-15 同位素示踪剂；土壤、植物和水中稳定同位素（如碳-13、氧-18 和氮-15 等）自然丰度的变化；以及沉降放射性核素（铯-137、铅-210 和铍-7）。为了响应对水量和水质的日益关切，目前正在利用多种稳定同位素（氢-2、氧-18、碳-13 和氮-15）以评定各种耕作和水灌溉系统中水利用效率方面取得的最新进展基础上，在全球范围内开展新的主动行动。这些主动行动将包括水灌溉制度对肥料利用效率的影响、农业废水作为提高作物生产率的一种水和营养来源的高效再利用，以及水径流中来自农用耕地的各种污染物来源的相对重要性。上述同位素加上非同位素示踪剂和土壤湿度中子探针的使用，应能提供有助于开发农田管理手段的信息，以便通过更好地了解土壤-植物-水的相互关系来提高雨浇地和灌溉田水利用效率和加强可持续的耕作系统。

C.2. 作物改良

70. 诱变与选择相结合仍然是通过改变单一特征产生变种而不触及一般表型的最“清洁”和最廉价的方法。以推广和消费转基因生物的潜在危害和危险为焦点的争辩正在引起很多国家对是否允许种植转基因作物和消费转基因产品争论不休。在这种背景下，商业公司和公营部门都在对诱变技术作为一种转基因的替代技术表现出新的兴趣。超过 60%的突变品种是在植物育种的转基因时代 1985 年之后推出的（正式推出的突变品种有 89%是辐射诱发突变品种）。这也归因于美国（水稻、大麦、向日葵、葡萄柚、椒薄荷）、巴基斯坦（棉花）、印度（黑绿豆）、澳大利亚和加拿大（亚麻籽）、日本（梨）以及中国和澳大利亚（水稻）诱变增强育种取得了重大经济成功。

71. 另一个重要趋势是在诱变育种计划方面不仅是有关观赏花卉，而且有关研究工业作物、商品作物和粮食作物的研究的私有化程度增加。查询粮农组织/原子能机构对公众开放的突变体品种数据库和突变体种质库的数量增加对此提供了充分的文件证明。有关用于不同作物诱发突变的方案资料日益成为保密（商业秘密），可公开使用的有关突变体品种由来的资料较少（见图 C-1）。

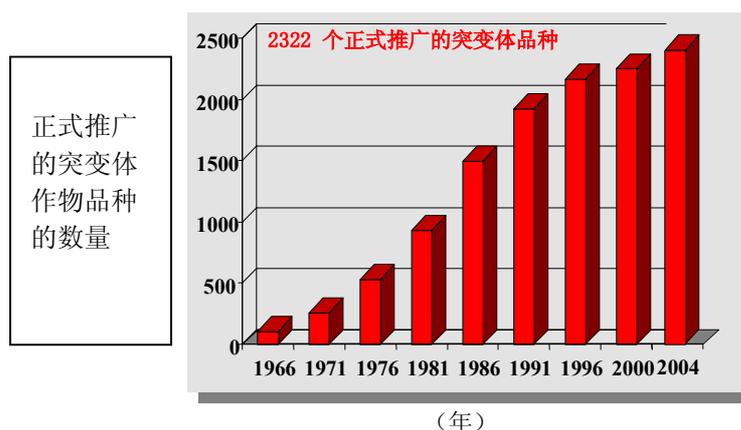


图 C-1. 突变体品种数据库中正式推出品种的累积数量。资料来自粮农组织和原子能机构成员国国家主管部门。

72. 预测今后可以利用什么或什么比较重要以及可能的结果是非常困难的，但生物技术方面的最近发展特别是对植物基因组的结构和功能的了解确认诱变是从事发现基因和揭示基因功能的功能基因组学项目的最高效和最具成本效益的手段之一。需要组织扩大收集突变体以便研究基础发展机制、生物化学机制和生理学机制的呼声越来越迫切，其结果建立了功能基因组学突变网（收集已充分鉴定和入选的突变体阵以进行高生产能力分析）。高生产能力技术和功能基因组学方法将为研究生物学的基础和应用问题开辟了新的视角。这种改变将从静态基因组指纹识别转变为动态转录组（所有表达基因）谱分析。核技术正在日益通过生产基础且必要的突变体资源来促进这种典型转变的发展。

