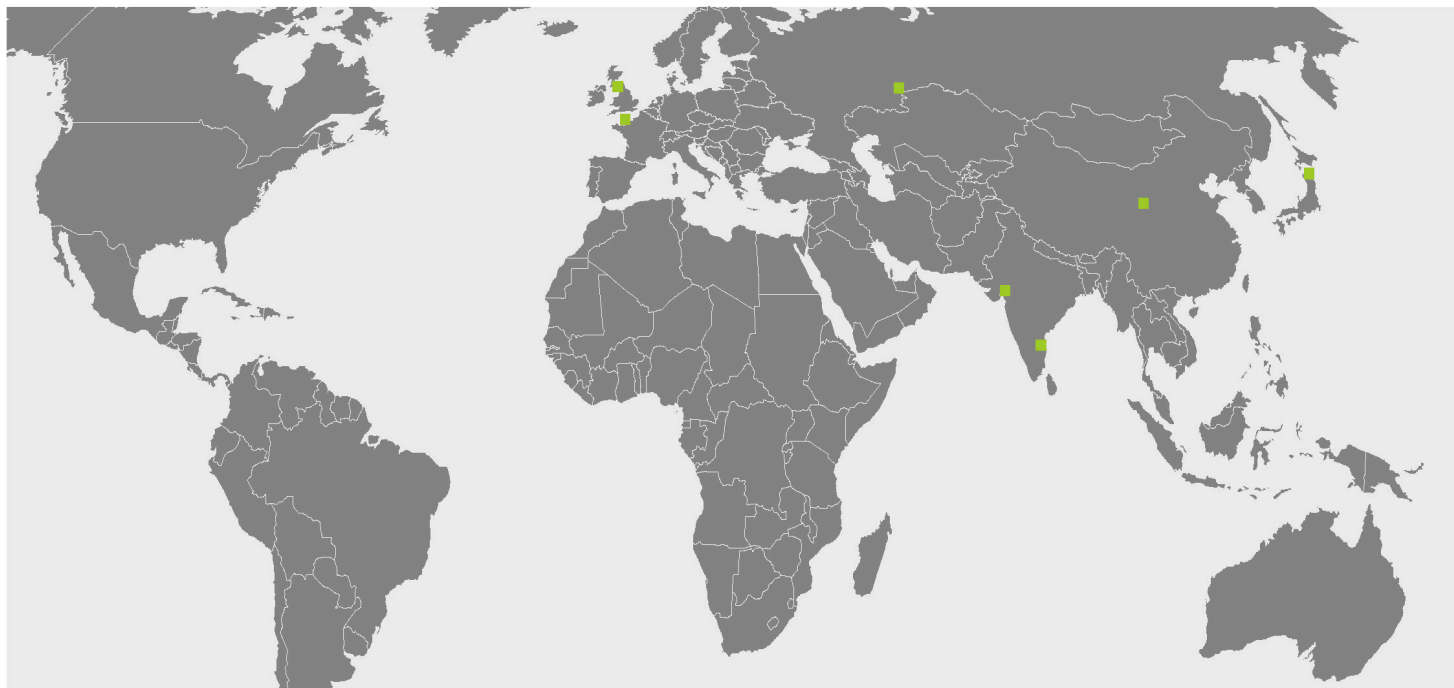




IPFM

国际易裂变
材料专家组

核电项目中的钚分离

世界各地民用后处理的现状、问题及展望

国际易裂变材料专家组

2015 年 6 月

目 录

关于 IPFM	1
执行摘要	2
引言	4
后处理技术	5
钚增殖堆	6
轻水堆燃料	8
嬗变	10
后处理对国际安全的影响	11
后处理现状	12
制度的力量	15
撰稿人	17

关于 IPFM

国际易裂变材料专家组 (IPFM) 成立于 2006 年 1 月。它是一个由来自于 18 个核武器和非核武器国家的军控与防扩散专家组成的独立小组。

IPFM 的任务在于为切实可行的政策倡议建立技术基础，以确保、巩固和减少高浓铀和钚的库存。这些易裂变材料是核武器的关键材料，控制易裂变材料对核裁军、防止核扩散及确保恐怖分子无法获得核武器至关重要。

军用和民用易裂变材料库存问题都得解决。核武器国家在他们的武器和海军燃料库存中，仍然有足够制造数以万计核武器的易裂变材料。在民用易裂变材料方面，已经分离的钚也足以制造同等数量的武器；有 100 多个场址的民用反应堆用高浓铀作燃料，这部分高浓铀的总量也足以制造数百枚投放到广岛类型的原子弹，这可能是恐怖组织有能力做到的。

