

第五十二届常会

临时议程项目 16
(GC(52)/1)

2008 年核技术评论

总干事的报告

概 要

- 秘书处应成员国的请求每年编写一份综合性的“核技术评论”。谨此附上本年度报告，其中重点阐述了 2007 年的主要发展情况。
- 《2008 年核技术评论》涵盖以下领域：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、粮食和农业领域的核技术、人体健康、环境、水资源和辐射技术。可在国际原子能机构网站¹ 获得与《2008 年核技术评论》相关的其他文件。这些文件以英文提供，涉及食品安全的发展和趋势、促进制订和监测营养学计划的稳定同位素技术、促进贸易与发展的基准材料、先进后处理技术、反应堆仪器仪表和控制领域的变革、快堆技术以及气候变化和核科学技术。
- 原子能机构《2007 年年度报告》(GC(52)/9 号文件)特别是其中的“技术”部分以及《2007 年技术合作报告》(GC(52)/INF/5 号文件)中也载有原子能机构有关核科学和技术活动的资料。
- 本文件已经修订，以尽可能考虑理事会的具体意见和成员国提出的其他意见。

¹ www.iaea.org/About/Policy/GC/GC52/Agenda/。

目 录

正文摘要.....	1
A. 动力应用.....	2
A.1. 当今的核电.....	2
A.2. 核电的预期增长.....	5
A.3. 核反应堆工业的国际化.....	6
A.4. 燃料循环前端.....	7
A.5. 乏燃料和后处理.....	9
A.6. 废物和退役.....	10
A.7. 影响核电未来的其他因素.....	10
A.7.1. 可持续发展和气候变化.....	10
A.7.2. 经济性.....	11
A.7.3. 安全性.....	12
A.7.4. 人力资源开发.....	13
B. 先进的裂变和聚变.....	14
B.1. 先进的裂变.....	14
B.1.1. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”.....	14
B.1.2. 全球核能伙伴关系.....	15
B.1.3. 先进裂变的其他发展.....	15
B.2. 聚变.....	15
C. 原子数据和核数据.....	16
D. 加速器和研究堆的应用.....	17
D.1. 加速器.....	17
D.2. 研究堆.....	18
E. 粮食和农业领域的核技术.....	19
E.1. 作物改良.....	19
E.2. 增加生物燃料生产.....	20
E.3. 改进牲畜的繁殖力和健康.....	20
E.4. 虫害防治.....	21
E.4.1. 利用昆虫不育技术防治采采蝇.....	21
E.4.2. 利用昆虫不育技术防治果蝇.....	21
E.4.3. 利用昆虫不育技术防治小菜蛾.....	22
E.5. 食品辐照.....	22

F.	人体健康.....	23
F.1.	通过核医学制订个性化癌症治疗方案.....	23
F.2.	辐射肿瘤学.....	23
F.3.	营养学.....	24
G.	环境.....	25
G.1.	改进陆地环境评定的放射性核素探测.....	25
G.2.	测量结果的质量.....	25
G.3.	核技术在海洋环境可持续性方面的应用.....	25
G.3.1.	扩大放射性分析在海产品安全方面的应用.....	25
G.3.2.	气候变化与海洋酸化作用.....	26
H.	水资源.....	27
I.	辐射技术.....	28
I.1.	放射性同位素生产.....	28
I.2.	天然聚合物.....	28
I.3.	有害的生物污染物.....	29
I.4.	计算机自动化放射性粒子示踪.....	29

2008 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 2007 年出现了近期对核电日益增长的预期开始转为建设活动递增的迹象。开工建设项目有七个，加之美国瓦茨巴 2 号机组复工建造，到这一年底总计有 33 台在建反应堆机组。瓦茨巴 2 号机组是美国自 1996 年以来第一台复工建设的机组。美国核管理委员会（美国核管会）收到了四个联合许可证申请，这是美国近 30 年来首批新核反应堆许可证申请。弗拉芒维尔 3 号机组也开始了建造工作，这是法国自 1991 年以来首台开工建设的机组。
2. 然而，当前的发展以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。在建的 33 台反应堆机组中，有 19 台在亚洲。截至 2007 年底，新近并网的 39 台新反应堆机组中有 28 台在亚洲。
3. 原子能机构在 2007 年上调了其在全球核电增长的中期预测，2030 年对应于低值预测和高值预测的核电装机容量将分别达到 447 吉瓦（电）和 691 吉瓦（电）。其他组织，例如经合组织国际能源机构，也上调了它们的预测。
4. 已报告的铀资源相对于《2005 年铀资源、生产和需求》新版“红皮书”中的数据有了大幅度增加，其主要原因是澳大利亚、俄罗斯联邦、南非和乌克兰所报告的资源有所增加。铀的现货市场价格 6 月份曾一度达到了每千克近 360 美元，随后在 12 月份回落到每千克 240 美元。
5. 美国浓缩公司新的美国离心分离厂已经开工建造，日本核燃料有限公司也已开始在其六所先进铀离心浓缩厂进行级联试验。作为在弗拉基米尔·普京总统 2006 年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倡议方面迈出的一步，哈萨克斯坦和俄罗斯联邦在东西伯利亚建立了国际铀浓缩中心。
6. 19 个国家签署了“全球核能伙伴关系”原则声明，其目的是加速开发和利用先进燃料循环技术，以促进发展、改善环境和减少核扩散的危险。
7. 美国核管会已批准大岩角核电厂大部分场址解除监管以及扬基罗核电厂大部分场

址不受限制地作为公共用地。全世界因而已有 10 座核电厂全部完成退役，其场址已解除监管，供无条件使用。17 台机组已部分拆除并安全关闭。32 台机组正在实施场址最终解除监管之前的拆除，还有 34 座反应堆正在进行长期封闭之前的最低程度拆除。9 月，原子能机构启动了一个新的退役杰出中心网，以促进从事退役的那些组织间进行知识和经验交流，并鼓励发达成员国的组织为请求提供退役援助的会员国的活动作出贡献。

8. 核技术和同位素技术继续在农业、人体健康、海洋环境和陆地环境以及水资源管理领域作出实质性贡献。在粮食和农业领域，植物突变育种正在支持开发新的作物品种，这些新品种将通过减少对肥料的需求以及增加抗生物和非生物影响的能力实现增产，同时还提供了显著的环境效益。生物量作物的基因强化在满足对生物燃料不断增加的需求方面是非常有益的。除了继续将辐照用于卫生目的外，将辐照用于植物检疫应用特别是那些与检疫措施有关的应用活动正在不断增加。

9. 在健康领域，正电子发射断层照相法应用方面取得的进展使得正在对癌症治疗的很多方面进行重新界定，并正在为实现更加个性化和更具疗效的治疗奠定基础。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开展，并有助于实现成本效益更好的放射治疗。作为改善营养努力的一部分，正在利用稳定同位素技术制订和评价防治微量营养素缺乏症战略。

10. 核分析技术正在用于评估贸易货物的质量和适宜性。需要具备必要的基础设施和利用适当基准材料等手段来确保测量结果的质量。

11. 气候问题研究越来越侧重于气候与海洋环境和陆地环境之间的相互联系。海洋同位素使我们能够了解一些关键的气候引发的变化，如不断增强的海洋酸化作用以及对海洋生物多样性和渔业的影响等。气候变化对降雨模式和淡水可获得性的影响日趋严重，这使得地下水愈发成为一种临界资源。在没有大量时间和资源投入的情况下，同位素数据对于提供一套综合时空资料以支持地下水评定和管理的重要性日渐显现。

12. 天然聚合物的辐射处理是一个非常具有前景的领域，因为其独特特征能够得到开发，从而在医学、化妆品、农业、生物技术和环境保护领域得到实际应用。在另一个重要的发展领域，最近的研究结果表明了电离辐射在应对蓄意传播生物毒素等威胁方面的效用。

A. 动力应用

A.1. 当今的核电

13. 截至 2007 年年底，全世界共有 439 座核动力堆在运行，发电总量达到 372 吉瓦（电）（见表 A-1）。2007 年，核电提供了全世界约 15% 的电力。

14. 2007 年有三座新反应堆并网发电，中国、印度和罗马尼亚各一座，而美国的一台闲置机组也重新并网。相比之下，2006 年有两座新反应堆并网，2005 年有四座新反应堆并网（加上一座反应堆重新并网）。2007 年没有反应堆退休，而 2006 年和 2005 年各有八座和两座退休。在考虑了现有反应堆的提高出力后，其结果是全球核发电容量在 2007 年仅有 2526 兆瓦（电）的小幅增加。

15. 2007 年有七台机组开工建设，它们是：中国秦山二期 4 号机组（610 兆瓦（电））和红沿河 1 号机组（1000 兆瓦（电））、法国弗拉芒维尔 3 号机组（1600 兆瓦（电））、俄罗斯联邦北德文斯克-阿卡德米科·罗蒙诺索夫 1 号和 2 号机组（两座各 30 兆瓦（电））以及大韩民国新古里 2 号机组（960 兆瓦（电））和新月城 1 号机组（960 兆瓦（电））。此外，美国瓦茨巴 2 号机组也已复工建造。相比而言，2006 年有三座反应堆开工建设和一座反应堆复工建造，而 2005 年有三座反应堆开工建设，另有两座反应堆复工建造。

16. 当前的发展以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。正如表 A-1 所示，在建的 33 座反应堆中有 19 座在亚洲。截至 2007 年底，新近并网的 39 座新反应堆中有 28 座在亚洲。

17. 在美利坚合众国，美国核管会批准了另外一个为期 20 年的许可证延期（得到许可的寿期总计为 60 年），从而使已批准的许可证延期的总数达到 48 个。加拿大根蒂莱 2 号机组的运营许可证再次延期四年，直至 2010 年。芬兰洛维萨 1 号和 2 号机组的许可证分别延期至 2027 年和 2030 年。

18. 在保加利亚，贝勒尼场址已获准建造一台新的核电机组。三个波罗的海国家与波兰一道已原则同意在 2015 年之前在立陶宛建造一座核电厂，而且立陶宛已通过了使这项建设工作成为可能的必要立法。土耳其也通过了允许建造核电厂的新法律。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2007 年 12 月 31 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2007 年 供应的核电量		截至 2007 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	6.7	6.2	58	7
亚美尼亚	1	376			2.4	43.5	33	8
比利时	7	5 824			45.9	54.1	219	7
巴西	2	1 795			11.7	2.8	33	3
保加利亚	2	1 906	2	1 906	13.7	32.1	143	3
加拿大	18	12 610			88.2	14.7	546	1
中国	11	8 572	5	4 220	59.3	1.9	77	3
捷克共和国	6	3 619			24.6	30.3	98	10
芬兰	4	2 696	1	1 600	22.5	28.9	115	4
法国	59	63 260	1	1 600	420.1	76.9	1 582	2
德国	17	20 430			133.21	25.9	717	5
匈牙利	4	1 829			13.9	36.8	90	2
印度	17	3 782	6	2 910	15.9	2.5	284	4
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	55	47 587	1	866	267.3	27.5	1 331	8
大韩民国	20	17 451	3	2 880	136.6	35.3	299	8
立陶宛	1	1 185			9.1	64.4	41	6
墨西哥	2	1 360			10.0	4.6	31	11
荷兰	1	482			4.0	4.1	63	0
巴基斯坦	2	425	1	300	2.3	2.3	43	10
罗马尼亚	2	1 305			7.1	13.0	11	11
俄罗斯联邦	31	21 743	6	3 639	148.0	16.0	932	4
斯洛伐克	5	2 034			14.2	54.3	123	7
斯洛文尼亚	1	666			5.4	41.6	26	3
南非	2	1 800			12.6	5.5	46	3
西班牙	8	7 450			52.7	17.4	253	6
瑞典	10	9 034			64.3	46.1	352	6
瑞士	5	3 220			26.5	40.0	163	10
乌克兰	15	13 107	2	1 900	87.2	48.1	338	6
英国	19	10 222			57.5	15.1	1 419	8
美利坚合众国	104	100 582	1	1 165	806.6	19.4	3 291	9
总计 ^{b,c}	439	372 208	33	27 193	2 608.1	15%	13 036	5

a. 资料源于原子能机构“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 39.0 太瓦·小时，占 2007 年总发电量的 19.3%；