C.3. 作物保护

73. 商业公司对大规模生产不育昆虫进行昆虫不育技术综合应用特别是防治果蝇虫害尤其是地中海果蝇的兴趣不断增加。昆虫不育技术以前主要用于局部根除重要虫害。这种做法并没有导致可预见的对不育昆虫的持续需求。但是，至少对地中海果蝇而言，昆虫不育技术目前已发展为一种成本效益好的技术。结果，昆虫不育技术方案正在转向例行抑制而不是根除虫害群体，并导致对不育地中海果蝇的持续需求，从而为地中海果蝇昆虫不育技术的商业化敞开了大门。

74. 这一发展产生了一些与正在使用和开发的昆虫不育技术有关的法律和知识产权问题。此前，大多数情况是政府直接参与生产和施放不育昆虫，并免费共享这种技术，因此这些问题基本上不存在。例如，最重要的技术发展之一是将唯雄性地中海果蝇温度敏感致死品系等遗传选性品系引入昆虫不育技术。所有实施地中海果蝇昆虫不育技术计划的国家目前都在使用这些唯雄性品系，因而仍需要确定向私营公司转让或授权使用这些品系的条件。

75. 不育昆虫取代杀虫剂用于抑制重要害虫促进了防治次要害虫问题的生物防治剂的生存和效力，因此对这些防治剂的需求产生积极的影响。仅就地中海盆地而言，据估计对不育地中海果蝇的潜在需求量就达每周至少 40 亿只不育雄蝇，该数字接近目前全世界正在生产的总量。在这一地区，正在以色列和西班牙建造大规模饲养设施，以解决其中部分需求。

76. 在阿根廷，为期十年的综合大面积防治地中海果蝇的昆虫不育技术计划最近以智利正式承认门多萨省的主要商品水果产区为“无地中海果蝇区”而告终。这将使农业产品能够通过智利运抵太平洋各港口，出口到太平洋周边各国的鲜果市场。

77. 最近在制造害虫转基因品系能力方面取得的进展打开了利用分子方案促进昆虫不育技术品系改良的可能性。一些大学和研究组织目前正在可靠的实验室对若干具有有益特性的这类品系进行评价和表征。但是，它们即便作为不育昆虫加以利用还需要作进一步的大量风险评定，并需要建立一个监管框架，因此在近期内无法预知。

C.4. 改进牲畜的繁殖力和健康

78. 牲畜研究方面的主要工作涉及利用分子和遗传方法了解和处理基因组。尽管非放射性方法的应用越来越多，但放射性同位素仍在这些工作中广泛应用。

79. 在粮农组织/原子能机构最近举行的应用基因技术改进发展中国家牲畜繁殖和健康国际专题讨论会会议文集中，突出强调了利用核技术造福发展中国家农户的潜力（见 <http://www.iaea.org/programmes/nafa/d3/mtc/final-report-int-symposium.pdf>）。

C.5. 粮食安全以及植物和动物产品的安全

80. 私营部门正在日益利用辐射和其他核技术以确保粮食安全和尽量减少化学、生物学和自然危害所致风险以及促进国内和国际贸易。这种不断增长的需求与植物和动物产品的生产、加工和卫生控制综合农业系统有关，并包括对环境危害的治理。可以设想，各国政府将越来越关注在包括鲜果和蔬菜、肉类和肉制品以及奶制品在内的与人们利益攸关的产品的生产源头控制食品安全的危害因素。也预料到，尽管辐照食品的安全和卫生已得到证实，但消费者对食品辐照的消极认知和接受将会继续妨碍食品辐照的应用，因此需要培训和教育计划以及与这种技术的好处有关的信息，以促进食品工业界更广泛地使用这种技术。

