

能源与安全

能源与环境研究所出版·美国华盛顿·一九九七年总第二期

国际民用再处理业

弗朗斯·伯克豪特

可笑的是，正当军用钚提取走向终结时，民用钚分离却在空前扩大。商业再处理远非是另一种“和平红利”，它源自几十年前树立的信念和技术承诺。几年之前，商业再处理似乎面临缓慢但注定要终结的命运，因为它成本太高又不受欢迎。但在过去几年中情况发生了变化。本文将解释民用再处理的范围和理由，并分析当前国际再处理业中正在发生的变化。

再处理的界定

现今绝大多数的动力反应堆都以浓缩铀为燃

在本期内

国际民用再处理业	1
再处理经济学	7
再处理与环境	9
美国再处理的国际影响	11
国际再处理报告	13
再处理的地点与方法	21

料。活泼的或者可裂变的铀（铀-235）在反应堆中受到辐照并裂变产生出热量。在3-5年时间里，燃料中的裂变材料逐渐耗尽。这些耗尽的或者说乏燃料通常需要代之以新料。由此，反应堆就产生高温、强辐射的乏燃料。其热能和放射性由在核能生产中产生的放射性材料衰变而成。

乏燃料从反应堆中取出之后必须安全地贮存以使其冷却。它们通常被置于水中。从长远来看，乏燃料管理有

▲ 于1994年投入运行的英国塞拉菲尔德热氧化物再处理厂（THORP）

两种可取方式：或者继续贮存乏燃料，最终可能将其作为废物处理掉（直接处理）；或者对乏燃料进行化学处理以分离出其构成成分（“封闭式循环”）。再处理就是从包含在核废料中的裂变产物和其他长衰变期放射性废物（占总重量的 3-4%）中以化学方法提取出钚（占总重量的 0.2-1%）和铀（占总重量的 95-96%）的过程。累积至今，从动力反应堆取出的所有乏燃料已有三分之一左右进行了再处理，其余的则已做长期贮存，有待进行最终处理。

再处理的理由

要叙述民用再处理的演进历程，就必须不仅了解技术和工业背景，而且要知晓推动整个再处理业发展的设想和信念。再处理核废料是典型的“重大”技术。例如，位于英国塞拉菲尔德的热氧化物再处理工厂（THORP）从筹划到运营经历 20 年。该工厂的全部资金成本约 40 亿美元。（发展）重大技术需要有有说服力的理由。当条件和观念随着时间变化时，这些理由也不得不随之改变。

（提出）民用再处理的理由大致分为三个阶段。在 60 年代至 70 年代中期的早期阶段，再处理被视为管理大多数类型乏燃料的唯一可行的选择。在快中子堆（即增殖堆）中进行钚的再循环被认为是长期增加核能的主要措施，它在能源匮乏的年代提供了能源保障。以这种方式再循环，可释放

储量更为丰富的铀-238 作为能源的潜力。铀-238 在常规反应堆中难以大量裂变。

在第二个阶段，即从 70 年代中期至 80 年代末，再处理的经济和战略意义逐渐降低。核能的增长比预期的得慢，而铀也远非匮乏，其储量被证明相对丰裕。低廉的铀价削弱了钚的经济实用性，而再处理费用的迅速上涨使钚的实际成本大大提高。同时，尽管巨额公共资金被用于研究和开发，但主要由于碰到重大技术难题，增殖反应堆的商业化依旧是遥远的梦想。在此阶段，“钚经济”的扩散危险成为严重的国际问题。自 70 年代中期以来，美国实际上一直奉行反对民用再处理的政策。因此，人们在提到再处理的理由时越来越少谈及钚作为燃料的价值，而更多地强调，再处理比另一种乏燃料处理途径，即直接贮存处理法，产生了更好的环境效益。

在当前阶段，直接贮存处理法已成为大多数国家采用的乏燃料管理方式。再处理之所以幸存下来，主要是由于七、八十年代工业和商业承诺的惯性所致。今后，这一工业很可能仅存在于一批日益减少的再处理“核心”国家：法国、英国、日本、俄罗斯，或许还有印度。尽管这一衰落趋势很明显，但人们也正在重新提出再处理在经济、安全和环境方面的益处。

民用再处理的演变

民用回收仍旧是少数核大国的保留地，他们很早就在这方面确立了商业利益，并从未放弃这种利益。目前，世界上只有 4 家主要的商业再处理工厂：法国的拉阿格和马库尔；英国的温斯凯尔/塞拉菲尔德以及俄国的车里雅宾斯克-65/奥扎斯克。迄今超过 95%的民用再处理都在这四家工厂进行。这些设施是全球性燃料管理体系的连接点。在这一体系中，核废料被从反应堆中取出送到再处理厂，而分离出的各种成分(铀、钚和核废物)一般又根据合同返回核废料原主。也有一些较小的再处理工厂在运营。第 22 页的地图标出了世界上主要的再处理工厂。

为了理解再处理的未来前景，了解该工业至今为止的发展状况很有裨益。

再处理技术以及辐照过的燃料(或乏燃料)应该加以化学处理这一想法来自核武器计划。英国温斯凯尔的和法国马库尔的再处理工厂最初都是用于生产武器用钚的。它们也一直用来处理从民用镁诺克斯动力反应堆中取出的燃料。从这些以气体为冷却剂的早期反应堆中取出的金属燃料一旦贮于水下会很快受到侵蚀。因此，在缺乏干式贮存设施的情况下，迅速再处理是这些反应堆系统在安全和环境上的要求。镁诺克斯反应堆中所有的核废料基

本上都已回收。法国、西班牙、日本和英国反应堆的关闭将使镁诺克斯核废料再处理工作于 2010 年左右结束。迄今为止，约有 40000 公吨镁诺克斯废料已被回收，其中 80%在温斯凯尔/塞拉菲尔德的 B205 厂进行的。

在更为先进的气体冷却反应堆和轻水反应堆中使用的氧化物燃料可以安全地保存一个较长的时期。因此，这类反应堆系统较不受再处理的束缚。而且，氧化物燃料的处理必须建设专门的商业再处理设施，所以氧化物燃料再处理工厂的建设一直比较缓慢。

氧化物燃料的再处理开始于美国纽约州西谷的核燃料服务设施和比利时小型的欧洲化学工厂，两者皆始于 1966 年。1969 年，Head End 工厂(HEP)在温斯凯尔开工，它为在 B205 进行的分离提供氧化物燃料。这些工厂没有一个能够运营长久。1972 年，西谷工厂由于商业原因关闭，温斯凯尔工厂在 1973 年的一次事故后停止营运，而比利时的再处理工厂也由于德国和法国合作者的退出于 1975 年宣告关闭。

在民用再处理业遭受早期挫折的同时，人们却又重新产生了对这一工业的兴趣。1973-74 年的能源危机表明，核能在能源政策中被赋予了更大的优先考虑。有人提出，从更长远来看，核能以燃用钚的快中子堆为基础，因

为现存的铀资源将满足不了预期核容量的增长。在较短的一段时间内，再处理和快堆的商业化成了许多国家能源政策的指导性目标。

英国核燃料有限公司和国有英法再处理公司 Cogema 打开了再处理核废料的希望之窗。它们实施了雄心勃勃的计划以扩大在塞拉菲尔德和拉阿格的再处理工作。这两处的工厂既服务于国内需求也服务于海外需求，在 1978 和 1979 年期间，它们与欧洲和日本的电力用户确定了有约束力的合同。这两处工厂前十年生产能力的 60% 卖给了海外用户，它们的投资构成了 UP3 和 THORP 主要的资金成本。UP3 于 1990 年开工，而 UP2-800 和 THORP 则都于 1994 年投入运营。