— 到 2007 年底 158 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。

19. 在芬兰，富腾公司为可能在洛维萨核电厂建造一座新反应堆提交了一项环境影响评定计划；芬兰电力公司也为可能在奥尔基卢奥托核电厂建造一座新反应堆提交了一项环境影响评定计划。在加拿大，阿尔伯达能源公司为在阿尔伯达西北建造一座新核电厂提交了场址许可证申请。该核电厂的电力大部分将用于从当地沥青沙中开采石油。

20. 在美国，美国核管会颁发了首批三个早期场址许可证，确认伊利诺斯州克林顿场址、密西西比州大海湾场址和弗吉尼亚州北安娜场址为适合新建核电厂的场址。美国核管会目前正在办理另外二个早期场址许可证申请。也是在 2007 年，美国核管会收到了四个联合许可证申请，这是美国近 30 年来首批新核反应堆申请。美国核管会预计到 2009 年底将收到总计 21 个此类申请，总共涉及 32 座反应堆。

21. 在英国，政府在 2007 年就核能和可能新建核电厂进行了公众磋商。2008 年 1 月，政府发表了题为《迎接能源挑战》的白皮书，其中强调指出，使核能继续构成英国低碳能源结构的一部分符合公共利益，并有助于实现减碳指标和确保可靠的能源供应。在新核反应堆一般设计评定的开始阶段，英国监管部门确认加拿大原子能有限公司、阿雷瓦核电集团公司、通用电气公司-日立公司和东芝公司-西屋公司提交的所有四个设计均达到了许可证审批前过程第一阶段的资格标准。

A.2. 核电的预期增长

22. 原子能机构每年都要对其全球核电增长的低值预测和高值预测进行更新。2007 年，对低值预测和高值预测都作了上调。在经修订的低值预测中，2030 年全球核电装机容量和发电量将分别达到 447 吉瓦（电）和 3325 太瓦·小时，而 2006 年底的情况则为 370 吉瓦（电）和 2660 太瓦·小时。在经修订的高值预测中，这些数值相应达到 691 吉瓦（电）和 5141 太瓦·小时。

23. 在低值预测中，将有 145 座现有的反应堆在 2030 年前退休，并将建造 178 座新反应堆。85% 的反应堆退休将出现在东欧和西欧。尽管在所有地区都将建造新的反应堆，但大多数新反应堆将建在远东和东欧，而在中东和南亚虽然将建造数量可观的新反应堆，但其数量则比远东和东欧要少。

24. 在高值预测中，到 2030 年仅有 82 座反应堆退休，而新建反应堆的数量将翻两倍还要多，达到 357 座。大多数退休情况仍将出现在欧洲。虽然远东、东欧以及中东和南亚的新建反应堆数量将占到大多数，但新建反应堆的分布将会更广泛。

25. 原子能机构的核电预测并不是 2007 年作出上调的惟一预测，美国能源情报署、经合组织国际能源机构（国际能源机构）和世界核协会也都发表了新的预测。除一个组织外，其余组织都上调了核电预测。世界核协会将其预测范围的高值略微下调。图 A-1 比较了 2007 年美国能源情报署、国际能源机构、原子能机构和世界核协会的核电预测范围。

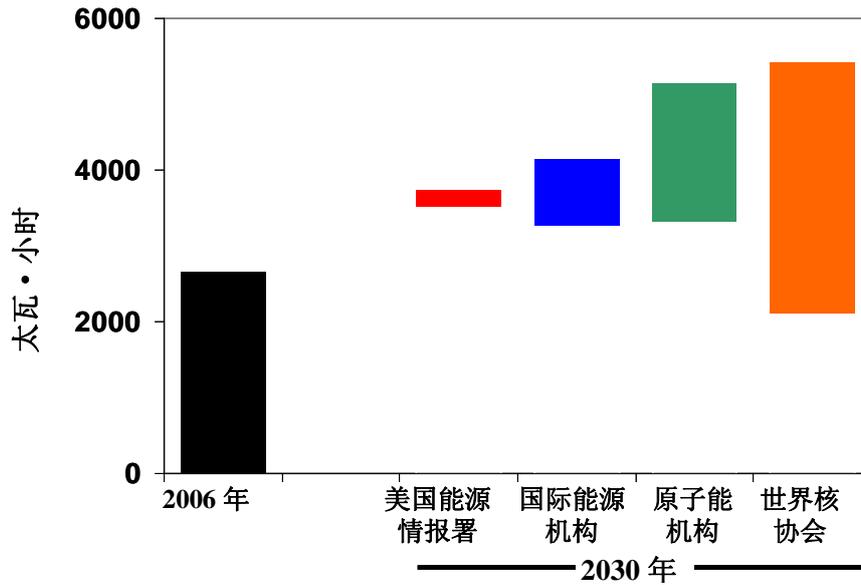


图 A-1. 美国能源情报署、国际能源机构、原子能机构和世界核协会核电预测比较。

A.3. 核反应堆工业的国际化

26. 正如图 A-2 所示, 最近几十年来, 核反应堆工业一直在不断进行结构调整。但在过去的 18 个月中, 对核电的今后发展越来越高的预期促进了若干重大发展。到 2006 年底, 东芝公司获得了西屋公司绝大多数股份。2007 年, 东芝公司当时向哈萨克斯坦国营铀生产商哈萨克斯坦国家原子能公司出售了其中 10% 的股份。也是到 2006 年底, 阿雷瓦核电集团公司和三菱重工株式会社 (三菱重工) 宣布建立新的联盟, 开始研发 1000 兆瓦 (电) 新型核电机组。通用电气公司和日立公司也于 2007 年结成联盟, 为运行沸水堆提供服务, 并在世界范围内参与新反应堆项目的竞争。

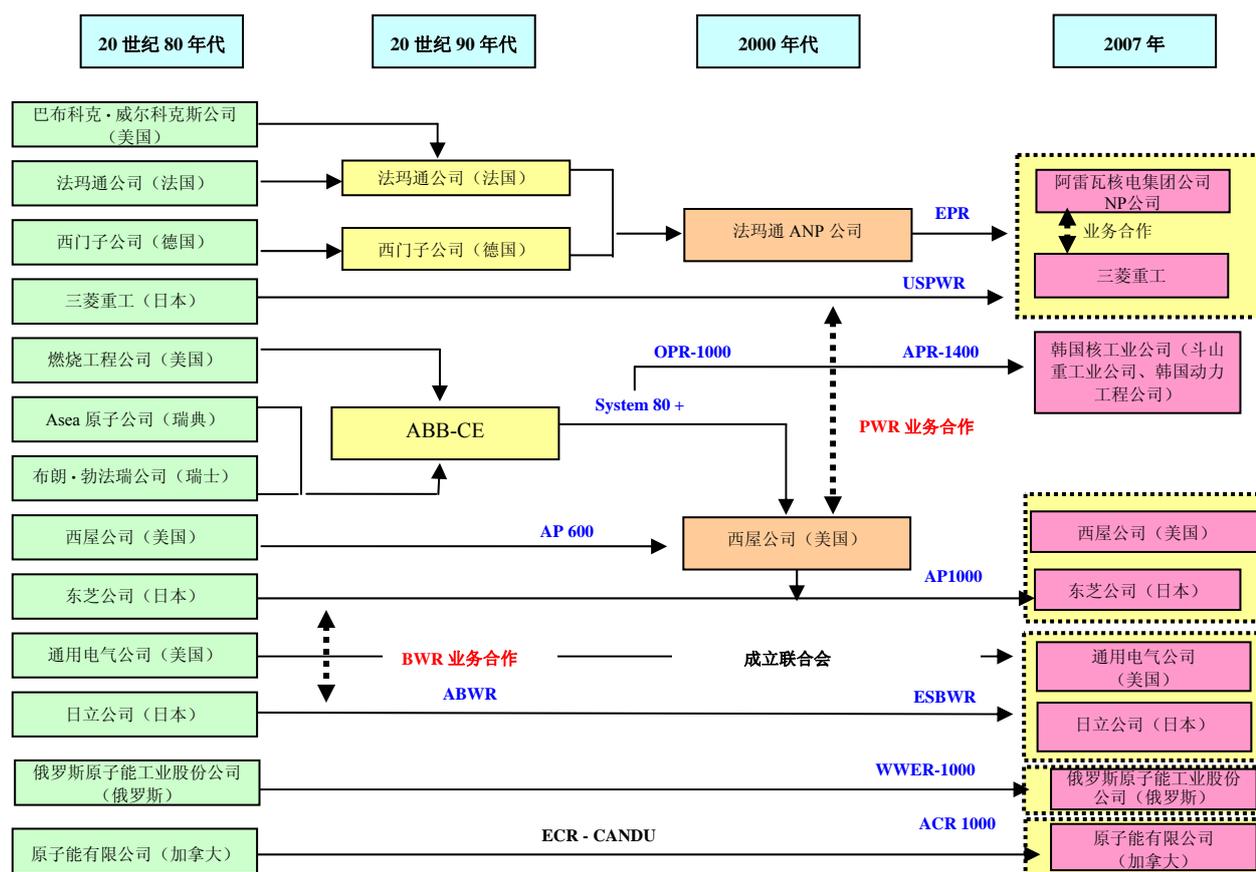


图 A-2. 核反应堆工业的发展演变 (AP600/AP1000: 先进非能动压水堆 (600/1000 兆瓦 (电)) ; EPR: 欧洲压水堆; ABWR: 先进沸水堆; ESBWR: 欧洲型简化沸水堆; APR 1400: 先进动力堆 1400; OPR 1000: 优化动力堆 1000; ACR: 先进坎杜堆; ECR: 加强型坎杜堆; WWER: 水-水动力堆; USA PWR: 美国先进压水堆; DHIC: 斗山重工业公司; AEP: 俄罗斯原子能项目公司)。

A.4. 燃料循环前端²

27. 以低于 130 美元/千克铀的价格可回收的已确定常规铀资源目前估计为 550 万吨。该资源相对于 2005 年增长了约 80 万吨，这主要系澳大利亚、俄罗斯联邦、南非和乌克兰所报告的资源增加所致。铀的现货市场参考价 6 月份曾一度达到了近每千克 360 美元，随后在 12 月份跌回到每千克 240 美元。