D. 人体健康

D.1. 营养学

81. 在制订和评价营养计划方面，越来越普遍地认识到同位素技术的应用较之传统方法更加适用，也更加准确。同位素示踪剂已被推荐用来作为评价从强化食品中摄取和

吸收矿物质和维生素情况的成本效益好的技术。同位素稀释技术可用于监测肥胖症、蛋白质和热能营养不良病例或艾滋病毒/艾滋病或癌症患者的人体成分方面的变化。这些技术使用的是氘或者氧-18。

82. 有关热能需求的准确信息也被认为是对人口保健管理战略的一个有价值的输入。氘和氧-18 双标记水方法目前是用于测量热能消耗的公认标准技术，可藉此计算人在各种环境下的热能需求。

83. 对于了解健康或疾病发展非常重要的人体成分评定也已变得更加重要。一个有前景的人体成分测量技术是双能 X 射线吸收测量技术，这种技术尽管最初是为测量骨矿物质密度而开发的，但现在已被视为一种用于确定全身和局部脂肪分布的准确方法。

D.2. 核医学

84. 结合核医学技术利用短寿命放射性核素的研究有助于临床医生检查患者的新陈代谢过程。正常的新陈代谢常常受到疾病的影响，而且所致变化通常出现在利用传统 X 射线成像技术可识别的解剖学改变发生之前。因此，及早探查新陈代谢的变化有可能为内科或外科干预提供更好的依据。在这类研究基础上制订的标准化方案和为心脏病患者或癌症患者所建立的这种方案越来越多地用于最优化临床管理以及最终使最后的治疗结果达到最优化。利用正电子发射断层照相法已使这种做法成为可能，这种照相法是发展最快的核医学技术之一。正电子发射断层照相法正在成为一种常规的核医学临床应用，并使用附着于生物学标志物的极短寿命放射性同位素。尤其是，随着称为 18 氟脱氧葡萄糖的放射性标记葡萄糖或 C11-胆碱的使用，能够对器官中葡萄糖和氨基酸的新陈代谢进行研究。正电子发射断层照相功能影像随后与 X 射线计算机断层照相影像融合，可提供有关各个患者健康变化的详细情况，从而能有助于改进癌症治疗。正电子发射断层照相法与核医学体内成像技术方面最广泛使用的单光子发射计算机断层照相法不同，由于目前成本很高，在发展中国家投入实施尚需时日。

85. 有许多可应用于临床分子生物学的旨在确定基因型和分子表达谱的放射性同位素体外程序。这些程序从确定癌细胞的变化到确定疟疾寄生虫和结核病的抗药性，在若干临床和临床前条件下正变得越来越重要。

86. 除了完善的甲状腺毒症和甲状腺癌治疗外，核医学治疗方法应用方面的主要发展是用于治疗淋巴瘤和神经内分泌肿瘤等疾病的放射性标记单克隆抗体和放射性标记肽的出现。这将导致能够应用于选定类型癌症并与常规化疗相比副作用明显减少的靶向疗法。还可利用各种放射性药物减轻后期癌症疼痛，导致骨转移患者生活质量改善而且费用效果很好，并使他们能够不再需要每天进行安眠药物治疗和其他昂贵的药物辅助治疗。

D.3. 放射治疗

87. 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加药剂放射治疗能够提高肺癌、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，这种做法以增毒性为代价。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件。原子能机构正在促进以下方面的研究：监测辐射效应化学改进剂的缓发毒性以及确认有助于癌细胞在辐照后未被杀死的分子靶和对健康组织造成辐射损伤的靶件。

88. 多年来，放射治疗的标准做法一直是每周治疗 5 次。最近的一些研究表明，这种治疗每周超过 5 次（加速放射治疗）对某些类型癌症而言能够改进对肿瘤的控制，而不会明显增加毒性。原子能机构正在促进这一领域的研究活动。

89. 在治疗期间能够对肿瘤进行适形治疗和联机成像的强度调整放射治疗、质子和重粒子放射治疗以及断层放射治疗等技术方面的进展使得有可能加大对癌“靶容积”的物理剂量而不增加对这一体积外健康器官的剂量。这些技术目前很昂贵，但利用与传统放射治疗期间相比在更短期限内实施治疗（低分割）以改进物理剂量分配从而能够降低这些技术的费用。