其它一些国家也实施了再处理计划，其中引人注目的有德国和日本。这两个国家都在 70 年代开始运营试验性的再处理工厂（德国卡尔斯鲁厄的 WAK 和日本的东海村设施），并且制定了建设主要商用处理设施的计划。德国的计划直到 1989 年才由于成本问题和政治上不受欢迎而关闭。日本再处理计划比原来设想的进展还慢，其部分原因是国际上对日本的钚计划有敌对反应。在六所村建造一商用再处理设施的工程于 1992 年开始，其设计主要依靠法国技术。

70 年代还出现了一套以苏联

为主的乏燃料分离管理机制。某种程度上作为一种不扩散措施，苏制反应堆的燃料循环受到其原子能和工业部的集中控制。从前苏联、东欧和芬兰的小型 440 系列轻水反应堆中产生的核废料通常被送往车里雅宾斯克-65/奥扎斯克进行再处理。根据政府间协议，这项核废料回收免费提供。从废料中分离出的钚属于原子能和工业部（即后来的俄罗斯原子能部）的财产。它们被贮存起来以备将来用于快堆。

当前状况

目前并存着两种民用再处理机制：欧洲—日本体制和俄罗斯体制。

欧洲—日本体制以拉阿格和塞拉菲尔德的工厂为中心，已基本形成。在塞拉菲尔德的镁诺克斯燃料再处理工厂继续以每年约 1000 公吨的速度平稳运作，而在 1998 年当 THORP 达到满负荷工作量时，法国和英国处理过的氧化物燃料的总量将达到约 2350 公吨。这三家工厂处理的燃料来自 9 个国家（包括英国和法国）正在运营的约 150 座反应堆。除了这些主要设施外，还有日本东海的一家小型工厂，其能力为每年处理约 100 公吨。

2003 年，该体系中还将增加一个设施，它是日本六所村的工厂，其年处理能力约 800 公吨。但是，在 1995 年 12 月“文殊”快中子反应堆发生事故后，日本正

在重新评估铀政策。六所工厂的投资额(1.88万亿日元或约170亿美元)正促使公用事业部门重新审视核燃料管理战略,这座工厂很可能不能完工。

欧洲—日本体制还有另外两个因素需要考虑。80年代早期快中子反应堆的失败迫使公用事业部门考虑铀处理的替代方法。尽管在常规“热”反应堆中进行再循环远非利用铀的有效办法,但比利时、法国、德国、瑞士和日本的公用事业部门已经把它作为一种能够免除铀贮存费用和困难的方法加以采用。为了能够在热反应堆中进行铀的再循环,比利时(Dessel P0, 1980年起大部分开始工作)、法国(Melox, 1995年起运作)和英国(SMP, 将于1997年运作)已经建成了混合氧化物制造厂。用户的反应堆使用混合氧化物燃料也需要批准。尽管把铀燃料引入热反应堆在技术上是可行的,但在包括德国和日本在内的一些国家,这种作法在政治上引起争议。混合氧化物制造和输入燃料时的瓶颈效应将继续成为欧洲—日本再处理体制的障碍。

2005年以后这一工业体系是否存在将取决于对再处理服务的新需求。用户对再处理已日益冷淡,而倾向于更廉价也较少出问题的燃料直接贮存处理的方式。英国(镁克诺斯燃料)、法国和日本今后可能继续需要进行再处理,其它地区则可能增加燃料贮存能力。一个显而易见的问题

是,正在迅速工业化的亚洲各经济体是否将更多地依赖核能。这可能提供对再处理的需求。

俄罗斯的再处理体系受到苏联解体的消极影响。从1990年至1994年,RT-1工厂的处理量约为每年100公吨。由于同芬兰、匈牙利和乌克兰的用户签订了合同,该厂1995年至1996年的处理量略有上升。但是,原来在车里雅宾斯克再处理铀的非俄罗斯用户,现在几乎都奉行贮存乏燃料的政策,同时,俄罗斯的反应堆经营者又无法支付他们的帐单。该工厂的未来前景似乎取决于能否吸引新的外国客户,但这种可能性并不光明。

燃料再处理概述: 1960—1995

1995年,民用再处理工厂分离了17公吨铀。其中不到8公吨用于生产混合氧化物燃料;剩下的则贮存起来。民用再处理的永久遗产之一,是大多数从核废料中提取的材料(铀和钍)已被贮存起来。迄今为止分离出的铀有差不多四分之三被贮存着。民用铀存量最大的国家是英国(49公吨)、法国(55公吨)和俄罗斯(约30公吨)。表1提供了1995年底世界铀存量的概况,当时民用再处理厂已分离出190公吨铀。

变化中的再处理情况

尽管再处理业的商业前景并不诱人,但在过去一、二年中却出现了一些事与愿违的情况,它

们改变着用户和政府再处理业
的看法。

第一个事与愿违的发展是随着乏燃料储量的扩大，许多国家的用户都遇到了一个日益突出的

表 1: 世界民用钚存量

存 量	钚总量 (公吨)
军用钚	250*
民用钚	990
废料	800
贮存中的分离钚	141
再循环的钚	49
总 量	1240

*一种较早的估计是 270 公吨(推测俄罗斯的武器用钚存量 150 公吨,而不是 130 公吨), 见《能源与安全》1996 年第 1 期。

问题。这一问题与放射性废料贮存计划的长期拖延和不确定性有关。居住在反应堆附近的公众不欢迎将反应堆所在地变成核废料的长期贮存地,是可以理解的。此外,那些把乏燃料贮存视为核工业弱点的环境组织根据这种推理认为,如果他们能够阻滞乏燃料贮存,他们就可以迫使核反应堆关闭。但是,德国和其它地方用户的反应却一直是:与再处理厂重新开始磋商是摆脱这一困境的唯一出路。

第二个变化是快堆计划被作为“分隔和嬗变”计划重新设计。分隔,指在先进的再处理厂分离出除钚和铀以外的具有长期危害的放射性物质。这些物质随后

将在反应堆或加速转换器中通过辐照而改变性质。这样就将其转变为发射期较短的物质,再作为短寿命的低放射性废物加以贮存和处理。这些计划被视为解决核废物长期掩埋问题的途径,再处理厂相信这为它们提供了大好机会。

第三个情况是核武器的拆除以及从弹头收回的钚和浓缩铀。有一种观点认为,这对再处理业构成了威胁。重新获得大量钚和铀进一步降低了对民用再处理设施分离更多钚的需求,在现已存贮了大量民用钚的情况下就更是如此。但是,对同样是混合氧化物燃料生产者的再处理厂而言,也存在两种潜在的收益。在商用反应堆中进行再循环已经成为俄罗斯处理武器用钚和铀的优先选择,而美国也在认真考虑这个问题。用混合氧化物处理计划处置军用钚和铀,通过建设商业基础设施和资助商业混合氧化物活动,将加强这一工业。武器用钚混合氧化物计划还具有“化剑为犁”的优点,因而使这一活动合法化。

结 论

全球的民用再处理工业自 60 年代中期以来业已形成。现在这一工业体系为全世界约三分之一的反应堆提供着燃料管理方面的服务。今后再处理业作为一种燃料管理方式的重要性可能下降。但是,这一工业的振兴能力却不

应被低估，尽管在过去 20 年里它发展的主要理由和经济可能性已受到削弱。这是一个供给占支配地位而不是需求引导的工业。再处理业的前景取决于人们能否就乏燃料处理的一个主要替代方案，即临时贮存后直接处理，达成政治协议。

新书介绍

《1996 年铀和高浓缩铀 ——存量、能力和政策》

作者：戴维·莱特
 弗朗斯·伯克豪特
 威廉·沃克
出版社：斯德哥尔摩国际和平研究所及
 牛津大学出版社
1997 年出版

该卷是此书 1993 版的修订版，它就
可裂变材料问题提供广泛、可靠的信息。

再 处 理 经 济 学

弗朗斯·伯克豪特

再处理—废物处理方式与临时贮存—直接处理方式的相对经济利益在过去十年中一直是诸多争论的焦点。人们已运用了许多方法对它们进行评估，从某种程度而言，评估采用的方法决定评估的结果。近期最为突出的工作是由经济合作与发展组织核能署(1994)¹和德国 Energiewirtschaftlichen 研究所(EWI)(1995)²进行的全面系统研究。这两个研究都不是最终结论，因为它们总有些不确定性和民族特殊性，然而，它们代表着目前各种可能的观点。