28. 以低于 130 美元/千克铀价格计的未发现的常规铀资源估计为 730 万吨。这一数量既包括预计存在于已知矿床中或已知矿床附近的资源，也包括据认为存在于地质上有利但尚未勘探区域中更具推测性的资源。估计还有另外 300 万吨的推测铀资源，其

² 本节内容系基于即将出版的经合组织核能机构-原子能机构“红皮书”（经济合作与发展组织核能机构-国际原子能机构《2007 年铀资源、生产和需求》，经合组织，巴黎（2008 年））。有关原子能机构燃料循环前端活动的更详细资料可见《国际原子能机构 2006 年年度报告》相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>），亦可查阅以下网址：<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>。

生产成本还未确定。

29. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。非常规资源系指那些铀仅可作为一种少量副产品被从中回收的资源。目前，很少有国家报告非常规资源。与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸岩、黑色页岩和褐煤伴生的潜在可回收铀的以往估计值为 1000 万吨铀量级。也能够用作核燃料资源的钍非常丰富，在自然界分布广泛，而且在许多国家是一种易于开采的资源。世界范围内的这种资源估计约有 600 万吨。尽管钍作为燃料一直在进行示范性的使用，但在其能够与铀平起平坐加以考虑之前还需要作大量的进一步工作。

30. 海水据估计含有约 40 亿吨铀，但浓度极低，仅为十亿分之三至十亿分之四。因此，35 万吨海水才能经处理生产出一千克铀。目前，这种生产方式过于昂贵。德国、意大利、日本、英国和美国在 20 世纪 70 年代至 80 年代进行过研究。日本仍在继续进行研究，试验运行的估计生产成本为 750 美元/千克铀。

31. 2005 年至 2006 年，在铀现货价格增长的驱动下，铀勘探和开发工作显著增加，预期在 2007 年将进一步增加（见图 A-3）。这种增加既出现在过去就勘探和开发铀矿床的国家，也出现在许多新加入铀勘探的国家。

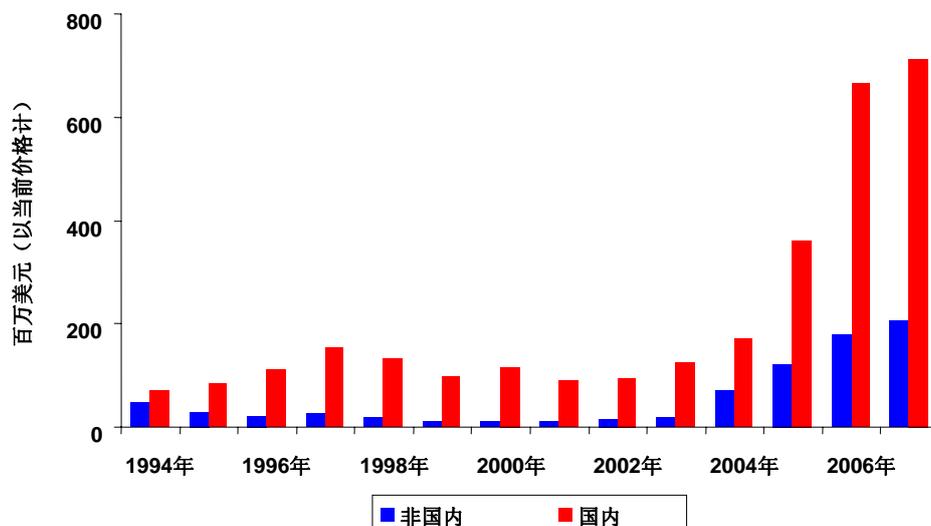


图 A-3. 已报告的铀勘探和开发费用趋势。2007 年值为估计值。

32. 2006 年，世界范围内的铀产量为 39 695 吨，比 2005 年的 42 114 吨减少了近 6%。据估计，2007 年的铀产量将增至 43 600 吨。2006 年，仅澳大利亚和加拿大的产量就占到世界产量的 44%，再加上另外六个国家（哈萨克斯坦、纳米比亚、尼日尔、俄罗斯联邦、美国和乌兹别克斯坦）的产量，其合计已占世界铀产量的 92%。

33. 2006 年的铀产量仅约占世界反应堆 66 500 吨铀需求量的 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、乏燃料后处理得到的铀、由来自后处理

乏燃料的铀-239 部分替代铀-235 的混合氧化物燃料以及贫化铀尾料再浓缩（贫化铀的铀-235 含量低于 0.7%）。

34. 燃料循环的下一个步骤是转化。当前的转化市场已达到供需平衡，而且供应能力正在按需扩大，以满足预期的增长。美国核管会将 Metropolis 六氟化铀转化厂的许可证再延期 10 年，至 2017 年 5 月。同时，该厂的生产能力也增加到 20%。阿雷瓦核电集团公司已宣布启动 Comurhex II 项目，这是一个建在法国南部的铀转化新设施，计划于 2012 年进行初步工业生产。

35. 在浓缩领域存在着一些生产能力过剩情况。但较老的扩散厂预计不久将关闭，并将被需要输入能量更少的离心分离厂所取代。2007 年，美国核管会为美国浓缩公司新建的美国离心分离厂颁发了建造许可证。建造工作已于 4 月开始，并于 9 月开始进行前导级联试验。日本核燃料有限公司已开始在六所村装备更为有效的新型离心机的先进铀离心浓缩厂进行级联试验。若干公司签署了从通用电气-日立核能公司获得铀浓缩服务合同的非约束性意向书，后者正致力于使目前称为“全球激光浓缩”技术的下一代激光激发同位素分离激光浓缩技术实现商业化。

36. 5 月，哈萨克斯坦和俄罗斯联邦在东西伯利亚建立了国际铀浓缩中心。12 月，亚美尼亚政府宣布它也将加入该中心，并已于 2008 年 2 月加入。国际铀浓缩中心是在弗拉基米尔·普京总统 2006 年关于建立“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”的倡议方面迈出的一步。有关哈萨克斯坦和俄罗斯联邦在安加尔斯克合资建造另一个浓缩中心的讨论也在进行之中。

A.5. 乏燃料和后处理³

37. 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。第一种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（铀和钍）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在技术上具有很高的信心。

38. 迄今，中国、法国、印度、日本和俄罗斯联邦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。法国、印度、俄罗斯联邦和英国的后处理厂正在运行，但英国塞拉菲尔德的后处理厂 2007 年由于内部发生泄漏而退出运行。在日本，已开始在新的六所村玻璃固化厂进行放射性试验，目前正在用硼硅酸盐玻璃对已分离的

³ 有关原子能机构乏燃料和后处理活动的更详细资料可见《国际原子能机构 2006 年年度报告》相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）。

高放废物进行混合。但由于所制造的混合氧化物燃料有限，目前世界上现有后处理能力得到利用的不足 50%。加拿大、芬兰、瑞典和美国目前已选择直接处置，但美国 2006 年宣布了“全球核能伙伴关系”，其中包括开发供美国使用的先进再循环技术。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。

A.6. 废物和退役

39. 芬兰、法国、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 年之前将处置库投入运行。可能成为芬兰奥尔基卢奥托处置库一部分的昂卡罗地下表征设施的建造工作正在按计划进行。截至 2007 年底，隧道的长度已达到 2.5 公里，深度达到 240 米。继 2006 年颁布新法律之后，法国的处置库计划已经进入详细的选址阶段，目标是在 2015 年申请许可证。在瑞典，已经在两个场址完成了广泛的场址调查，计划于 2009 年提出选定场址的许可证申请。在美国，尤卡山处置库许可证申请的准备工作进展顺利，计划于 2008 年年中提交申请。2007 年，加拿大政府接受了该国核废物管理组织提出的一项建议，即对乏核燃料的长期管理采取“分阶段适应性管理”方案，目的是找到并准备好一个处置库场址，同时对回取的可能性持续进行监测。

40. 关于退役，美国核管会已批准对 2006 年退役的大岩角核电厂大部分场址解除监管，以便不受限制地作为公共用地；对扬基罗核电厂的大部分场址也作了类似的解除监管控制。大岩角和扬基罗的许可证也将适用于这些场址的干式容器贮存设施。因此，截至 2007 年，世界各地已有 10 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。32 台机组正在实施场址最终解除监管之前的拆除。34 座反应堆正在经历长期封闭之前的最低程度拆除，其中包括英国 2006 年 12 月 31 日关闭的四座镁诺克斯型反应堆塞兹韦尔 A-1 和塞兹韦尔 A-2 机组以及邓杰内斯角 A-1 和邓杰内斯角 A-2 机组。

41. 继与代表潜在捐助方和受援方的成员国专家开展一系列磋商之后，原子能机构在 2007 年 9 月的大会上启动了一个新的退役杰出中心网。该网络的目的是促进从事退役的组织间进行知识和经验交流，并鼓励发达成员国的组织为请求提供退役援助的成员国的活动作出贡献。

A.7. 影响核电未来的其他因素

A.7.1. 可持续发展和气候变化⁴

42. 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

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见《国际原子能机构 2006 年年度报告》的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）和 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/climate.shtml>。

意，“是否选择核能取决于各国自己”。2002年可持续发展问题世界首脑会议重申了这一结论，可持续发展委员会也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取得进展的影响。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，其结果是使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。

43. 《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从2008年1月1日起一直到2012年止的“第一个承诺期”限制其温室气体排放。不同的国家也相应地采取了不同的政策。核电尽管温室气体排放量低，但并非处处都对其有利，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。

44. 2007年11月，政府间气候变化问题小组⁵发表了“第四次评定报告”，其中确认已观察到气候变化的影响，而且科学结论也表明有必要在近期采取行动减少温室气体排放。12月，《联合国气候变化框架公约》缔约方第十三届会议暨《京都议定书》缔约方第三届会议在巴厘岛召开。这两个会议产生了“巴厘岛行动计划”⁶，其中包括决定“启动一项全面的进程，促进通过长期合作行动全面、有效和持久地实施《联合国气候变化框架公约》”，以便在该公约缔约方第十五届会议上就全球减少排放的长期目标通过一项决定。这包括所有发达国家缔约方做出或采取可核查的缓减承诺或行动；发展中国家缔约方在可持续发展范围内采取可核查的缓减行动，以及发展中国家减少砍伐森林和森林退化造成的排放。该“行动计划”未包括具体量化的减排指标。核电在会议上未成为主要的讨论议题。

A.7.2. 经济性

45. 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，现有运行良好的核电厂仍然是具有竞争力和有利可图的电力来源。但就新建电厂而言，核电的经济竞争力取决于可利用的替代能源、一国的总体电力需求及其增长速度、市场结构和投资环境、环境制约因素以及政治和监管上可能的滞后或变化所带来的投资风险。因此，经济竞争力因国而异，因具体情况而不同。

46. 2007年值得注意的一个趋势是，由于经济迅速增长和需求旺盛，导致新建电厂从混凝土到劳动力的所有投入的价格都在上升。这种趋势可能继续下去，并大大抵消学习效应带来的预期的建设费用减少。这种趋势影响从煤炭到风能的所有能源，但费用结构中的前期投资越密集，影响就会越大。对于今天潜在的核电投资者而言，最大的

⁵ 上个月，“诺贝尔和平奖”颁发给政府间气候变化问题小组和美国前副总统戈尔，“以表彰他们为创造和传播有关人为气候变化的更多知识所做的努力以及为应对气候变化所需采取的措施奠定的基础”。

⁶ http://unfccc.int/files/meetings/cop_13/application/pdf/cp_bali_action.pdf.