D.4. 剂量学和医用辐射物理学

90. 辐射医学质量保证有助于确保其安全和有效的应用。新的综合治疗技术的采用已导致对精确剂量学的需求增加。正当这种治疗的复杂性增加之时，对精确射束校准的基本需求依然非常迫切。当前放射治疗剂量学的世界发展趋势是趋向于实施诸如原子能机构《外射束放射治疗中吸收剂量的测定》（技术报告丛书第 398 号）国际实施法规等以水吸收剂量校准为基础的剂量学实施法规。尽管诊断放射学剂量学尚未达到如放射治疗剂量学那样的标准化水平，但其对于确保患者安全仍然非常重要。原子能机构和国际辐射单位与测量委员会正在制订该领域的国际剂量学实施法规。

91. 在制订治疗核医学方面个性化治疗计划过程中患者数据的使用日趋重要，特别是对儿科患者更是如此。精确的治疗计划要求建立一个标准化方案以测量患者的必要物理和生物学参数，并将这些数据应用于适当的模型。原子能机构正在致力于制订涉及这一过程的成像和放射性测量部分的实施法规。

92. 医用辐射物理学面临的新挑战之一源于三维适形放射治疗正在向着图像引导放射治疗发展，后者有能力随肿瘤位置改变和患者解剖过程的变化进行追踪并保持射束精确度。图像引导放射治疗的目的是通过对治疗范围已缩小的肿瘤施加较高的剂量来改善临床结果，因此不会伤害遭受危险的器官和保护正常组织。图像引导放射治疗在制订治疗计划时考虑解剖过程和器官移动的变化以及肿瘤大小和位置的改变，并在治疗过程中监测这些变化。这种方法利用磁共振-计算机断层照相影像融合或正电子发射断层照相法-计算机断层照相影像配准以及四维计算机断层照相和锥体计算机断层照相等

放射治疗成像方面的新发展，目前在现代化治疗室中已能提供这种方法。为检验治疗进行情况，可利用电子射野影像装置获得多视野影像，以此验证患者的位置并绘制施用剂量图。

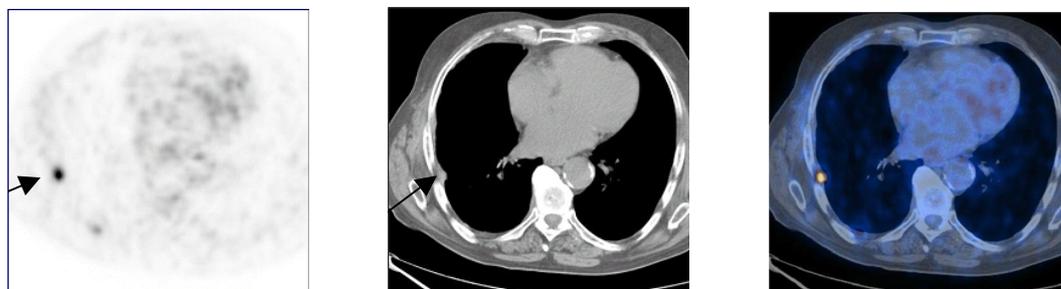


图 D-1. 多模态成像（影像融合）：利用正电子发射断层照相影像（左）和计算机断层照相影像（中间）的多模态影像融合改进了癌症（分期）诊断。右手图片示出综合（融合）后影像，提供了仅凭计算机断层照相几乎看不见的肿瘤淀质的准确解剖学位置。（影像由意大利博洛尼亚大学 S. Fanti 博士提供）

93. 放射治疗审核对传统技术和新技术而言都是保证放射治疗过程高质量的一个重要手段。当前的趋势是，将处理物理学问题的审核扩大到涉及多学科审核小组的全面审查。同时，正在制订放射治疗剂量学新审核方法，以便与当今放射治疗技术方面的发展保持同步。