这些研究通过建立模式，以铀的热再循环为基础，计算出再处理—再循环系统的燃料循环总成本，并把它与直接处理的开放式燃料循环的总成本进行比较。这些研究结果涉及的范围很广，但

有一点是一致的，就是在当前经济条件下，再处理—再循环方式代价更高。其区别仅在于这两个成本的差距有多大。表 2 显示了最近两项研究的结果，它们在估计两种铀处理方式的成本差距问题上各执一端。这两项研究是：Cogema 公司在近期报告中对经合与发展组织 1994 年研究进行的解释以及 1993 年 VDEW 公司的研究。经合与发展组织的数据似乎表明两种铀处理方式的相对成本只存在很小的差距，而 VDEW 的研究却指出，就德国的条件而言，再处理—再循环方式的成本是贮存—直接处理方式的 2 倍。双方主要的分歧在于对再处理和废物管理成本的估算以及它们如何评估回收铀和铀再循环的得失。EWI 的研究表明，两种铀处理方式的

成本差距约为 25%。

施。

某些更加有限的评估已使用“免费钚”这一概念。按照此概

从铀、浓缩和燃料制造的目前和预期价格来推测，混合氧化物

表 2: 再处理-再循环方式与贮存-直接处理方式之成本比较: 只计算成本(未计折扣, mills/kwh)⁴

	经合组织/Cogema (1994年)		VDEW (1993年)*	
	封闭式	开放式	封闭式	开放式
燃料运输	0.20*	0.20	0.38	0.12
燃料贮存	-	0.62	-	1.06
再处理	2.40	-	4.16	-
乏燃料包装	-	1.0	-	1.86 ^②
废物贮存包装	-	-	2.32	0.46
废物处理	0.22	0.38	2.32	2.32
小计	2.82	2.20	9.14	5.92
铀的赢余 ^①	-0.36	-	+0.46	-
钚的赢余 ^③	-0.14	-	+1.62	-
小计	-0.50	-	+2.08	-
总计	2.32	2.20	11.26	5.92

* 此表中数字转换成为 \$/公吨燃料, 需乘以 356.4

- ① 假设一个反应堆的效率为 0.33, 燃料的辐照为 45 GWd/t
- ② 假设燃料制造工厂每年的总处理量为 450 tHM
- ③ 负投入意味着成本节省, 因此正值表示有回收产品

念, 再处理中分离钚的费用是打折扣的³。由于许多用户把再处理视为其通过与再处理厂签订合同而承担的吃亏费用, 这种安排与它们目前遇到的现实更加接近。这也解释了 VDEW 研究报告中钚的再循环为负值的原因。在“钚免费”的情况下, 混合氧化物经济学就是这样一个问题, 它把撤销新购买铀矿、撤销铀浓缩所得的收益与制造钚燃料所付出的额外费用相平衡。生产混合氧化物比生产低浓缩铀燃料更昂贵, 因为处理钚需要额外的安全防范措

料将更加昂贵。即使假设新的大型混合氧化物制造工厂 (Hanau, Melox) 全面投产, 混合氧化物燃料的成本也约为低浓铀燃料的两倍。如果再处理费用全部归算到混合氧化物燃料的成本中去 (铀的赢余打折), 那么混合氧化物的成本将是低浓铀燃料的六倍之多⁵。钚必将被视为一种负担, 而不是财富。即使铀资源丰富, 人们也不可能从事这种活动, 因为它的巨额报偿都为钚的热再循环所消耗。所有矿藏都具有潜在价值, 但人类只开发那些在经济上值得开发的矿藏。

¹ 经济合作与开发组织能源署, 《钚燃料循环的经济》, 巴黎, 1994年。

² I. Hensing 和 W. Schultz, 《核燃料循环方式的经济比较》, Energiewirtschaftliien 研究所, 科隆, 1995年。

³ 经济合作与开发组织能源署, 《钚燃料: 评估》, 巴黎, 1989年。

⁴ Cogema, 《再处理-再循环: 工业冒险》, 在

Konrad-Adenauer-Stiftung 的发言, 波恩, 1995 年 5 月 9 日。

³ 集中投放到核反应堆中去的低浓缩铀燃料成本在 1000—1500 美元/公斤铀之间。典型的混合氧化物燃料制造和运输费用约为每公斤混合

氧化物 2000—3000 美元。1 公斤混合氧化物含有的钚同 4 公斤低浓缩铀乏燃料分离出的钚同样多。欧洲的再处理价格目前定在 1000 美元/公斤 HM, 因此, 1 公斤混合氧化物的再处理费用约为 4000 美元。

再 处 理 与 环 境

弗 朗 斯 · 伯 克 豪 特

出于环境考虑再处理的利弊始于 70 年代。当时, 再处理的战略理由已开始受到质疑。鉴于再处理工厂(气体和液体的)放射性泄漏的糟糕记录, 再处理的环境效用已成为一个很难持久的论点。在这里, 我们仅就贮存一直接处理方式和再处理—废物处理方式的环境效益进行一般的考察。以下是两个主要观点:

- 再处理中产生的废物量将更少
- 再处理中产生的废物的毒性低于核废料的毒性

更少的废物量

欧洲的再处理公司已投巨资以减少再处理中产生的低等与中等放射性物的总量, 在过去的 15 年中这类废物的总量减少了三成¹。但是, 即使现在处理和包装的再处理中产生的废物的总量有约 20 立方米

/tHM, 而处理和包装的核废料量约为 2 立方米/tHM²。尽管再处理过程中玻璃化的高放射性废物量少于乏燃料量, 但是中等放射性废物也必须贮存于仓库, 这就大大增加了再处理中贮存废物的总量。Cogema 和 BNFL 公司已宣布今后将进一步减少废物的总量。然而, 其统计数字仍忽视低等放射性废物, 而这些废物却占管理和处置再处理中产生的废物的全部费用的近一半。

较少的废物量会带来什么好处呢? 它们显然减少了贮存和运输的成本, 但贮存安全方面的好处是不明显的。仓库的设计和运营状况主要由其贮存废物的散热量决定。尽管由于玻璃化的高放射性废物因不含有钚而相对减少了热量, 但这不会影响废物贮存或仓储的设计。而且, 使用后的

¹ Cogema, 《再处理—再循环: 工业冒险》, 演讲, 波恩, 1995 年 5 月。

² G. 凯斯乐: 《钚的直接处理与多重循环》, 提交给德国 PSK/日本 NSC 会议的论文, 东京, 1992 年 11 月。

混合氧化物燃料产生的锕系元素产生的衰退热能也高于乏铀燃料。

低毒性

再处理工厂经常使用一种通用辐射指数来论证从高放射性废物中排除铯会极大地提高仓储的长期安全性。然而，对各种仓库设计和地理环境的安全评估表明，原则上，核废料是可以安全地处理，就如同玻璃化的高活性再处理废物一样。例如，德国的仓储观认为，核废料和玻璃化的高放射性废物可以存放在同一座仓库里。就裂变和锕系产物而言，乏燃料至少是一个象玻璃一样好的基质，对陶形废物形式的新研究表明，这或许是更好的方法³。

仓库安全评估表明，长期安全取决于放射性的流动。对铯流动性的研究表明，在绝大多数条件下，铯的放射性不会流动到离仓库太远的地方。剔除铯并不会因此而大大提高长期安全性，其长期的安全性更主要取决于诸如铈-237，钨-99 和碘-129 之类核素的广泛存在。它们在乏燃料和再处理废物中的数量相同。