不确定性也许是不同国家今后碳排放的价格。

A.7.3. 安全性⁷

47. 世界核电营运者联合会公布的并复载于图 A-4 和 A-5 中的安全指标在 20 世纪 90 年代有了明显改进。最近几年，一些领域稳定地保持了这种状况。但业绩最佳者与最差者之间的差距仍然很大，为继续改进提供了相当大的空间。

48. 原子能机构的年度“核安全评论”（GC(52)/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。

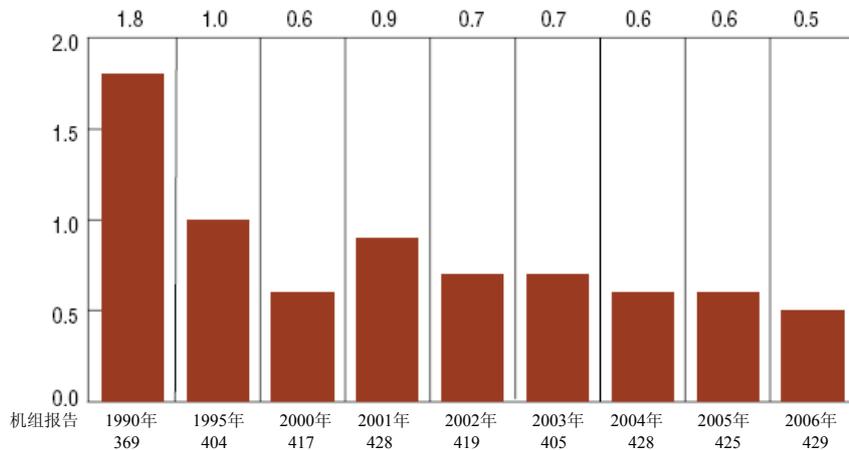


图 A-4. 每 7000 小时临界非计划紧急停堆次数。
资料来源：核电营运者联合会 2006 年性能指标。

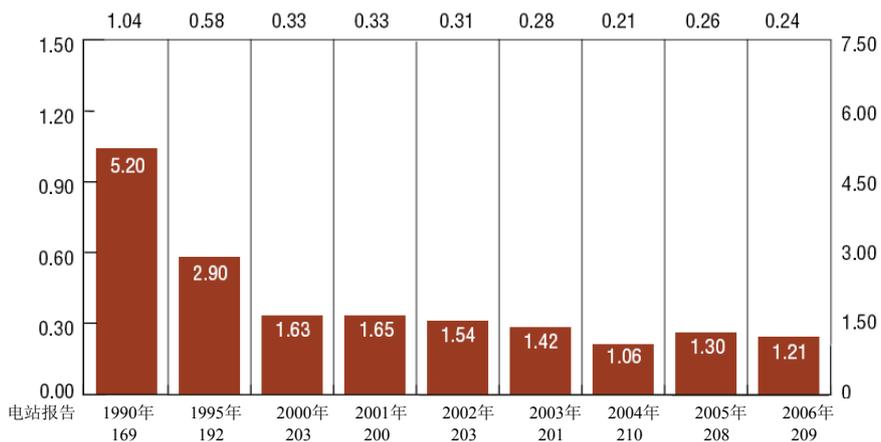


图 A-5. 核电厂每工作 20 万人·小时（左边刻度尺和图顶部）和每工作 100 万人·小时（右边刻度尺和柱条上）的工业事故数量。资料来源：核电营运者联合会 2006 年性能指标。

⁷ 有关原子能机构核安全活动的更详细资料可见最新《国际原子能机构 2006 年年度报告》的相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>) 和 <http://www-ns.iaea.org/>。

A.7.4. 人力资源开发

49. 对核电日益高涨的预期重点关注的一直是实现这些预期所需的人力资源，其中既包含熟练工作人员，也包含核学位计划的毕业生。

50. 2007 年，经合组织核能机构核能指导委员会就政府在确保核领域合格的人力资源方面的作用发表了一项声明。该机构指出，最近的研究表明，经合组织核能机构各国的核教育和培训出现了不同程度的下降，如果不采取任何行动，核部门将有面临合格人才短缺的危险，从而无法确保现有核设施的适当监管和运行以及建造新的核设施。就欧洲而言，欧洲委员会 2007 年的一份报告“可持续的核能技术平台：展望报告”强化了这一结论，其中建议“……必须加强核科学和核工程领域的教育和培训”。

51. 在经历一段时间的下降后，由于受到以下因素的影响，目前大学的招生情况呈现出一种适度增长的趋势：

- 非动力应用如医学应用和农业领域继续存在对人力资源的基本需求；
- 对成熟核计划和为替代即将退休的工作人员而对已设立的各种核能组织的需求依然存在；
- 对今后增长的预期导致核工业包括电力公司、监管机构和研究组织扩大招收新工作人员。

52. 今后预期的增长、技术创新方面的最新倡议（见 B 部分）、政府资金增加、中国和印度等国家加速发展的核计划以及其他国家更新的核计划也都在吸引着大学新生，如美国的政府专项资金已导致核领域大学本科招生人数在 2000 年至 2007 年从 500 人增加到了 2000 人，为原来人数的四倍。

53. 国际组织和核工业组织还在通过扩大核知识管理计划解决人力资源问题。除原子能机构及其在从反应堆模拟机到核法律等领域提供的培训外，⁸ 这种例子还包括美国核管会等监管机构、德国巴登符腾堡能源公司等电力公司和加拿大原子能有限公司等设计公司。此外，建立学术性网络和开展合作的现象更加普遍。亚洲核技术高等教育网已扩大到 12 个国家的 28 个成员研究机构。欧洲核教育网现有 28 个成员，另有 16 个联系成员，涉及 17 个国家。世界核大学第三届暑期学院 2007 年在大韩民国首尔举办，吸引了 35 个国家的 102 名进修人员。

⁸ 2007 年，由原子能机构技术合作计划支助的项目涉及 2287 名培训班参加者和 1661 名进修人员和科访人员。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变⁹

B.1.1. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”

54. 原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”为研究核电方案及相关要求提供了一个公开的国际论坛。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。

55. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”已经发展了评定革新型核能系统的方法学。阿根廷、亚美尼亚、巴西、中国、法国、印度、乌克兰和欧洲委员会目前正在利用该方法学开展评定研究，而加拿大、中国、法国、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和乌克兰则在利用该方法学对快堆闭式核燃料循环开展联合评定工作。

56. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”还正在制订用于在发展中国家发展和部署核电厂的用户通用标准。其目标是促进技术使用者与持有者之间对于用户需求的了解。

57. 最后，“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”指导委员会 2007 年 7 月核准的 12 项协作项目建议的有关工作正在取得进展。

58. “第四代国际论坛”通过签订系统合同和协议对 2002 年选取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、铅冷快堆、熔盐堆、钠冷快堆、超临界水冷堆和超高温反应堆。

59. 2007 年签署了钠冷快堆项目安排，以促进研究和先进燃料、部件设计和核电厂配套子项，以及旨在论证快中子堆可以对全部锕系元素存量进行管理的“全球锕系元素循环国际论证”。超临界水冷堆和气冷快堆系统研究计划已经完成，超高温反应堆的项目安排处于研究开发和验证超高温反应堆材料、燃料和燃料循环问题以及产氢问题的最后谈判阶段。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”开展合作，以避免工作重复和建立协同作用。2008 年 2 月，它们就包含 14 点内容

⁹ 有关原子能机构先进裂变堆活动的更详细资料可见《国际原子能机构 2006 年年度报告》的相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2006/>）。另见《新的先进核电厂术语的说明》，第 936 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，1997 年；《液态金属冷却快堆技术现状》，第 1083 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，1999 年；《模块式高温气冷堆技术的现状与未来发展》，第 1198 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，2001 年；《重水堆：现状和预期发展》，第 407 号技术报告丛书，国际原子能机构，奥地利维也纳，2002 年；《国家加速器驱动系统分离和嬗变计划的审查》，第 1365 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，2003 年；《先进轻水堆设计现状：2004 年》，第 1391 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，2004 年；《革新型中小型反应堆设计现状》，第 1485 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，2005 年；《非厂内换料小型反应堆设计现状》，第 1536 号技术文件，国际原子能机构，奥地利维也纳，2007 年。

的联合行动计划达成了一致意见。该计划包括原子能机构利用“第四代国际论坛”的经济评价模型“ECONS”估算气冷堆的成本和“第四代国际论坛”利用原子能机构的核能产氢经济评价模型“HEEP”。

B.1.2. 全球核能伙伴关系

60. “全球核能伙伴关系”是就全球核能扩大的必要性已达成一致意见的 19 个国家¹⁰作出的一项合作努力，其目的是加速开发和利用先进燃料循环技术，从而鼓励发展、保护环境和减少核扩散的危险。2007 年，“全球核能伙伴关系”设立了一个部长级执行委员会和一个指导委员会以及关于可靠核燃料服务和基础结构发展的若干工作组。这两个委员会都在这一年举行了各自的第一次会议。

B.1.3. 先进裂变的其他发展

61. 除“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”、“第四代国际论坛”和“全球核能伙伴关系”外，若干国家、公司和合作伙伴还正在研究、开发和部署先进裂变堆。《2007 年核技术评论》¹¹对这些计划作了概述。2007 年的发展基本上延续了 2006 年报告的进展，因此，《2008 年核技术评论》不在此赘述。

B.2. 聚变

62. 实现聚变作为今后能源的国际努力得到了来自“国际热核实验堆”项目的七个参项方（中国、欧洲联盟、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国）的强有力承诺，它们于 2006 年 11 月 21 日在巴黎部长级会议上完成并签署了“国际热核实验堆联合实施协定”。该协定随后得到了所有相关各国政府的批准。“国际热核实验堆联合实施协定”于 2007 年 10 月 24 日生效，从而使国际热核实验堆国际聚变能组织成为一个法律实体。原子能机构 20 多年来一直保持着与这一重要国际倡议的联系，国际热核实验堆各方对维护原子能机构的继续参与表现了浓厚的兴趣。对于国际热核实验堆各方以及所有成员国而言，原子能机构都是促进聚变领域教育和培训活动方面的一个重要的国际联络点。通过在原子能机构主持下定期开会讨论所取得的技术成就，来自拥有较小型聚变装置的专家可以帮助影响聚变堆的最终设计。原子能机构还为调查基于磁性约束和替代机制的电厂设计的国际专家提供一个论坛。未来的聚变示范电厂将利用国际热核实验堆取得的经验。

63. 为了加速实现聚变能，欧洲原子能联营和日本已商定在今后 10 年内根据一项“更广泛的方案”协定开展合作。朝着聚变能发电示范设施取得进一步进展所需的基础设施包括用于进行聚变反应堆材料检验和质量鉴定的“国际聚变材料辐照设施”。