E. 水资源

94. 水资源管理仍然是国际议程上的优先事宜。联合国已宣布 2005—2015 年为“生命之水十年”，并认识到水与发展之间的重要联系。主要由于地表水有限，利用地下水来满足对水的不断增长的需求这种情况呈日益上升的趋势。同位素技术正在越来越广泛地用于按可持续方式管理地下水的工作，特别是用于了解水的来源、补给率和水流动情况等水循环的某些方面，这些信息是作出可靠管理决策所必需的。

95. 鉴于更加依靠地下水来满足不断增长的水资源需求，包括原子能机构在内的国际组织正在拟订将在 2006 年墨西哥第四届“世界水资源论坛”上提出的“世界地下水展望”。该展望意在为有效管理地下水提供蓝图，它将包括关于如何适当利用同位素水文学等科学技术对地下水进行有效管理的导则。

96. 跨境含水层的管理越来越受到重视。最近进行的全球水资源调查确认了 400 多个这类“共享”含水层。全球环境基金、世界银行、联合国开发计划署、联合国环境规划署、原子能机构和其他组织认识到有可能因共享的水资源而引发冲突，因此已开始对旨在促进有效联合管理的项目提供支助。用于确认污染危险、查明水移动情况和水

龄以及确定污染源的同位素手段作为促进跨境地下水管理和制订可持续地下水资源管理方案不可或缺的方法方兴未艾。

F. 海洋环境和陆地环境

F.1. 海洋环境

F.1.1. 海产品中污染物的放射性示踪

97. 应用放射性示踪核技术评定和监测沿海渔业中陆基污染物正在成为促进健康和贸易的日益重要的手段。例如，有害藻类是世界范围内一种日益严重的问题，与其有关的海产品毒性管理借助了核基受体结合分析以便更高效地支持对源自有害藻类的致瘫贝类毒素的管理。贝类中特定毒素可接受水平今后有可能降低将需要利用受体结合分析等较灵敏的分析方法。

98. 放射性示踪剂技术对于解决沿海环境中陆基金属污染物问题也颇具价值。通过利用镍-63、钴-57、锰-54、镉-109、锌-65 和银-110m 等放射性示踪剂能够了解采矿活动所产生的金属对选定海洋物种的影响和照射途径。目前也在对这些放射性示踪剂作为污染监测剂的有效性进行评定，以便对捕渔业提供帮助。同样地，在摩纳哥海洋环境实验室的放射生态学实验实施利用放射性示踪剂砷-73 对砷污染物在当地渔业中的积聚能力进行了评价。今后的发展趋势包括对海洋生物体应用核成像技术和利用基于实验和现场的污染物相关数据对其可能影响渔业和消费者的情况进行基于风险的评定。

F.1.2. 厄尔尼诺南徊现象的同位素示踪

99. 厄尔尼诺南徊对海洋环境和地球气候的影响一直被认为是影响太平洋地区以及全世界气候的一个最重要的环境现象，对鱼类种群和降雨包括旋风的形成都有重要影响。对厄尔尼诺南徊现象的新的同位素研究表明，在厄尔尼诺事件期间海水表面温度增加，并伴随着更大量的蒸发损失和同位素分馏，导致海水中氢-2、碳-13、碳-14 和氧-18 同位素成分发生变化。已经认识到，珊瑚在其年生长环中保存有同位素记录，因此在确定其生长的绝对年龄之后可用于重建过去的海洋温度记录，珊瑚的绝对年龄可通过利用钍/铀测龄方法对珊瑚环进行独立的放射性核素测龄来确定。

100. 利用已测定年代的珊瑚，同位素海洋学家和气象学家目前正在编制回溯数百年的珊瑚和沉积物年表。该年表完成后，将能够重建不同场所的海洋表面温度以及过去发生的厄尔尼诺事件的频度和强度，以便更好地预测今后的海洋-大气相互联系。