³ W. Lutze 和 E. C. Ewing 编，《未来的放射性废物形式》，North Holland, 阿姆斯特丹，1988 年。

《能源与安全》

《能源与安全》是一份报导核不扩散、裁军和能源可持续性的时事通讯刊物，由能源与环境研究所 (IEER) 一年发行 4 次。该刊物文章仅代表作者个人观点，不一定反映 IEER 的主张。

IEER 地址: 6935 Laurel Avenue, Takoma
Park, MD 20912, USA
电 话: (301) 270-5500
传 真: (301) 270-3029
INTERNET: ieer@ieer.org
万维网地址: <http://www.ieer.org>

能源与环境研究所就广泛的问题向公众和决策者提供有见地的、明确的和稳妥的科学和技术研究报告。该研究所旨在向公共政策事务提出科学的意见，以促进科学的民主化和更健康的环境。

能源与环境研究所成员:

所长: 阿琼·麦克贾尼
执行主任: 伯恩德·弗兰克
图书馆员: 洛伊丝·查墨斯
工程师: 马克·菲奥兰凡特
高级科学家: 凯文·格尼
簿记员: 戴安娜·科恩
项目科学家: 安妮·麦克贾尼
对外协调员: 帕特·奥特梅尔
全球协调员: 妮塔·塞斯
行政助理: 贝特西·瑟洛-希尔兹

感谢我们的支持者

我们衷心感谢我们的资助者，是他们的慷慨资助使我们能够进行自己的“核材料危险”全球计划。我们的资助者是 W. Alton Jones Foundation, John D. and Catherine T. MacArthur Foundation 和 C. S. Fund.

我们还要感谢我们的基层技术支持计划的资助者，该计划为我们的全球工作提供了广泛的帮助。该计划的资助者是 Public Welfare Foundation, John Merck Fund, Ploughshares Fund, Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock, Rockefeller Financial Service, Stewart R. Mott Charitable Trust 和 Town Creek Foundation.

本刊物英文版的设计由华盛顿特区的 Cutting Edge 图象公司承担。照片取自电力反应堆和核燃料开发公司和美国能源部布赖恩·史密斯。

美国进行再处理的国际影响

莉迪亚·波波娃

1995 年秋，俄罗斯的环境保护界得知，美国国防核设施安全委员会主席约翰·康韦致信能源部长黑兹尔·奥利里，支持把再处理作为乏燃料管理的一种方法。

1996 年 2 月，美国萨瓦纳河再处理厂重新启动。俄罗斯环境保护界认为，这进一

无论美国还是俄罗斯都不应该支持再处理，即使只是为了向其它国家发出一种信号，也应如此。

步证实美国政府有重新考虑在吉米·卡特时期所采纳的再处理政策的意图。美国的这一举措使俄罗斯原子能和工业部拍手庆幸，而环境保护者和关心核武器扩散的人士却大失所望。

美国人加速再处理在俄罗斯引起巨大的担忧和疑虑，因为这一举动对俄罗斯原子能和工业部中支持再处理的那些人是一种鼓励。原子能和工业部的官员用许多值得怀疑的论点来为俄罗斯的再处理计划辩护。他们声称，再处理是乏燃料管理的最佳办法，这一论点并不正确，因为再处理现所依据的是过时的普雷克斯技术会产生大量难以处理的液体放

射性废物。众所周知，人们可以找到替代再处理的方法，而且许多国家已决定对此进行探索。

原子能和工业部还声称，再处理在经济上合算，因为它回收铀，这种燃料能供给包括新型增殖反应堆在内的反应堆使用。但目前，用浓缩铀作反应堆的燃料要便宜和安全得多。而且，自冷战结束以来，铀有富余，如有必要，这些铀可以作为燃料使用。铀之富余非常之多，以致于俄罗斯把其中一部分出口到美国。

俄罗斯的一座再处理厂 RT-2 如果没有外国投资就不可能恢复建设。该工厂始建于 80 年代初，后由于公众反对和资金困难而停工。原子能和工业部的官员希望通过提供优惠条件来吸引顾客到 RT-2 进行再处理。但即使有这些条件，德国和瑞典已经决定不把它们反应堆中的乏燃料送来处理，也不投资 RT-2 的建设。

增殖技术太昂贵，而且尚未被证明安全。如果工业界正确地遵守环境和健康标准，再处理会更昂贵。另外，再处理中分离出的铀为其同位素铀-232 和铀-236 所毒化，限制了它再利用的潜力。这使封闭式核燃料循环这一概念

相当脆弱。分离钚引起的环境、健康和扩散问题超过了它经济利益所带来的合理性。

70年代中期，美国政府主要因为不扩散考虑放弃了商业再处理。现在能源部说，出于环境原因，它将进行有限的再处理，但是这些乏燃料不会来自商业或军用反应堆。由于这一主张首先在布什总统时期提出，又在克林顿任期内得到继续，看来它并非出于政治原因。

在真正的市场经济下，再处理没有竞争力。然而，不仅市场经济刚刚起步的俄罗斯在推动再处理，而且美国，这个经常被视为市场经济典范的国家，也正试图这样做。由于没有促进再处理的任何合理的技术和经济原因，这两个国家进行再处理的原动力显然来自继承了相同冷战思维的专家们。那些在俄罗斯的托姆斯克、克拉诺雅斯克和车里雅宾斯克寻求工作和政治支持的人所依赖的技术既不必要而且危险，这一技术同样支撑着美国政府在南卡罗来纳州的工作。

我们两个国家都承担着冷战遗留下来的环境和健康方面的负担。我们相信，如果我们的科学家共同努力，他们能够找到真正安全和有利于环境的技术来处理乏燃料。如果我们国家的政治家们真想帮助他们的人民，就应把

资金和资源直接用于这方面努力，而不是用在普雷克斯过程。

核专家们声称，对各种仅有很薄包层、给安全贮存带来问题的乏燃料，现在技术上还没有可以取代再处理的可行方案。原子能和工业部的官员和专家们把萨瓦纳河再处理厂的重新启用视为他们这一观点的佐证。我们相信，凭美国和俄罗斯核工程师们的聪明才智足可以研制出替代再处理、稳定乏燃料的方法。使用这种方法，产生的废物更少，费用更低，不会造成不必要和危险的对裂变材料的贮存。

人类追求不扩散机制的代价，以物力、财力和智力来衡量是很昂贵的。即便《核不扩散条约》也不能担保其它国家不会加入五个核大国的行列。再处理，一种分离钚使之用于武器制造的技术，是试图发展核武器的国家的不变追求。

无论美国还是俄罗斯都不应该支持再处理，即便只是为了向那些寻求我们技术帮助的国家传递一个信号，也应如此。我们的政府会愿意看到其它国家效仿它们进行再处理吗？

* 莉迪亚·波波娃是莫斯科社会学-生态学联合会核生态和能源政策研究中心主任。

国际再处理报告

法国

迈库尔·舒耐德

马休·潘凡乔

在法国，铀分离的开始是二战后发展起来的核武器研究计划的一部分。1956-1958年间，在马考场地建造了三座铀生产堆。1958年在马库尔完工的 UP1¹是第一家全面进行再处理的工厂。Cogema 隶属于 1976 年成立的原子能委员会，其技术和设施来自武器计划。Cogema 通过与军方和法国电力部门——法国电力部的合同实施法国的再处理计划。Cogema 在拉阿格有两座大型再处理厂，UP2 和 UP3，它们的产量约占 1995 年全世界分离铀总量中的 80%。每座再处理厂每年的设计产量为 800 公吨重金属，相当于年产约 8000 公斤分离铀。UP2 厂于 1966 年开始工作，起先再处理镁诺克斯燃料。它的设计产量开始时经常变化，最终被定为每年 400 吨。1976 以后，一个新的装置使该厂能再处理轻水反应堆的氧化燃料。经过重大修建和扩容，自 1994 年起，该厂以 UP2-800 名义投入使用，这一名字表明该厂每年新的设计产量。1990 年，UP3 投入