该小组的由普林斯顿大学的 Alexander Glaser 和 Zia Mian 以及日本长崎大学的 Tatsujiro Suzuki 共同担任主席，29 名成员包括来自巴西、加拿大、中国、法国、德国、印度、伊朗、日本、韩国、墨西哥、荷兰、挪威、巴基斯坦、俄罗斯、南非、瑞典、英国和美国的核能专家。IPFM 网页:www.fissilematerials.org 可查到 IPFM 成员的简要介绍。

IPFM 的研究和报告与国际组织、各国政府和非政府团体共享，报告可通过 IPFM 网页及 IPFM 博客获得:www.fissilematerials.org/blog。

普林斯顿大学的科学和全球安全项目为 IPFM 提供管理与研究支持。

IPFM 获得芝加哥 John D.和 Catherine T.麦克阿瑟基金会及纽约卡内基基金会提供给普林斯大学的经费支持。

执行摘要

钚是美国在第二次世界大战期间首次分离出来的。把铀装入核反应堆，经过辐照、冷却后，在另一个设施里通过化学“后处理”回收钚。反应堆与后处理厂是作为秘密的原子弹计划中的一部分建造的。从那时开始，其他 8 个国家也为制造核武器生产并分离了钚。

自 20 世纪 60 年代起，一些核武器国家与几个非核武器国家开始从动力堆产生的乏燃料中将钚分离出来做民用。美国于 1972 年停止民用后处理计划，随着冷战的结束，《不扩散核武器条约》(NPT) 成员国的核武器国家终止了军用后处理活动。现今只有少数几个国家还有活跃的民用后处理计划：中国、法国、印度、日本、俄罗斯和英国。

这份报告既着眼于这些计划的历史、现状和前景，也着眼于后处理在德国的兴衰以及韩国对于启动此计划的热情。文末还有 3 个技术章节，主要评估：后处理在管理乏燃料上的作用，后处理和使用钚的经济性，后处理厂的放射性风险。

民用后处理的最初目的是为计划中的“增殖”反应堆提供启动燃料，这种反应堆产生的钚比消耗掉的还多，能更有效率地使用铀。在整个 20 世纪 60 年代，由于担心核电将受限于获得低成本铀，美国原子能委员会推广钚增殖堆方案，以消除这种忧虑，当时希望在 20 世纪 90 年代开始大规模建造增殖堆。

1974 年，已掌握后处理技术的印度，表面上开展增殖堆计划，实际上利用美国提供的重水在反应堆中产生的钚，进行了一次“和平的”核爆炸。美国政府意识到民用后处理会促使核武器扩散，因此改变了对增殖堆的立场，最终的结论认为，增殖堆是没有必要的且不具有经济效益。

法国、德国、日本、俄罗斯和英国于 20 世纪 80 年代和 90 年代间在“示范”增殖堆上的经验证实了这个判断，确认这些反应堆要比传统反应堆更为昂贵且不太可靠，大部分增殖堆运行时间都很短。只有印度和俄罗斯还在执行示范增殖堆计划。然而，法国、日本和英国一直在开展后处理活动，中国建造的后处理中试厂曾在 2010 年短暂运行。

与此同时，更多低成本的铀被发现，全球核电装机容量在 1986 年切尔诺贝利核事故后也趋于稳定。由于铀燃料只占新建核电厂发电成本的 2%，即便增殖堆能更有效利用铀，它们依旧缺乏经济诱因。

法国提议使用钚作为传统水冷动力堆的补充燃料。目前由钚、铀氧化物的混

合物制成的燃料（混合氧化物或 MOX 燃料）约占法国所有核电反应堆机组所使用核燃料的 10% 左右。法国政府在 2000 年的审查中发现，MOX 燃料的生产，包括从乏燃料中提取钚的后处理，其成本是使用低浓铀燃料的 5 倍。

法国曾一度通过向其他国家（尤其是德国和日本）销售后处理服务来补偿价格高昂的钚燃料。英国还为国外客户建造了一个后处理厂，但是几乎没有客户续约。因此英国希望现有的合约一到期，就结束他们的后处理计划，时间大约在 2018 年。法国暂时仍将继续进行后处理，但是属于国有的法国电力集团（EDF）不断要求降低成本，这也使得负责运行法国后处理厂的国有阿海珐（AREVA）公司的财政前景更加黯淡。