F.1.3. 利用天然放射性核素的不均衡来示踪海洋内部碳汇

101. 大气中高达 50% 的化石燃料来源二氧化碳，通过二氧化碳气体的物理化学溶解和生物摄取以及死亡有机物的沉积而被带入海洋内部。跟踪这种直至海底的垂直碳粒子

流量多年来对海洋科学工作者构成挑战，直到最近发现沉积粒子表面吸附（由海水中天然铀-238 所产生的）钷-234，情况才有所改变。其 24 天的半衰期可用作跟踪海洋中沉降粒子年龄和去向的精准“时钟”。利用钷-234 技术，海洋学家已发现不同海洋中海洋碳汇有数百倍的变化，这与微小植物或浮游植物的生长和丰度有着极为密切的关系。目前人们认为这种“生物学”海洋碳泵对于调节海洋将继续吸收大气中积累的二氧化碳和其他温室气体的限值具有至关重要的作用。

F.2. 陆地环境

F.2.1. 放射生态学研究

102. 放射生态学研究最初主要是从调查核武器试验的影响以及反应堆和后处理作业或事故的释放而发展起来的。最近几年已注意到成员国对诸如军事行动遗留的贫化铀、采矿和水冶作业以及天然存在的放射性物质等各种其他来源的放射性影响的兴趣增加。此外，在生态毒物学评定研究中，核技术以及所导出的模型和参数对放射性核素之外的其他污染物的应用以及对混合污染协同效果的评价正在全球范围内受到更多的关注。

103. 在所有这些情况下，管理者和监管人员都需要获得他们能够据以作出决策的信息。提供基础数据很重要，但还不足以满足他们的需要。另外一种工具是利用预测模型，原子能机构在很长一个时期内一直积极开发通用型模型和特定模型以及评价模型参数值并将其列成表格。

104. 在遥感手段方面的最新发展特别是空间和光谱分辨率的改进正在提供新的机会。一个例子是航空 γ 射线普查。传统上，这些方法用于采矿勘探，但最近空间分辨率的改进已导致将其用于环境和其他资源管理应用。地理信息系统也以对最终用户有益的方式提供一种贮存、处理和显示各类地理数据的机制。

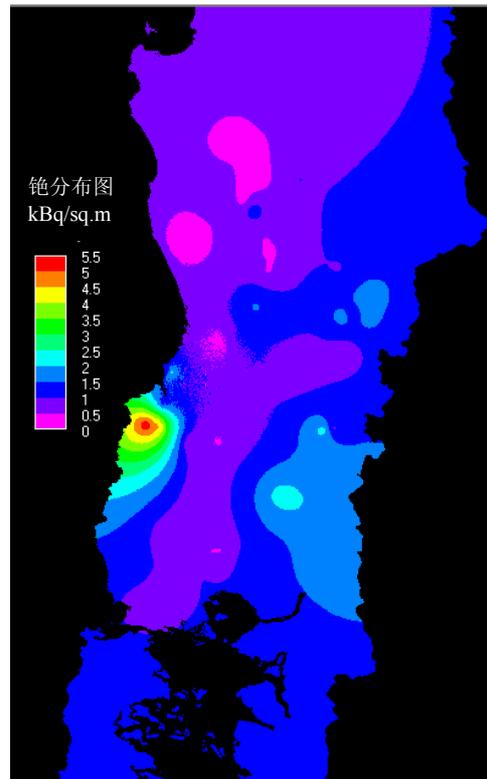


图 F-1. 利用地理信息系统支持环境决策辅助系统的实例：智利铯-137 沉积图。利用等高线绘制技术结合降雨和铯-137 地面测量数据制成¹¹。

G. 研究堆应用

105. 研究堆在持续利用需要以及安全和保安问题方面继续引起兴趣。在 2004 年大会常会期间举行的科学论坛得出结论认为：“尽管研究堆将继续在核科学技术方面发挥至关重要的作用，但重要的是要根据技术和财政资源确保运行能力，并符合当前的核安全和常规安全标准以及满足与实物保安、公众接受和环境责任有关的其他方面。需要解决的技术问题包括乏燃料安全管理和贮存的能力、需要时对反应堆进行整修以及设施的最终去污和退役”。