使用。

过去 20 年里，法国铀工业的发展一直依赖与国外客户的重要合同。在拉阿格处理的轻水反应堆乏燃料有一半以上来自外国。至 1990 年，UP2 处理的都是外国废料，而那以后则完全处理法国燃料（唯一的例外是，一批为示范目的处理的德国混合氧化物燃料）。UP3 由外国客户投资，因此直至 2000 年左右都将只再处理外国废料。1977 和 1978 年，7 个国家的 30 家外国客户资助了 UP3 的建设，作为回报，它们获得了相当于 UP3 运行头 10 年计划能力的合同。目前，Cogema 为德国、日本、比利时、荷兰和瑞士的电力公司提供核燃料服务。Cogema 工程方面的子公司 SGN 正用拉阿格厂的设计为日本六所村再处理厂的建设提供专有技术。

尽管法国长久以来宣布的政策是要再处理所有从反应堆中卸下的废料，但法国做不到这一点。拉阿格再处理厂目前的再处理能力完全为法国电力部和外国客户所占满。Cogema 现在每年能处理 850 公吨乏燃料，而法国反应堆中每年卸下的乏燃料达 1200 公吨。未能再处理的乏燃料将被贮存起来。1996 年，法国电力部第一次表明，它不再试图达到再处理所有乏燃料的目标。目前，

¹ UP 是法文“usine de plutonium”的缩写，意为“铀工厂”。

该部门进行着一场有关法国未来乏燃料管理战略的激烈争论。1992年，法国电力部已经悄悄决定，“鉴于钚未来用途不确定，不再考虑再处理获得的钚价值。”²

而且，由于混合氧化物的成本相对于铀燃料较高，法国电力部还改变了对使用混合氧化物的看法。法国电力部将不得不扩展其混合氧化物计划，并为另外12座反应堆寻求混合氧化物许可证。目前，16座反应堆已登记使用混合氧化物燃料，其中9座到1996年底已填装了该燃料。根据在巴黎的世界能源情报所所获信息，工业部最近要求法国电力部使用混合氧化物燃料反应堆的数量在明年达到10座。法国现有的钚储量已经很大，在今后的几年里它还将增大，因为混合氧化物的产量有限，而钚产量又不随之下降。据官方统计，法国各种形式未经辐照的钚的储量到1995年12月达55300公斤，其中25700公斤属于外国所有³。这样，法国在乏燃料和分离钚贮存两个问题上情况都越来越糟。

迈库尔·舒耐德作为科学记者和顾问，其作品广泛涉及核与能源问题的许多方面。他是设在巴黎的世界能源情报所的创建人之一，也是该所的主任。

² 法国电力部，1994年年度报告，巴黎，1995年。由作者翻译成英文。

³ 工业部，《核能源中110个问题》，勒查克·迈迪编，1996年10月。

马休·潘凡乔是世界能源情报所的副研究员，特别致力于放射性废物和钚工业管理的研究。他是世界能源情报所许多出版物的作者之一。

英 国

弗朗斯·伯克豪特

英国仅次于法国，是世界上动力反应堆乏燃料的第二大处理国。这一活动的地点在英格兰西北的温斯凯尔/塞拉菲尔德¹。民用再处理始于1964年的温斯凯尔，预计在2010年之前还将继续。下表是塞拉菲尔德历年分离钚的情况。

热堆燃料再处理

自1964年以来，镁诺克斯动力堆燃料一直在英格兰西北温斯凯尔/塞拉菲尔德的B205工厂接受再处理。该厂在英国镁诺克斯反应堆计划中扮演重要角色，同时又为日本和意大利镁诺克斯反应堆的燃料提供服务。所有镁诺克斯燃料被定期运到塞拉菲尔德。到1995年底，已有约26,800公吨燃料在B205厂进行处理，从中分离了约59公吨钚。预计镁诺克斯燃料的再处理将一直进行到2015年，届时英国最后一家镁诺克斯反应堆已关闭约5年。到那时，B205厂分离的钚将达近90公吨。

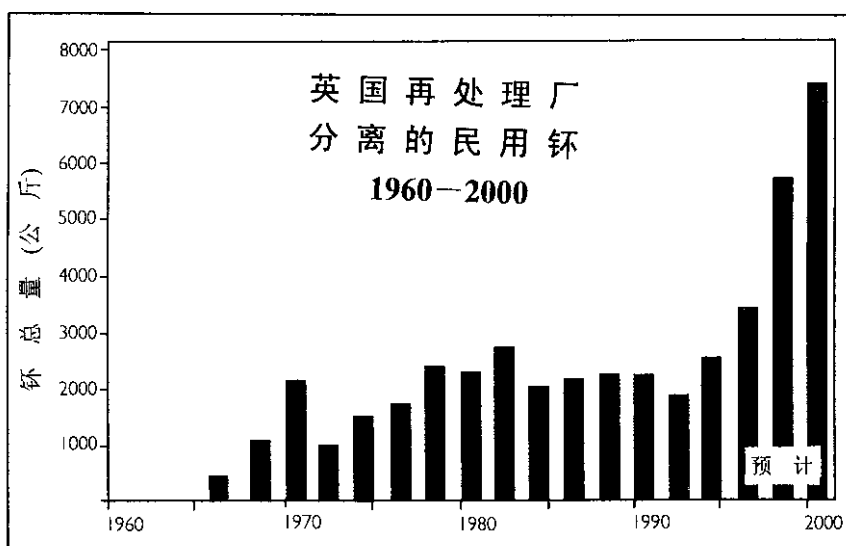
¹ 处理民用活动的设施的名称在80年代初由温斯凯尔改为塞拉菲尔德。

氧化燃料再处理厂始于 1969 年的温斯凯尔，那时一家小型 HEP 厂开始运行。该厂为 B205 厂提供氧化燃料。在 1973 年 B204 厂由于事故永久关闭以前总共已有 110 公吨燃料经 HEP/B205 厂处理，约 400 公斤铀被分离。

随着 1994 年热氧化再处理工厂(每年能处理 700 公吨燃料)的运行，开始了大规模氧化燃料的再处理。THORP 头 10 年生产约有 70% 用来处理外国燃料。处理 6600 公吨燃料的“基本订货”和“期权”合同将于 2005 年到期。2005 年以后到期的合同较不确定。英国能源公司这一英国用户的合同，要求处理约 2600 公吨燃料，此外，德国客户 1990 签订的合同要求处理 700 公吨燃料。这些合同将保证 2010 年以前 THORP 工厂的生产。

快堆燃料再处理

自 1958 年 7 月以来，快堆和



材料试验反应堆燃料一直在苏格兰北方的当里进行再处理。英国原子能局运营两家设施：一座是再处理材料试验反应堆燃料的 D1204；另一座是再处理快堆燃料的 D1206。D1204 是一座小型设施，它处理来自英国和非英国研究反应堆的燃料。D1206 于 1961 年开始运行，处理来自示范快堆 (DFD, 1979 年关闭) 的高浓铀和来自样品快堆 (PFR, 1994 年关闭) 的混合氧化物燃料。这两座设施都在当里。到 1995 年底，当里已再处理了约 21 公吨样品快堆燃料，获得约 4.5 公吨铀。由于没有再处理材料试验堆燃料的新合同，预计 D1206 工厂将在 1997-98 年关闭。

弗朗斯·伯克豪特是英国苏塞克斯大学科学政策研究项目的高级研究员。他是该研究项目环境与技术课题组的负责人。过去，伯克豪特曾在普林斯顿大学能源与环境研究中心工作，是将出版的《1996 年铀和高浓铀：世界存量，能力和政策》的作者之一(另两位作者是戴维·莱特和威