¹⁰ 截至 2007 年年底。

¹¹ <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/assets/ntr2007.pdf>。

64. 2007 年 9 月在日本举行的第五届惯性聚变科学和应用国际会议突出强调了利用激光、辐射或重离子束作为压缩氘-氚聚变靶丸的驱动器的聚变成就。将原子能机构技术会议并入这次国际会议为通过惯性聚变能协调研究项目支助的专家提供了向有经验的广大听众介绍他们的工作的可能性，这些听众包括来自美国“国家点火装置”、法国“兆焦激光计划”和日本大阪激光工程研究所的日本“高速点火实验计划”等主要研究机构。2008 年是 1958 年在日内瓦举行的第二届“原子用于和平”会议公布民用核聚变研究结果 50 周年。今年 10 月将在同一地点即日内瓦万国宫举行原子能机构第二十二届聚变能会议——“聚变能会议 2008”，这次会议将与瑞士共同主办，以纪念 1958 年的活动。

65. 许多国家对聚变活动的兴趣正与日俱增。巴西科技部长最近启动巴西聚变研究网就是这方面的一个例子。该网络将聚集不同大学、研究机构和实验室开展的活动，从而确定优先次序并促进开展国际合作。葡萄牙主办了关于聚变的联合实验，约有 29 名年轻的国际专家利用葡萄牙的 ISTTOK 托卡马克装置开展了聚变实验未来设计和远程参与的聚变实验。

C. 原子数据和核数据

66. 核数据用于科学技术国际会议于 2007 年 4 月 22 日至 27 日在法国尼斯举行。在为期六天的激烈辩论期间，与会者特别强调了以下方面的数据需求问题：革新型反应堆和燃料循环（更安全、更清洁和更经济的裂变反应堆）；为实现聚变反应堆（例如“国际热核实验堆”）和试验这些设施所需的材料（例如“国际聚变材料辐照设施”）所作的努力；为核废物嬗变和能源生产设计的加速器驱动系统；医学应用，包括放射性同位素生产、患者辐射剂量的计算机模拟以及利用带电粒子的先进治癌技术；文化遗产诊断和材料成分分析方面正在采用的分析技术。

67. 科学家们正在上述各领域开展协作，在国家与国际两级正在努力阐明和解决原子数据和核数据问题，以加强对这种研究的了解和量化。

68. 2007 年 1 月 11 日，在德国卡尔斯鲁厄启动了一个被称为“欧洲核数据测量设施”的新项目，这是欧洲委员会资助的一个“综合基础设施倡议”。“欧洲核数据测量设施”项目的主要目的是通过建立网络、跨国访问核数据测量的参与设施以及开展联合研究活动，促进统一使用和整合基础设施相关服务。“欧洲核数据测量设施”将提供一个平台，以便于集中所有科学努力，从而产生出高质量的核数据测量结果，支持开展废物嬗变研究以及为减少核电生产中的放射性废物而正在开发的“第四代系统”的设计研究。

69. 美国和经合组织核能机构在 2006 年和 2007 年都批准了采用新的核应用数据（分别是 US ENDF/B-VII 和 JEFF-3.1.1），其中增加了大量新数据，用以进一步改进对裂变和聚变反应堆的表征和控制。这些数据将被用来提高可靠性和效率，并协助减少废

物。还可以提取用来开发加速器驱动系统的数据库。这些数据库连同实验核反应数据库正被用于非破坏性核分析技术，如对只需微量样品的贵重物体进行化学和同位素表征所采用的中子活化分析和离子束分析。

70. 除处理和诊断所使用的传统的 X 射线以及 β 源和 γ 源外，采用加速器产生的带电粒子对患者直接进行辐照已变得越来越重要。带电粒子的一个优点是避免对健康组织进行辐照（见图 C-1）。由于认识到准确数据对于设计和规划患者治疗设施的必要性，原子能机构正在鼓励对医用带电粒子相互作用数据进行评价。

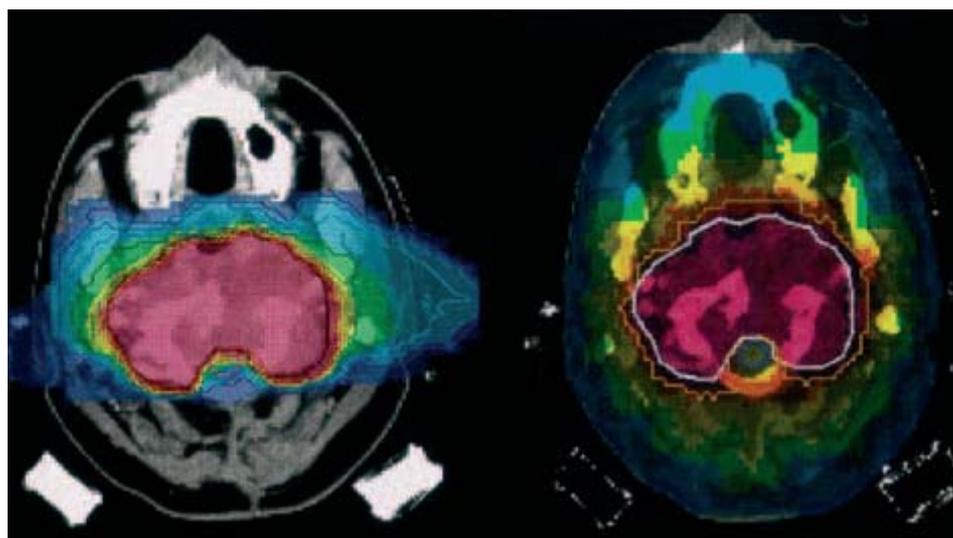


图 C-1. 碳离子（左图）和常规 X 射线（右图）治疗计划比较。靶体积受到辐照，但碳离子对健康组织的剂量要低得多。计划的准确性取决于带电粒子数据库的可靠性（影像来源：德国重离子研究所）。

D. 加速器和研究堆的应用

D.1. 加速器

71. 世界上第一台轨道不相似固定场交变梯度加速器（图 D-1）已经在英国达斯伯里实验室开始建造。该加速器发明于 1999 年，预计将作为下一代促进质子和碳离子束癌症治疗的医院临床加速器产生重大影响。这种加速器比类似的回旋加速器和同步加速器癌症治疗仪更小、更易操作和更便宜。这种电子束轨道不相似固定场交变梯度加速器将提供医用原型加速器最终设计和建造所需的资料，并提供知识，以用于评价其作为加速器驱动的次临界反应堆、废物嬗变和材料研究中所使用的质子驱动装置的可能性。这一首台轨道不相似固定场交变梯度加速器正在通过国际协作进行设计，预计于 2009 年开始运行。参加协作的单位有：布鲁克海文国家实验室、欧洲核研究组织、费米国家加速器实验室、亚原子物理学和宇宙学实验室、加拿大特里姆实验室和英国各加速器科学中心。

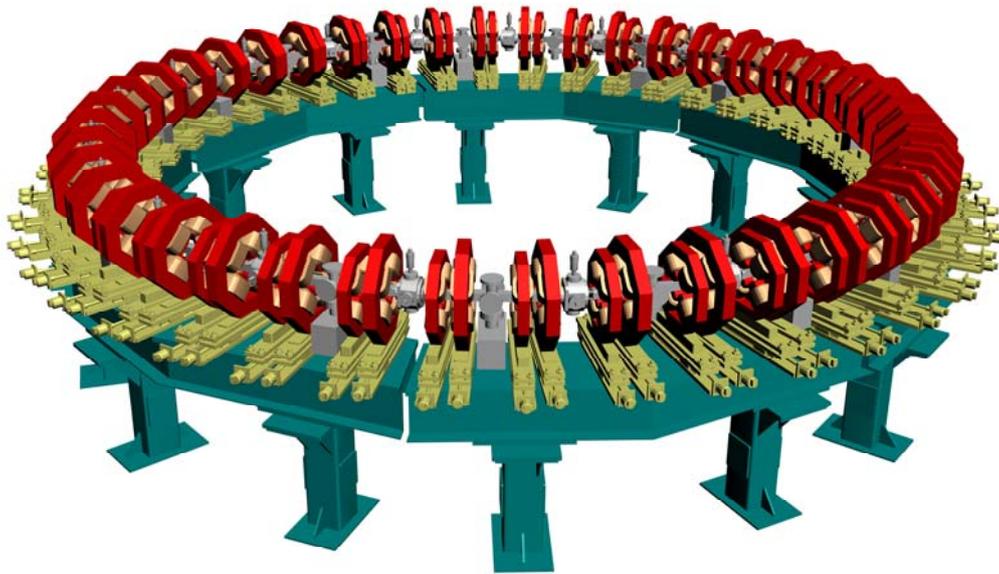


图 D-1. 轨道不相似固定场交变梯度加速器环概念布置图。

D.2. 研究堆

72. 在法国，100 兆瓦（热）朱尔斯赫罗维兹材料试验堆于 2007 年 3 月开始建造。该反应堆将成为欧盟支持核电发展、生产放射性同位素和辐照电子用硅的一个关键基础设施，目前正由法国原子能委员会建造，并且由一个国际财团提供融资。在可以利用高密度低浓铀铀-钼燃料之前，该反应堆将开始使用浓缩度为 27% 的铀硅化物燃料。在比利时，新的加速器驱动辐照设施“MYRRHA”的建造已处于后期阶段。

“MYRRHA”的目的是作为欧洲的一个多功能研究设施，用于除其他外，特别研究高放长寿命放射性废物的嬗变以及用于未来能源系统的创新组件和材料的性能。

73. 2007 年 11 月 5 日至 9 日在澳大利亚悉尼举行的研究堆安全管理和有效利用国际会议就地区合作进行了广泛的讨论。会议除其它外，特别得出如下结论：国际协作在若干例子中取得了成功，而且是今后在满足客户需求和维持一个财政实力雄厚的研究机构方面取得成功的关键；财团、联盟和同行小组网络可能发展并维持有效的利用；原子能机构应继续促进形成研究堆营运组织集团，同时承认没有哪种模式能够适用于全部情况。

74. “降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”和“减少全球威胁倡议”等其它倡议寻求将研究堆从使用高浓铀燃料转换为使用低浓铀燃料。从全球范围来看，截至 2007 年底，转换使用低浓铀燃料的研究堆达到 55 座，还有 46 座研究堆计划转换为使用其它现有合格燃料。另有 28 座研究堆需要开发和认证仍需认证的甚高密度先进铀-钼燃料才能从高浓铀转换为低浓铀。正如在“降低研究堆和试验堆燃料浓缩度计划”各次年度会议和 2007 年研究堆燃料管理国际专题会议上所介绍的那样，有关对高密度低浓铀燃料重要的开发和认证进行国际合作的工作一直进展顺利。

75. 据《2007 年核技术评论》提供的报告，已作出了各种努力，克服在甚高密度铀-钼弥散体燃料行为特别是在高功率和高温下的行为方面存在的缺陷。一个国际燃料开发工作组正在协作研究包括改变燃料和基体化学或用另一种材料替代铝基体在内的若干潜在补救方法，以及完全除去这种基体（块状燃料）的替代方法。该工作组包括阿根廷、加拿大、法国、德国、大韩民国、俄罗斯联邦和美国。

76. 在美国试验中辐照过的铀-钼微型弥散体燃料板的辐照后检验结果表明，添加 2—5%的硅能够大大降低燃料和基体之间相互作用的程度，并有效解决了在该试验的高功率和高温状态下的肿胀问题。

77. 法国对含有研磨或雾化铀-钼粉末和不同铝基体成分的正常尺寸铀-钼弥散体燃料板进行了添加或不添加硅的辐照试验。试验结果表明，即使不在基体中添加硅，这种燃料板在高功率水平和高燃耗状态下也有十分良好的辐照性能。这种行为原则上归因于颗粒周围存在一个保护性氧化层。