106. 正在对使用低浓铀靶取代高浓铀靶大规模生产钼-99 进行审查，以确定需要支助和开展国际合作的领域。

107. 其他各种放射性同位素（超过 150 种不同类型）继续在医学和工业中广泛应用。正在对适用于治疗应用并且易于在研究堆中生产的镭-177 等放射性核素进行深入评价，以研制放射性药物。

¹¹ （参考文献）提交大众汽车基金会的最终报告《用于确定智利放射性铯放射生态学敏感区的环境决策支持系统的开发》，SCHULLER P.和 VOIGT G.主编，德国 Neuherberg 市（2004 年）。

108. 研究堆产生的中子束为各种利用中子散射和射线照相技术的应用提供了强有力的探测手段。中子的特殊优势是其对轻元素的敏感性（有别于对重元素敏感的 X 射线）。因此，通过对工业上重要的试验材料进行中子照相能够得到很高的分辨率，包括例如对燃料元素进行分析。在利用中子散射技术进行材料表征和材料科学方面的进展有助于新材料的开发。尽管这类技术在一些国家已经得到应用，但对于潜在新应用的不断认识和对这些技术的广泛采用已导致对这些技术的重视与日俱增。

H. 加速器应用

109. 过去十年期间坚固耐用加速器的发展已使很多实验室能够利用毋需专业操作员的低维护、高可靠的安全运行系统使其设施现代化。更紧凑的小型加速器在除基础科学之外的应用科学技术方面的利用不断增加。最近的技术发展目前已使得在研究实验室外运行小型加速器以便现场应用成为可能。

110. 目前正在日本和美国建造的基于加速器的新散裂中子源将成为在科学技术中利用中子的主要设施。这些设施是建立在超过 1 吉电子伏特能量下运行的高能粒子加速器基础上的加速器驱动中子源的实例。它们优于常规反应堆中子源，一部分是通过利用脉冲运行获得的，这种运行的效率更高，是一种从基于反应堆的中子源所无法得到的模式。而且，它们的脉冲运行能够与适当的仪器仪表相结合，使得中子的利用效率比稳态中子源可能达到的利用效率高出 3 个数量级。

111. 利用基于加速器的核技术支持材料科学研究、新材料开发和环境研究的前景非常广阔。使用离子束分析技术和加速器质谱测定法进行碳-14 测龄、药物研究和环境监测等工作也相当令人感兴趣。

I. 工业过程监测

112. 计算机断层成像技术可用于诊断工业多相过程装置。多相反应堆技术是石油加工、合成煤气向燃料和化学品转化、大批量日用化学品生产、特殊化学品和多聚物制造以及非理想产品转化为再循环材料的基础。在工艺工程领域，利用 γ 透射和 γ 发射断层照相法检查填料塔、鼓泡塔、多相流动、流化床和多孔介质。这项技术虽然仍在发展，但有可能使多相过程工业领域的效率和安全得到大幅度提高。为适应医学成像领域的发展，正在实验室规模上引入单光子发射计算机断层照相法以用于工业过程。利用 γ 照相机进行二维成像也是一项正在开发的有吸引力的技术。特别用于研究流化床反应器的单粒子示踪技术一直在取得进展。

I.1. 辐射加工——纳米技术

113. 纳米技术是科学和工程方面发展最快的领域之一，而且具有相当大的经济价值。制造具有纳米尺寸和精度的精密结构的能力对于这一技术的全面利用至关重要。辐射在这方面是一个有效的手段，例如用于表面改性和固化。已经出现了例如有关离子径迹薄膜和受控释放输药系统的精密治疗新趋势。利用 X 射线、电子束和离子束的基于辐射的技术是各种纳米构成磁带存储技术（形成纳米级孔）方案的关键，而电子束辅助平板印刷正在获得更多的关注。目前正在研究聚合物和沸石中金属毫微粒（如铜、银）的辐射合成，以应用于夜光电池、光电电池和太阳能电池。金属盐溶液受 γ 射线照射，辐射形成的活性物质将金属离子还原至零价态。利用 γ 射线辐照适当的单体、硫和金属源溶液可制备纳米级金属硫化物半导体。