廉·沃克)。该书由牛津大学出版社和斯德哥尔摩国际和平研究所出版。

日 本

高木仁三郎

日本的核燃料循环政策

是再处理所有乏燃料并把所有的分离钚用作反应堆燃料。基于这一政策，国有动力堆和核燃料开发公司于1977年建造并启动了东海的再处理工厂。日本的用户还与Cogema和英国核燃料有限公司签订合同，以便在拉阿格和塞拉菲尔德的工厂再处理约7000公吨乏燃料。此外，日本核燃料有限公司目前正在青森县的六所村建造一商用工厂。按照官方计划，这一工厂将在2000年中期投入商业运行。

然而，日本的实际情况表明这一被试图用来构建核工业基础的政策大大偏离现实。根据官方统计，从轻水反应堆中卸下乏燃料的积累量至1994财年结束时（1995年3月31日）为10400公吨，而目前的拆卸率为每年1000公吨。东海厂以试验厂能力运行，至1995财年底已再处理总数达864公吨的乏燃料。

考虑到东海厂有限的的能力以及日本的政策——不再与海外再处理工厂签订合同，日本不可能再处理其积累起来的所有乏燃料。即使六所村厂按计划在本世纪中期开始全面商业运营，该厂800公吨的再处理能力和3000公吨重金属的贮存量使其只能处理掉每年新增乏燃料和积累燃料中的一小部分。

而且，六所村厂成本估算的不断上涨使它的建造前景非常不确定。日本核燃料有限公司对建造

成本的最新估计是18800亿日元（约170亿美元），其中包括液态高放射性废物玻璃化设施——比欧洲同类设施成本高7倍。预计在1997年，乏燃料贮存池完工之后建设工作很有可能被推迟。

从钚的需求来看，中央政府和用户面临严重的钚过剩问题。日本雄心勃勃的钚计划已经受到技术、经济和政治方面的责难。“晓丸”号把1.5公吨钚从法国运到日本唤起了国际和国内对安全问题的强烈关注。1995年，日本用户迫使政府因经济原因放弃以混合氧化物为燃料的Ohma高级热反应堆方案。1995年12月8日“文殊”快增殖堆的钠泄漏事件给日本政府的钚计划以沉重打击。自此，日本整个快增殖堆计划被推迟，这一推迟也许是无限期的。

为了维护所承诺的“无（钚）贮存政策”，日本政府计划把大多数在欧洲分离的钚用作轻水反应堆的混合氧化物燃料。但是，由于地方政府的反对，这一混合氧化物使用计划也可能被推迟。这样，到本世纪末，日本现有在欧洲（到1994年底）的8.7公吨分离钚余量将增加至20-25公吨。

日本再处理政策正面临严重的矛盾。一方面，日本面临的是乏燃料再处理能力不足；另一方面，它又深受钚过剩日益增多之害。以再处理为基础的核燃料循环政策正受到越来越多的非议，逐渐失去其合理性。摆脱这一困

境的唯一办法是彻底反思再处理政策，以防止过剩分离铀的进一步积累。

高木仁三郎是东京原子力资料情报室的执行主任。

俄罗斯

阿纳托利·迪亚科夫

俄罗斯从民用核反应堆中再处理乏燃料始于 1977 年，当时马亚克的 RT-1 综合体投入运行。该厂再处理的乏燃料来自 VVER-440 和 BN-600 民用动力堆、海军破冰船和潜艇的动力反应堆、以及研究反应堆。这一工厂的装机容量为每年处理 400 公吨乏燃料。再处理分离出的铀是 RBMK-1000 反应堆的燃料(浓缩度为 2.4%)。氧化物形态的分离铀被贮存起来，这一储量目前已超过 30 公吨。

再处理产生的绝大部分液态低、中等放射性废物未经处理就被送入贮存罐、贮存池和贮存地。高放射性废物贮存在罐里。马亚克综合体内的高放射性废物总数达 389 百万居里，它们自生产和商用反应堆燃料的再处理。现在它们以溶液形态(11200 立方米，258 百万居里)和浆体形态(18650 立方米，131 百万居里)贮存。

随着 EP-500 高炉投入使用，俄于 1991 年 2 月开始玻璃化液态高放射性废物。该高炉每小时能

处理 500 升高放射性废物，并产出磷酸玻璃。尽管设计寿命只有 3 年，这一高炉至今仍在使用，但它的产量已显著下降。在其运行过程中，已玻璃化 280 百万居里高放射性废物。目前，相同设计的另两座高炉正在建设中，如果资金到位，其中之一可望在一年内完工。

具有每小时处理 100 升溶液设计能力的“冷”锅炉¹的建设即将完成。这一设施将生产光学玻璃。人们相信，随着这一新设施投入使用，玻璃化含有大量硅、钼、铁、硫磺和其它元素的高放射性废物将成为可能。这种废物无法在 EP-500 高炉中玻璃化，并因此被累积在金属罐中。

1995 年，大约有 200 吨乏燃料在 RT-1 设施中被再处理，而 1996 年该数目为 150 吨。这一工厂与国内和国外核能工厂都有再处理合同。这些乏燃料供应者中，有两座芬兰的 VVER-400 反应堆(每年约 25 吨)，四座匈牙利反应堆(每年约 50 吨)，卡尔斯克核电站和新沃罗涅日核电站的反应堆。一些来自乌克兰的乏燃料也在这里进行再处理。

最近，该厂和芬兰核电厂发生争议。由于燃料和电力价格上升，马亚克要求把再处理的合同价格提至每公斤铀 800 美元。根

¹ 一种高炉，内部有一层固体玻璃把冷却的坩埚壁与玻璃溶液分离。

据非官方资料，当前的价格是每公斤约 400-500 美元。芬兰方面不同意合同价格的上涨，并在 1996 年底中断了再处理。对外合同遇到的另一个困境是俄罗斯的新法律。根据该法律，分离和玻璃化了的放射性废物必须送回乏燃料生产之国，而芬兰拒绝俄罗斯所坚持的送回核废料。与匈牙利的合同也遇到相似情况，匈牙利也不愿意运回废物。

俄一度计划将 VVER-1000 反应堆产生的乏燃料送到热烈兹诺戈尔斯克(以前称为克拉斯诺亚尔斯克-26)的 RT-2 厂进行再处理。然而，该厂的建设只处于初级阶段，而且近年由于经济原因已停业。依赖国内经济资源是不现实的，但在国外对再处理乏燃料持消极态度的情况下，试图吸引外资也不可能。鉴于这些情况，马亚克正研究在 RT-1 再处理 VVER-1000 反应堆乏燃料的可能性。然而，这仍需要大量投资来建造用以准备 VVER-1000 乏燃料的设施。

阿纳托利·迪亚科夫是莫斯科物理和技术学院的物理教授。1990 年，他与弗兰克·冯·希波教授合作，在莫斯科物理和技术学院建立军备控制、能源与环境研究中心。迪亚科夫博士目前的工作包括研究俄罗斯武器级钚处理的政策，增加透明度和核军备裁减的不可逆性。

印 度

弗朗斯·伯克豪特
苏兰加·加德卡

印度长期奉行的政策是，在快堆中进行钚的再循环的同时，发展封闭式燃料循环。它执行的这一政策基于动力堆计划，而该计划的基础又是以天然铀为燃料的 CANDU 反应堆。印度计划的长期目标是能利用印度丰富的钚-232 储量进行核电生产¹。正如 1982 年报告中强调的，“印度早就认识到反应堆体系必须能最大限度地利用有限的铀资源，不论反应堆系统性质多么优良，如果仅靠铀，印度电力生产的潜力不会很美好。”²

现今，印度原子能部运营着三家再处理厂，总设计处理能力约为 230 公吨，它们都未参加安全保障。座落于特朗贝巴巴原子研究中心(BARC)的第一座再处理工厂于 1964 年开始运作。它已为 Cirrus 和德鲁瓦研究堆燃料进行再处理。由于受到过度侵蚀，它于 1973 年停止使用，经整修后于 1982 年再次投入使用。据估计，这座小型的 BARC 设施已分离出约 400 公斤钚，报导说这些钚被用于印度的核武器计划³。1974 年在拉