78. 高性能研究堆的转换需要有较高铀密度的铀-钼块状燃料，目前正在为这种燃料的开发作出重要努力。对微型块状燃料板进行辐照后，无论在中等功率密度至中等燃耗还是甚高功率密度至高燃耗都取得了良好的结果。目前正在开发和寻求不同的铀-钼块状燃料制造技术。

E. 粮食和农业领域的核技术

E.1. 作物改良

79. 作物诱变已成为开发优良作物品种的精选方法，结果导致约 3000 个突变体品种正式推广耕种（图 E-1）。“第一代”突变体按当时的育种目标是通过提高营养利用效率和增加抗生物和非生物影响的能力解决增产的需要。由于大多数重要作物已实现高产稳产，如今的育种计划已转向重点关注增值特性，以使最终用途多样化，通过提高竞争力增加更多的收入，并满足特定饮食需要。这些特性要求只对遗传性因素（基因）作细微改变，这是一种特别适合于诱发突变技术的情况。

80. 最近推出的作物诱发突变品种是“Clearwater”和“Herald”。这是两个营养更丰富的大麦品种（植酸含量降低有可能提高铁、锌和钙的生物利用率），具有经过增强的品质特性，能满足上述特定需要。例如，通过利用这两个品种生产动物饲料，农民正在实现大量节省，而不必购买昂贵的营养添加剂

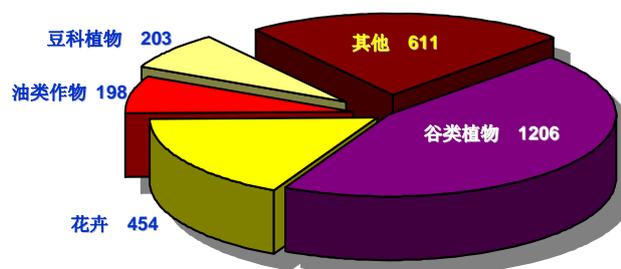


图 E-1. 突变品种（2007 年）

资料来源：粮农组织/原子能机构突变品种数据库
(<http://www-mvd.iaea.org>)

来中和植酸的作用。利用这些突变体还创造了更清洁的环境，因为基本上消除了地下水和地表水中与给牲畜喂食植酸含量高的大麦有关的磷过多的污染。

81. 诱变突变技术还通过提高大豆的营养价值扩展了大豆的潜在用途。最近在日本推出的 Sakukei 4 号品种拥有固氮能力，因而基本上能够自我施肥，排除了对其它肥料的需求。这给农户带来了可观的节省。最近推出的其它诱变突变大豆品种还有“Yumenori”和“Ichihime”，前者的“好”蛋白先质甘氨酸的含量很高；后者则不含脂肪氧合酶，即为参与哮喘和冠状动脉心脏病形成过程的一种天然存在的植物酶。

E.2. 增加生物燃料生产

82. 许多国家都确定了以从再生资源提取的燃料补充汽油的目标和时间表。其中许多目标都是为近期确定的，而要实现这些目标就必须增加乙醇和生物柴油的生产。除其它努力之外，这还要求实现从基于淀粉的乙醇生产向基于纤维素的乙醇生产的转变。生物量作物的基因强化提供了提高生物总产量和生物质能转换效率的机会。实现上述目标的一个有效途径是通过作物诱变强化育种计划，根据该计划，选种在与大染色体区相对的含有特定性状的个别基因的基础上进行。最近，利用高通量基因筛选法对玉米的细胞壁成分进行了评价，结果产生了一批现在可以对其生物质能转换效率进行评价的突变体。突变体基因可以纳入育种计划，或者可以利用基因序列来确定感兴趣的天然变体。

E.3. 改进牲畜的繁殖力和健康

83. 为满足具体和独特要求而开发的核技术应用正越来越多地用于取得更多和更好的牲畜和牲畜产品。当前的趋势表明，该技术将在改进动物营养、繁殖和健康方面发挥重要的作用。例如，放射免疫分析法现已被用来测量生物样品中特定分子的浓度、标记瘤胃微生物、评价动物饲料以及分析饲料向营养物质的转化及其摄入情况。酶联免疫吸附测定法被广泛用于评价、确定和监督用以检测病原体对动物的危害的靶向抗体。聚合酶链式反应即聚合酶链式反应测序法被用于对动物疾病病原体进行分子探测和表征，方法是对脱氧核糖核酸进行直接标记，以选择或确认经选定的有利遗传特性（肉质更精瘦、产奶更多、抗疾病等等），或测定动物的亲本或起源。核技术的这种新型应用继续在兽医实践中找到新的途径。

84. 稳定同位素、辐照疫苗和正电子发射技术的利用为未来提供了多种可能性。稳定同位素继续用于动物繁殖和健康应用。碳-13 或氮-15 标记技术在实验性地监测碳水化合物新陈代谢和蛋白质与营养物质的摄入情况的方法中得到利用。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小牛的瘦体组织、脂肪含量、身体构成、体内总水量和奶摄入情况。体液中的氧化氘浓度用同位素比质谱测定法或红外谱测定法测定。同位素比质谱测定法还被用在发病机理和其它生理学研究中，并用于非侵入性地测定动物产品的地理来源。由于能够对动物产品准确跟踪到其地理来源，成员国可以掌握更多的经济机会。例如，如果一国除特定少数地区外可以全部根除特定

疾病，那么，在可以将来自其它地区的动物产品追踪到无疾病区的情况下，这种产品的出口就可以正当进行。此外，这种方法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，如候鸟对于禽流感从流行地传播到非疫区所起的作用。

85. 通过辐照使疫苗失活产生出更好地模仿活病原体的免疫感应方式的死病原体。这就为具体针对牛的疟疾、口蹄疫、裂谷热或新孢子虫病等疾病开辟了新的免疫途径，因为基因工程疫苗很少有成功表现。现在已经开始对治疗牲畜血液寄生虫的辐照疫苗展开研究。

86. 近年来发生了很多人用医疗技术转为兽用的情况。正电子发射断层照相法就是一个实例。兽医正在利用正电子发射断层照相法诊断高价值动物如赛马和比赛公牛肿瘤和其它组织不正常现象。利用正电子发射断层照相法可以降低进行探查性手术的必要性，从而减少费用并提高动物健康水平。

E.4. 虫害防治

E.4.1. 利用昆虫不育技术防治采采蝇

87. 为了按比例增加防治采采蝇的昆虫不育技术，目前正在优先地区包括埃塞俄比亚南部大裂谷地区开展各种努力。“南部大裂谷根除采采蝇项目”位于亚的斯亚贝巴附近的喀里蒂的大型采采蝇饲养和辐照中心的头两个单元于 2007 年 2 月 3 日正式建成。这两个单元在非洲联盟泛非根除采采蝇和锥虫病运动特别捐助者会议后举行了落成典礼。竣工后的设施将由七个单元组成，并最终有能力至少饲养 700 万只采采蝇雌虫，并可每周繁殖 70 万只不育雄蝇，足够覆盖 4500 到 7500 平方公里的面积。在喀里蒂，采采蝇种群规模一直在稳步增加，但还必须大量增加才能达到启动昆虫不育技术作业阶段所需的采采蝇数量。2007 年 5 月，对不育雄性采采蝇成功地进行了首次试验放飞，以评定其在野外的表现情况。结果表明，这些采采蝇已经存活并散布开来，达到了今后开展根除计划的需要。

88. 粮农组织/原子能机构采采蝇规模饲养标准操作程序最近完成编制。这是对利用昆虫不育技术防治采采蝇所作的重要贡献，因为它表明对以下方面所涉及的全部程序首次作了全面概述：种群启动；规模饲养；血液的收集、处理和储存；以及对不育蝇虫的质量控制。

E.4.2. 利用昆虫不育技术防治果蝇

89. 地中海果蝇 *Ceratitis capitata* 是干扰国际农业贸易的最重要昆虫之



正在埃塞俄比亚的斯亚贝巴喀里蒂建设的采采蝇饲养和辐照中心。

一。为了消除对柑橘鲜果出口的障碍，西班牙正在占该国 80%柑橘出口额的巴伦西亚地区实施昆虫不育技术。世界上第二大地中海果蝇规模繁殖设施于 4 月在西班牙巴伦西亚建成。该设施是欧洲第一个大规模昆虫繁殖设施，它的建成标志着巴伦西亚农业社区大面积综合虫害治理方面向前迈出了具有战略意义的一步。该设施具有每周生产 5 亿到 6 亿不育雄性地中海果蝇的能力，并为西班牙以对环境更友好的方式抑制地中海果蝇种群铺平了道路。这项投资将使巴伦西亚的水果业有能力减少使用农药并进入新的出口市场。



新近建成的西班牙巴伦西亚地中海果蝇规模饲养设施。

E.4.3. 利用昆虫不育技术防治小菜蛾

90. 在南非西开普省锡特勒斯达尔谷地，约有 6000 公顷土地被用于生产供出口的柑橘，在那里一直在与粮农组织和原子能机构协作开展防治苹果异形小卷蛾 *Thaumatotibia leucotreta* 的一个试验性项目。这是南非最为严重的柑橘害虫。这种小菜蛾由于有抗药性所以很难防治，而且是柑橘出口的主要国际障碍。鉴于已经取得了积极的成果，柑橘业已经决定通过采用昆虫不育技术解决这一问题，并已承诺近期启动一项商业性的昆虫不育计划。正在探索是否有可能将稳定同位素作为附加研究工具用于了解跨境害虫如沙漠蝗虫的生态过程，以便更好地认识这种害虫的行为。更好地了解这类迁移性害虫的生物学和生态学有可能最终为制订更高效的防治战略作出贡献。

E.5. 食品辐照

91. 虫害、污染和腐坏造成的粮食损失十分巨大。据估计，世界八大粮食和经济作物产量的 42%因虫害而损失，收获后又损失 10%。尽管使用了现代粮食加工和销售系统，食品携带的疾病还是对人体健康构成了普遍的威胁，并成为降低所有国家经济生产率的一个重要因素。因此，确保食品和农产品的安全和质量已成为衡量国家为解决双重挑战即扩大城市化和增进公众健康所作响应的重要标准之一。

92. 食品辐照是解决以下问题的一个重要手段：减少由于腐坏和变质造成的损失；控

制造成食品携带疾病的微生物和其它生物；达到卫生和植物检疫要求¹²。除了继续将辐照用于卫生目的外，还增加了将辐照用于植物检疫应用特别是那些与检疫措施有关的应用活动。与粮农组织/世卫组织营养法典委员会和《国际植物保护公约》协作制定了国际标准和国际实施法规，以促进这种食品加工技术的应用。

F. 人体健康

F.1. 通过核医学制订个性化癌症治疗方案

93. 若要成功地治疗癌症，就需要全面地了解导致癌症生长的各种因素间复杂的相互作用。在细胞、基因和分子一级了解个体患者的癌症特性是为患者提供治愈可能性更大的特效治疗的关键。通过正电子发射断层照相法进行核医学分子成像使得能够重新确定治疗癌症患者的医疗方案，并对方案进行现代化改进。仅按癌症的解剖学位置对癌症进行分类可能是被认为患有相同癌症的患者对治疗产生完全不同反应的一个原因。目前，已经有一些新手段能够促进从分子角度了解患者的反应为什么如此不同。此举正在转变成为患者选择适合的治疗方式。现已发现，在身体的远隔部位见到的癌症可能比源于同一器官的两个肿瘤更为相似，并取决于它们寄生的致癌突变体的类型。还能够利用对正电子发射断层照相所提供的发病过程的详细了解来进行合理的药物设计，直至进行靶向治疗。

94. 在癌症治疗领域，血液学家、儿科医师和肿瘤学家开始探讨与定向寻找肿瘤分子（肽、抗体或低核苷酸）相结合应用化学疗法、免疫调节治疗或细胞信号传导调节剂的联合治疗方案。同位素加强放射靶向治疗方案不仅对于治疗局部固体癌或已扩散固体癌而且对于治疗血源性恶性肿瘤都有许多优势。

F.2. 辐射肿瘤学

95. 治疗规划和辐射施用方面的技术进步使得能够采用以三维适形辐射治疗方案乃至立体定向辐射治疗或强度调制辐射疗法等高度适形技术辐照肿瘤的战略。适形治疗描述的放射疗法系指确定一个形状与期望的靶体积完全“适形”的高剂量体积，同时尽可能最大限度地减少对关键正常组织的剂量。立体定向辐射治疗和强度调制辐射疗法以及图像引导辐射治疗和呼吸门控放射治疗等最先进技术的采用已导致更好地了解边界和器官移动的重要性。此外，最近几年在放射治疗领域取得的一项重大进展是将功能成像信息引入治疗规划过程。例如，利用正电子发射断层照相扫描与传统的计算机断层照相扫描相结合产生了具有生物学/新陈代谢标志的图像，从而有助于更恰当地设计放射治疗区域和对个体患者施用的剂量并取得更好的治疗效果。

96. 对这些技术的热衷源自下述假设，即进一步改进肿瘤的定位、更精确地确定剂量

¹² 可从 GovAtom 网站《2008 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

分布和更好地实现剂量处方的个性化将通过减少毒性或通过剂量逐步增加战略实现对肿瘤进行更好的局部控制来提高当前的疗效水平。目前正在世界范围内积极地研究这些方案。

97. 教育对于广泛应用这些新技术极为重要。基于因特网的“虚拟”教学应当有助于减少总体费用，并使这些技术能够更快地在日常临床实践中实施。与此同时，在全球范围内也在作出努力，提高对支持这些治疗新技术应用的医用物理学家的教育标准。许多国家已设立了确定医用物理学家的能力和认证其临床住院实习培训计划的组织。

98. 除了外射束放射治疗成就外，高剂量率钴-60 源的最新发展可能使现代高剂量率近距离疗法得以施展，因为这种源与其他源相比不太经常需要更换。这应当使放射治疗具有更好的成本效益，并使患者更能获得这种治疗。关于多模式治疗，若干高质量临床试验再次确认，在放射治疗中添加药剂能够提高多种常见癌患者的存活率。

F.3. 营养学

99. 最近，世界银行在其题为《营养学作为促进发展之核心的重新定位：大规模行动战略》的出版物中再次强调了营养学对于发展所起的核心作用¹³。营养不良的严重程度将妨碍许多国家实现“千年发展目标”这一日益增强的国际认识和有办法解决营养不良问题的越来越多的证据都突出强调了在营养学方面进行投入的重要性。在哥本哈根共识会议期间突出强调了对营养干预进行很好的经济投入来抗击营养不良的问题¹⁴。根据该共识会议，在有关控制艾滋病毒/艾滋病和疟疾等传染性疾病以及抗击营养不良的 12 项干预计划建议中已有六项实现了投资回报。

100. 核技术在制订和评价营养学干预方面的作用已得到充分认可，许多成员国目前正在从增加利用稳定同位素技术在营养学中应用方面的技术能力获得收益¹⁵。最近的趋势表明，正在越来越多地利用稳定同位素技术来解决营养学和艾滋病毒/艾滋病、婴幼儿喂养和微量营养素缺乏症等优先领域的问题。例如，利用稳定同位素技术监测体内成分（体脂肪与肌肉质量比）在营养干预期间的变化能够为优化艾滋病毒/艾滋病患者的保健、治疗和支助提供重要的信息，并就在资源贫乏环境下增加利用抗逆转录病毒治疗而言具有特别的意义。

101. 此外，若干国家还在利用稳定同位素技术估算母乳喂养婴儿的母乳摄取情况以及评定引入其他食品和流体的时间。因此，能够利用这种方法监测干预情况，以便如世卫组织所建议的那样，促进六个月完全母乳喂养，随后再引入适当的补充食品和继续进行母乳喂养。

¹³ <http://siteresources.worldbank.org/NUTRITION/Resources/281846-1131636806329/NutritionStrategy.pdf>。

¹⁴ <http://www.copenhagenconsensus.com/>。

¹⁵ 可从 GovAtom 网站《2008 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

102. 目前，还在利用稳定同位素技术制订和评价抗击微营养素缺乏症战略。例如，作为制订食品强化战略的一个重要步骤，可利用稳定同位素技术评价来自不同化合物中铁的生物利用率，并监测经过食品强化和补充维生素 A 的个体中其维生素 A 状况的变化。

G. 环境

G.1. 改进陆地环境评定的放射性核素探测

103. 现场 γ 能谱测量有多种用途，包括估算地表土壤中的放射性、评定 γ 辐射场（和因而产生的剂量率）以及定位无看管源。对于造成人工放射性核素在环境中广泛散布的核事故情况，航测是对土壤污染进行快速和大面积特定核素测定的一种重要手段。通常情况下使用基于碘化钠晶体或高纯锗晶体的探测器。前者具有耐用和探测效率高的优点，但缺点是能量分辨率低。这两种探测器日常用于相对大面积的测量，例如，利用机载或车载系统进行的测量；也例行用于在现场条件困难的情况下评定天然放射性核素的活度，例如就铀矿开采场址而言的情况。近几年，提供精确位置数据的全球定位系统的利用加之数据分析技术的发展已导致在这类测量的数据分析方面取得了显著改进。

104. 在必须确定个别放射性核素时，通常使用基于锗的探测器。近几年，高纯锗晶体生产方面的改进意味着现在能够生产更大的晶体，从而导致提高了探测效率。但是，这种探测器需要用液氮进行冷却，这仍然是在现场使用这些探测器时遇到的实际困难。

G.2. 测量结果的质量

105. 物理和化学测量（包括核分析技术）常用于为贸易货物目的对质量和适宜性进行评估。测量结果的质量需要有保证和得到证明，以便能够以其作为决策过程的一部分。有助于质量保证的因素包括适当的测量基础结构（涉及国家计量学研究单位和必要的校准标准的可得性）以及基准材料等质量控制手段的可得性¹⁶。

G.3. 核技术在海洋环境可持续性方面的应用

G.3.1. 扩大放射性分析在海产品安全方面的应用

106. 拉美鱼肉毒鱼类中毒是由摄入热带珊瑚鱼引起的，因为这类珊瑚鱼积累了有害藻类产生的毒素。这些毒素能够诱发严重的肠胃、神经和心血管疾病，放射性分析可以对这些毒素进行测量。过去，拉美鱼肉毒鱼类中毒一直限于热带岛屿社区，但随着海

¹⁶ 可在 GovAtom 网站《2008 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

产品贸易的增加以及世界范围的海产品消费和国际旅游，处于危险之中的民众遍及全球。热带地区拉美鱼肉毒鱼类中毒发病率每年介于一万例至五万例之间。目前正在法属玻利尼西亚利用放射性分析技术量化包括巨蛤和鱼在内的海洋食物中的肉毒鱼毒素，并研究这种毒素通过热带海洋食品链的迁移情况。为了解决这种日益增加的关切，原子能机构发起了一个关于利用放射性分析技术量化鱼类中肉毒鱼毒素的协调研究项目，这项工作还将通过技术合作项目向成员国提供的援助得到补充。

G.3.2. 气候变化与海洋酸化作用

107. 大气中二氧化碳的水平由于燃烧化石燃料（石油、天然气、煤炭）和砍伐森林而不断提高。若非是海洋，大气中二氧化碳的水平甚至会更高，因为海洋吸收了约三分之一这种人类产生的二氧化碳。其结果是，海洋中二氧化碳的水平也在不断增加，并且由于二氧化碳是一种酸性物质，致使海洋中的 pH 值正在不断降低。这种“海洋酸化作用”很可能对许多海洋生物特别是珊瑚虫以及牡蛎、珠蚌和贝类等壳类生物造成不利影响，而且可能影响整个海洋食物网，并对自然生物多样性和水产养殖产生影响。政府间气候变化问题小组最近突出强调了这种严重的知识空白问题¹⁷。

108. 海洋酸化作用还可能影响重金属等污染物的溶解度，并从而影响海产品的安全。诸如硼等海洋同位素已用于测定海洋中 pH 值的既往变化以及这些变化与当前人为驱动的扰动有何不同。另一种同位素钙-45 为测量珊瑚的钙化率提供了一种重要手段，珊瑚礁提供了鱼类栖息地和繁殖场所，形成了抵御风暴和侵蚀的防线，并奠定了数十亿美元旅游业的基础。原子能机构正在帮助成员国利用同位素研究和数字模型更好地了解 and 预测海洋酸化作用将如何改变海洋资源的问题。例如，正在针对预期的高二氧化碳水平和低 pH 值问题开展应用放射生态学研究，并利用钙-45 和其他同位素帮助揭示海



原子能机构摩纳哥海洋放射生态学实验室评定海洋酸化作用对商业鱼类幼体影响的新设施。

¹⁷ http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf.