¹ 经辐照，钚-232 可转变为可裂变的铀-233，既能在热堆也能在快堆中使用。钚尚未在商业层次的任何核反应堆中使用，因为与其使用有关的重大技术和经济问题还有待解决。

² N. B. Prasad 委员会关于拉贾斯坦邦核电站的报告(1982 年)。

³ 见戴维·莱特、弗朗斯·伯克豪特和威廉·沃克：《1996 年钚和高浓铀：世界存量，能力和政策》，牛津大学出版社和斯德哥尔摩国际和

贾斯坦邦爆炸的和平核装置中所用的铀就是在 BARC 中进行再处理的。

第二座用于再处理 CANDU 动力堆燃料的再处理厂是“动力堆燃料再处理设施”

(PREFRE)，

它于 1982 年

在特拉帕投入运行。PREFRE 的设计能力为每年处理 100 公吨燃料。然而，该厂的生产却受到后勤和技术问题的限制。而且，印度寻求不建立铀贮存。1995 年，附属于特拉帕厂的废物固定工厂发生放射性物质的严重泄漏。在公众的高度关注下，这一情况被揭露出来：由于“资金短缺”，这家废料固定工厂的设备堆放露天而受到侵蚀。

目前为止，拉贾斯坦邦核电站和马德拉斯核电站这两处的燃料在 PREFRE 进行再处理。要估算 PREFRE 所再处理的燃料的数量极端困难，因为印度官方不公开有关资料。因此，这一估算只能基于对拉贾斯坦邦核电站和马德拉斯核电站运行方式的假设以及对有多少燃料可能被运送到特拉帕的假设之上。

据估计，来自这两座反应堆的

印度原子能部运营着三家再处理厂，总设计处理能力约为 230 公吨，它们都未参加安全保障。

冷却乏燃料至多已有 310 公吨经过再处理，到 1995 年底最多产生 900 公斤铀。考虑到卡尔帕卡姆快增殖试验反应堆需求铀的数量，一种更现实的估算指出，到 1995 年底，PREFRE 已分离出了 300-400 公斤铀。

1996 年 3 月，马德拉斯附近英迪拉·甘地原子研究中心的卡尔帕卡姆再处理工厂开始进行冷处理（实际上在没有乏燃料的情况下运行）。投入燃料的“热”运行计划在 1996 年底开始。该处原计划至 2000 年达到 1000 吨再处理能力，但是这些计划目前被搁置¹。当前，这一设施被设计用来处理马德拉斯核反应堆中的燃料，并具有每年处理 100 公吨 CANDU 燃料的设计能力，年产铀 350 公斤。

苏兰加·加德卡是 Anumukti 的编辑。这一刊物致力于印度的非核化。加德卡工作于甘地研究所 Vedchhi 分所——总革命研究所。Vedchhi 是古吉拉特邦的一个小部族村。

美 国

布莱恩·考斯特纳

在二战至冷战期间，美国分离了约 100 公吨铀。铀分离，或再处理，主要在华盛顿州的汉福德

¹ P. K. Iyengar: 《核能：政策和前景》，P. M. S. 琼斯编，（约翰·威利父子出版社）1987，第 283 页。

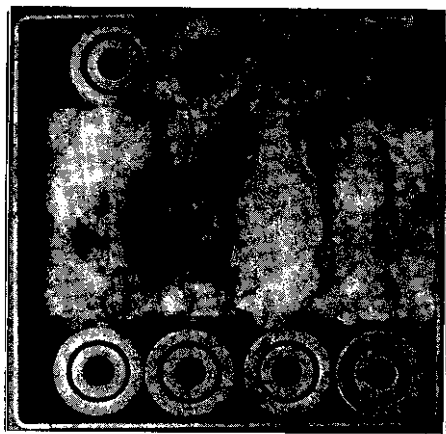
处理厂和南卡罗来纳州的萨瓦纳河厂进行。此外再处理在较小的国家实验室，特别是新墨西哥的洛斯阿拉莫斯进行。在爱荷华国家工程实验室，再处理被用于从海军反应堆燃料的裂变产品中分离高浓铀。

所有这些设施都归联邦政府所有。美国唯一一个私人再处理设施在纽约西谷。该工厂在 1972 年关闭，它分离出的钚转归联邦政府，同时这一设施的清理责任也为纽约州和联邦政府共同承担。按照能源部的估计，稳定、贮存和监测美国 50 年来由再处理所产生的所有放射性废物和环境污染，将使纳税人要为每生产出的 1 吨钚花费 10 亿美元。

里根总统的能源部长约翰·赫林顿公开宣称，即使在冷战结束以前美国已有钚剩余。一旦冷战真的结束并且签署裁军协议，布什总统的能源部长詹姆斯·华金斯海军上将则宣布再处理将停止。然而，除了汉福德厂在 1996 年初关闭最后一家再处理工厂以外，该停产命令受到政治阻碍。主要出于保证就业的考虑，萨瓦纳河处理厂和爱达荷国家工程实验室的在处理项目事实上得到了增强势力，而不是按时安全歇业。

萨瓦纳河场地有两座再处理厂，它们使用的是有几十年历史的普雷克斯技术。这些建于 50 年代的巨大混凝土建筑曾预计在本世纪末关闭。这一期限基于完全再处理冷战时期遗留下来的各种现场放射性燃料和其它核物质所必需的时间，出于安全方面的考虑，这一期限被拖延至 2002 年。此外，萨瓦纳河厂管理者和当地社团官员拟议，通过把能源部的其它设施(有可能的话还包括商业反应堆)的废料运到萨瓦纳河厂再处理而使其运营期延长 30 年。

在爱达荷国家工程实验室，冷战时期运营的再处理厂已被作为备用方案，预计不会重新启用。然而，一座新型、较小型的再处理厂已提上日程，这座再处理厂采用现在还未商业化的新技术。这一技术通常被称为热处理或电解提纯，是作为美国增殖反应堆计划的一部分发展起来的，而这一增殖反应堆计划却因为在不扩散、技术和经济方面的担忧而在 1995 年被取消。然而，这一计划的再处理部分被保留下来，并被重新取名为废物管理机构。对不扩散支持者来说，这特别麻烦，因为这一新的再处理厂是在一个比老式再处理厂小得多的地



▲受侵蚀的标靶插片
反应堆拆卸地，萨瓦纳河厂址

点建造，作为一种废物管理技术它的设计特点也许没有得到充分保护。

明年是美国再处理业命运攸关的一年，因为是否继续按计划关闭再处理厂和是否扩大它们的作用将在这年作出关键性决定。在目前的讨论中，两种相反的论点占支配地位。与美国长期以来政策相一致的观点认为，由于军事上不再需要分离钚，所以应该

关闭剩余的再处理厂，并运用更好的技术管理乏燃料和其它核材料。相反观点的人指出，联邦政府目前和将来乏燃料管理是扩大美国再处理的一大理由。他们希望这一方法最终会与核能工业的复兴联系起来。