洋酸化作用对鱼类幼体和贝类等重要商业生物的影响。

H. 水资源

109. 地下水提供了世界淡水需求的一半以上。这一比例在水稀缺的干旱和半干旱气候国家以及在从事大规模农业灌溉的发展中国家则高达 90%。气候变化对淡水可得性的影响日趋严峻，使得地下水越发成为一种临界资源，因而需要明智审慎地加以利用。需要进行多年的观察，以评定和管理用于地下水开发的含水层。这类资料在世界大多数地区都很缺乏。同位素数据为了解天然地下水系统开启了一个窗口，并提供了一套有关其功能的综合时空资料，从而能够有助于在没有大量时间和资源投入的情况下进行地下水评定和管理。

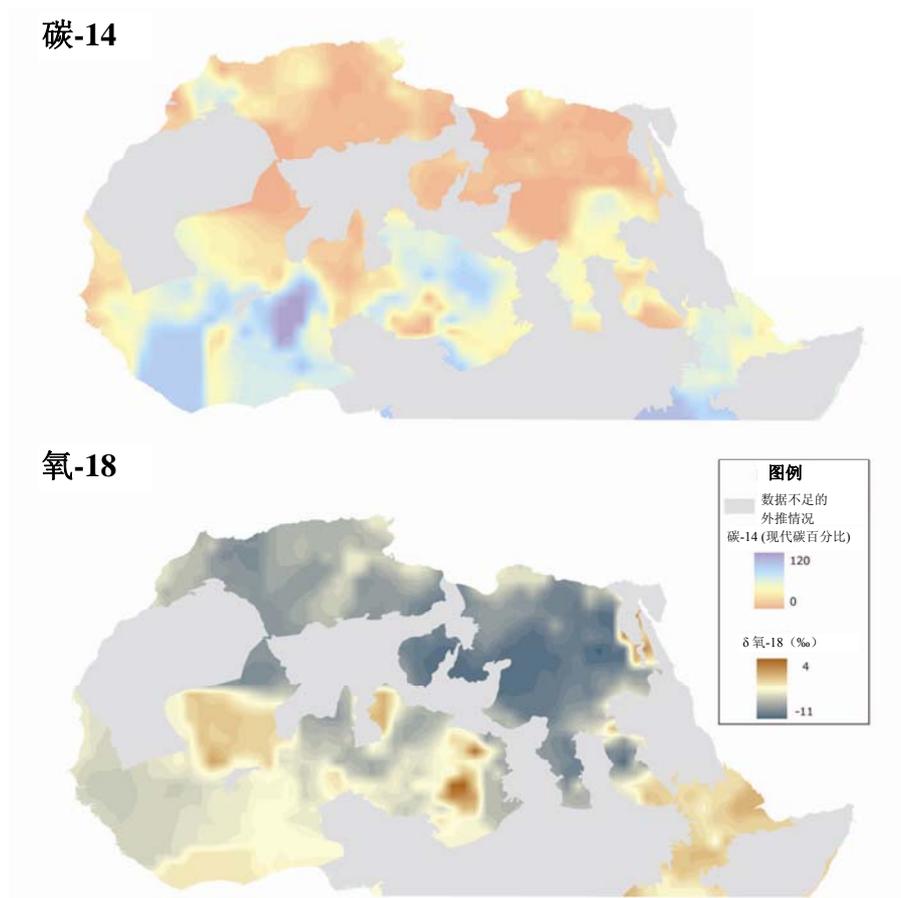


图 H-1. 来自最近出版的《国际原子能机构同位素水文学图册》所载非洲北部地下水中碳-14 和氧-18 的含量情况。低碳-14 值表示“非常古老”的地下水范围，这种地下水是在数千年前比较潮湿气候条件下补给的。

110. 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。原子能机构正在通过对过去 50 年来从成员国地下水相关技术援助中收集的同位素数据进行合成来制作一系列图册。这些地下水同位素数据大多数迄今并不容易获得。

111. 第一本图册侧重于非洲，载有从一万多个同位素样品中获得的数据。在下图中可以看出，同位素数据很容易显示出非洲北部地区年龄已超过约一万年目前不可再生的古地下水的范围。低 δ 氧-18 值（色调较暗处）表明非洲北部许多地区的补给主要发生在比现有气候条件凉爽的气候条件下。这种地下水出现在分布于埃及、阿拉伯利比亚民众国、乍得和苏丹的努比亚含水层等大型跨境含水层系统中，因此，这一含水层系统的共享管理对于该地区的人类发展至关重要。

I. 辐射技术

I.1. 放射性同位素生产

112. 在可持续医疗和工业应用方面得到充分认可的放射性同位素的可靠供应问题以及为新兴需求进行的新产品开发工作继续吸引全世界的关注。除工业界外，若干成员国国家中心也在积极从事该领域的工作。在 2006 年实施的近 2500 万至 3000 万例程序中，钨-99m 和氟-18 在诊断成像方面所占份额分别继续保持在 80%和 10%左右。就放射性核素治疗用产品而言，更易于广泛生产的镓-177 和基于从铟-90 电化学分离铟-90 的新型发生器系统的日益普及是 2007 年出现的两个值得注意的发展。2007 年的另一个重要发展是一些成员国对建立利用低浓铀靶生产钼-99 的新设施的兴趣方兴未艾。2007 年 12 月，在澳大利亚悉尼举行了一个由当前从事这种放射性同位素生产的所有利益相关者参加的会议，会议是由美国能源部国家核保安管理局和澳大利亚核科学和技术组织共同组办的。这次会议的报告确定了应加以处理的所有问题以及在不影响钼-99 供应的情况下促进低浓铀靶技术的使用所需的支助，从而减少这种放射性同位素的大规模生产对高浓铀的依赖。澳大利亚已定于在 2008 年开始使用低浓铀靶进行钼-99 的大规模常规生产。

I.2. 天然聚合物

113. 天然聚合物以多种形式存在，而且有很多能够经过辐射处理生产出有价值的产品（见图 I-1）。这类天然聚合物包括在马铃薯和玉米中的淀粉；植物和树木中的纤维素；虾、蟹和龙虾中的几丁质；海藻中的藻酸盐以及生丝、角蛋白和头发等的多肽。这些天然聚合物是非毒性和可生物降解的，而且可以低成本收获利用。辐射处理为制备基于这些天然聚合物的有附加值的新材料提供了一种清洁和无添加剂的方法。例如，几丁质制品能够用作水凝胶伤口敷料；防褥疮垫；清洁美容面膜；给药装置以及金属离子、染料、蛋白质、固体颗粒和其他物质等污染物的吸附剂。这些低分子重量产品表现出抗菌、抗氧化和促进植物生长的性能。

114. 天然聚合物的辐射处理是一个非常有前景的新兴领域，人们能够借以开发聚合物材料的独特特征，并在医学、化妆品、农业、生物技术和环境保护领域进行实际应用。

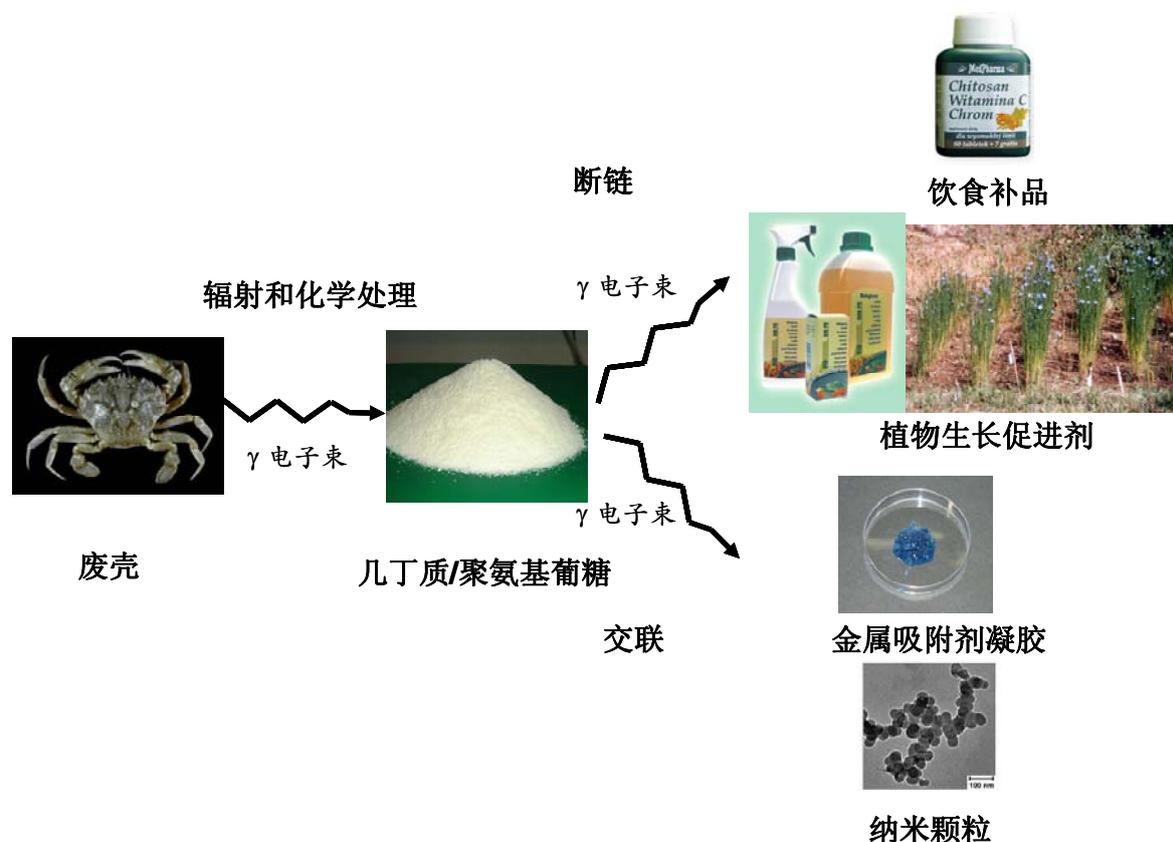


图 I-1. 天然聚合物的辐射处理。

I.3. 有害的生物污染物

115. 利用电离辐射使微生物失活是食品卫生、医疗用品和生物组织辐射灭菌以及在大规模治理下水道污泥的一种公认的技术。最近，已证明可利用辐射技术减少邮件炭疽等来自生物污染物的威胁。这些成果表明了电离辐射对于消除蓄意散布生物污染物等威胁的效用。¹⁸ 与其他方法相比，辐射技术应用的主要优势在于其有能力处理从小范围直至极大规模的各种材料，而且对靶体/靶区所需施用的剂量是唯一需要予以控制的参数。迄今所报告的成果表明，在进一步发展过程中应当解决另外一些问题，例如受污染产品的操作和处理以及现场作业培训等。

I.4. 计算机自动化放射性粒子示踪

116. 称为计算机自动化放射性粒子示踪的技术目前是公认的调查化学、石油和生物工程工业领域复杂多相流体（如气体和液体）的方法。计算机自动化放射性粒子示踪技

¹⁸ E. K. Noji 著：《生物恐怖主义：一种“新型”的全球环境健康的威胁》，《全球变化与人体健康》，2001 年第二卷第 1 期第 46 页至第 53 页。

术利用能够随着将要调查的相移动的适当密度和大小的发射少量 γ 射线的示踪剂粒子以及一些设在化学反应器周围关键位置上的 γ 辐射探测器来示踪粒子的位置，并进而可靠地示踪相的移动情况。

117. 这种示踪方法是非侵入性的，并提供感兴趣的特定相的动态特征。所获得的有关流动模式、速度、扰动等数据有助于在中试厂水平上对各种过程进行优化，并进而为作出实际工厂规模作业的最终设计决策提供证据。¹⁹ 使用流化床和鼓泡塔以及基于生物过程的制造业产品的石化工业将是使用计算机自动化放射性粒子示踪技术的主要受益行业。

118. 进一步的改进方案是利用正电子发射示踪剂进行粒子示踪。称为“正电子发射粒子示踪”的技术由于重合检测正电子湮没辐射而提供了额外的优势，导致甚至在一些工业系统通常遇到的高速流动系统中也能更准确地示踪示踪剂粒子。计算机自动化放射性粒子示踪和正电子发射粒子示踪的总体目标是确保工业流程更加高效和有效。²⁰

¹⁹ S. Bhusarapu1、M.H. Al-Dahhan 和 M.P. Dudukovic 著：《气-固上升管中固体粒子流动绘图：平均固含率和速度场》，《粉末技术》，2006 年第 163 卷第 1-2 期第 98 页至第 123 页。

²⁰ S. Bakalis、P.W. Cox、A.B. Russell、D.J. Parker 和 P.J. Fryer 著：《正电子发射粒子示踪在中试规模设备中粘性流体速度测量方面的发展和应用》，《化学工程科学》，第六卷第 6 期第 1864 页至第 1877 页。