布莱恩·考斯特纳是南卡罗来纳州哥伦比亚市能源研究基金会的主任。

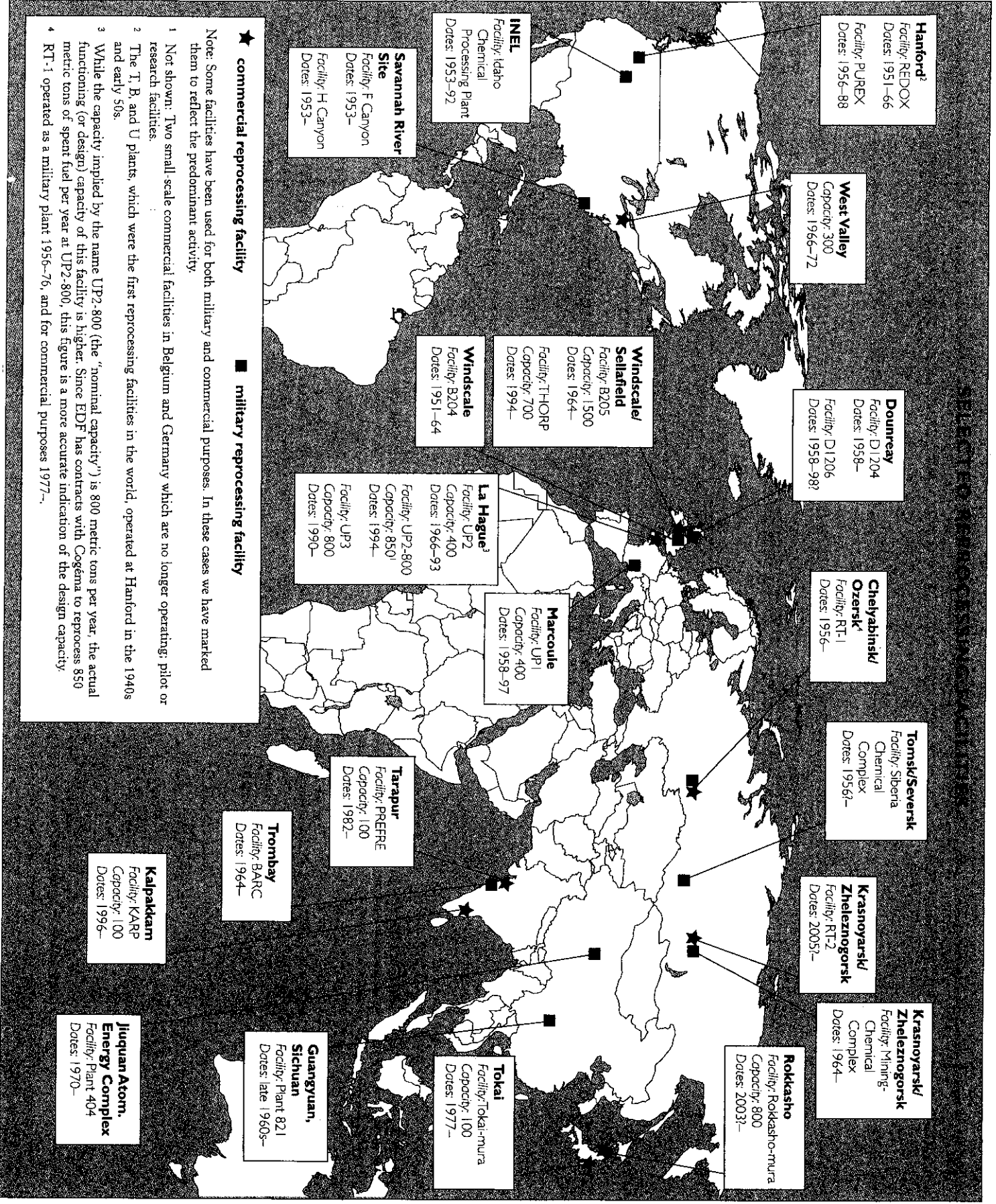
再处理的地点和方法

由于钚必须从辐照过的燃料中分离出来才能用于核武器，因此再处理通常被视为连结民用和核武器生产的关键环节。在过去的三十年里，核工业已广泛参与“商业”再处理，徒劳地希望钚能用作经济能源资源（有关钚作为能源资源的情况请参阅上期《能源与安全》）。下一页上的地图标出了主要商业和军用再处理厂的位置，也指出了商业工厂的设计能力。军用和商业再处理使用的基本上是相同的钚分离过程，它们采用的分离过程取决于乏燃料的类型。

在反应堆里，燃料棒里的铀-238 吸收中子进行核反应之后转变为钚-239。逐渐地，一些钚-239

再吸收中子变为非裂变的钚-240。由于反应堆持续运行，更多的铀-238 转变为钚-239，会导致钚-240 更高的钚同位素，特别是钚-241 和钚-242 需要更长的辐照时间。

民用反应堆中的乏燃料是典型的“高损耗”乏燃料——这就是说，其在反应堆中进行了超长时间的辐照，以产生出大量能量。来自轻水反应堆（最常用的民用反应堆）的乏燃料一般包含大约 0.7% 钚-239 和钚-241（裂变同位素）以及 0.2% 非裂变的钚同位素。用于分离武器用钚的辐照铀是“低损耗”燃料，它辐照产生的钚-240 和其它人们不想要的高价



Hanford¹
 Facility: REDOX
 Dates: 1951-66
 Facility: PUREX
 Dates: 1956-88

West Valley
 Capacity: 300
 Dates: 1966-72

Dounreay
 Facility: D1204
 Dates: 1958-
 Facility: D1206
 Dates: 1958-98?

**Chelyabinsk/
 Ozersk¹**
 Facility: RT-1
 Dates: 1956-

Tomsk/Seversk
 Facility: Siberia
 Chemical
 Complex
 Dates: 1956i-

**Krasnoyarsk/
 Zheleznogorsk**
 Facility: RT-2
 Dates: 2005?-

**Krasnoyarsk/
 Zheleznogorsk**
 Facility: Mining-
 Chemical
 Complex
 Dates: 1964-

Rokkasho
 Facility: Rokkasho-mura
 Capacity: 800
 Dates: 2003?-

INEL
 Facility: Idaho
 Chemical
 Processing Plant
 Dates: 1953-92

**Windscale/
 Sellafield**
 Facility: B205
 Capacity: 1500
 Dates: 1964-
 Facility: THORP
 Capacity: 700
 Dates: 1994-

La Hague²
 Facility: UP2
 Capacity: 400
 Dates: 1966-93
 Facility: UP2-800
 Capacity: 850³
 Dates: 1994-
 Facility: UP3
 Capacity: 800
 Dates: 1990-

Maroule
 Facility: UP1
 Capacity: 400
 Dates: 1958-97

Tarapur
 Facility: PRERRE
 Capacity: 100
 Dates: 1982-

Trombay
 Facility: BARC
 Dates: 1964-

Kalpakkam
 Facility: KARP
 Capacity: 100
 Dates: 1996-

Tokai
 Facility: Tokai-mura
 Capacity: 100
 Dates: 1977-

**Guangyuan,
 Sichuan**
 Facility: Plant 821
 Dates: late 1960s-

**Jinquan Atom.
 Energy Complex**
 Facility: Plant 404
 Dates: 1970-

★ **commercial reprocessing facility** ■ **military reprocessing facility**

Note: Some facilities have been used for both military and commercial purposes. In these cases we have marked them to reflect the predominant activity.

- 1 Not shown: Two small scale commercial facilities in Belgium and Germany which are no longer operating; pilot or research facilities.
- 2 The T, B, and U plants, which were the first reprocessing facilities in the world, operated at Hanford in the 1940s and early 50s.
- 3 While the capacity implied by the name UP2-800 (the "nominal capacity") is 800 metric tons per year, the actual functioning (or design) capacity of this facility is higher. Since EDF has contracts with Cogéma to reprocess 850 metric tons of spent fuel per year at UP2-800, this figure is a more accurate indication of the design capacity.
- 4 RT-1 operated as a military plant 1956-76, and for commercial purposes 1977-.

钚同位素为最少。军用反应堆中的乏燃料只占钚的一小部分，几乎全是钚-239。钚-240 少于 6-7% 的钚被称为“武器级”，但用高燃耗商业反应堆燃料产生的钚制

目前运行的所有再处理设施采用的都是普雷克斯过程。其它再处理技术过去使用过，包括卜泰斯克过程。雷道克斯(减少氧化)过程和用于制造第一颗原子弹的原

THE PUREX PROCESS

造原子弹也是可能的。

乏燃料中的钚只有经过再处理分离才能使用。最常见的再处理方式称为“普雷克斯”过程，它代表了钚—铀分离(参见图表)。

始的过程。美国还正在研制新的再处理方式，通常称为“热处理”，这是采用电解方式把乏燃料分化为三的方法(参阅第 13 页)。