日本是现今唯一进行后处理的非核武器国家。日本在六个所村建造了一个大规模后处理厂，其运行因为各种技术问题而延迟了 20 年。该计划已变得十分昂贵，如果投入运行，预计在未来 40 年将增加日本纳税人约 1000 亿美元的电费负担。日本政府坚持必须继续执行该计划，因为一些核电厂的水池无法容纳更多的乏燃料，并且认为核电厂所在的县不会允许在场址干法罐式贮存，而此贮存方法已成为美国和许多其他国家在核电厂补充贮存的标准做法。因此六个所村后处理厂被视为是乏燃料的唯一去处。（日本新建的后处理厂位于青森县，该县有巨大的尚未使用的干法贮存设施，但青森县表示后处理厂运行之前不会允许使用该设施。）目前未进行后处理的韩国也提出类似观点，表示与美国核能合作的新协议中需要就后处理事项谈判，但是与 20 世纪 80 年代的美日协议不同，新的美韩协议中不包括美国“事先同意”后处理。

近几十年来，出现了一个进行后处理的新理由：认为后处理将有助于乏燃料管理。此观点指出乏燃料中的钚和其他超铀元素应裂变成大多为半衰期较短的放射性同位素，以降低乏燃料的长期危害。据此提出的反应堆是过去昂贵且不可靠的钠冷反应堆修改型，这些钠冷反应堆先前用作钚增殖，因为它们会有效裂变所有这些同位素，不像水冷反应堆仅裂变某些同位素。然而法国和日本的放射性废物专家与美国国家科学院的综合性研究，均质疑这种持续后处理的观点。一项针对瑞典提出的乏燃料处置库的风险评估指出，假设处置库于掩埋后 10 万年发生泄漏，地表的放射性剂量中钚不是占主要的元素，因为超铀元素相对不溶于深层地下水，这是由于深层地下水的含氧量在经过与周围岩石的化学反应后已经耗尽。

事实上，后处理会增加而非降低来自乏燃料的放射性风险，因为后处理过程

中放射性会持续释放到环境中，而且巨大的乏燃料贮存池或后处理产生的液体高放废物贮存槽一旦发生事故或遭受攻击，后处理厂将可能灾难性释放放射性。后处理还留下两种昂贵且危险的遗留物：被放射性物质污染的后处理设施，以及稳定增加的民用分离钚的全球库存，估计这些钚足以制造超过 30000 枚核弹。

由于这些后处理的问题受到更广泛的重视，进行后处理的国家正稳步减少，目前为 6 个，这个趋势很可能还会持续。后处理所面临问题的严重程度并没有像保证的那样迅速降低，因为根深蒂固的官僚阻力仍寻求维持国家对分离钚的承诺，通常还包括增殖堆。然而正如本报告对后处理的全球概况所显示的，世界正接近结束分离钚以及相关的安保、经济、环境与环境的危险。

引言

后处理，就是从辐照后的铀燃料里分离钚，最初是由美国作为二战核武器计划的一部分而发展的。这些钚一部分用于 1945 年 7 月 16 日在美国新墨西哥州的试爆，另外一些则用于 1945 年 8 月 9 日在日本长崎爆炸的原子弹。前苏联紧随其后，这两个国家建立了庞大的钚生产设施，以支持“冷战”时期核武器累积。英国、法国和中国也这样做了，但规模要小得多。

所有 5 个最初的核武器国家最终也建造了对核电厂乏燃料进行民用后处理的工厂，以获得钚，来提供给预期中的新一代钠冷“增殖”反应堆作为启动燃料，从而产生比消耗掉的还要多的钚。后来以色列、印度、巴基斯坦和朝鲜 4 个国家也陆续获得核武器，并建造后处理厂以分离武器用钚，印度则建造后处理厂以支持增殖堆开发计划。在那些从未拥有自己核武器的国家中，比利时、德国、意大利和日本也建造后处理厂，以支持增殖堆计划。后来，它们和其他一些国家选择将它们的乏燃料运送到法国、俄罗斯和英国，在海外进行后处理。

增殖堆被证明不如这一代水冷反应堆有竞争力，正如超音速客机被证明不如当今亚音速宽体喷气式飞机有竞争力。因此多年以来，比利时、德国、意大利和美国关闭了它们的后处理厂，英国也计划关闭。但是如同下面讨论的，法国、印度、日本和俄罗斯仍出于各种原因进行民用后处理，韩国也一直在寻求这样做的权利。目前中国对于后处理的态度则很暧昧。

一般而言，民用后处理的最初理由是世界上低成本铀很快就要用完了。这确实是一个问题，因为这一代反应堆是以铀-235 为主要燃料，而铀-235 在天然铀中只占 0.7%。钚增殖堆的优点是利用存量较丰富的铀-238（占天然铀的 99.3%），

经过转化成为链式反应同位素钚-239，由此从一千克天然铀中获取的能量可增加约百倍。

有一项密切相关但在概念上不同的观点认为：由现有核反应堆卸下的乏燃料中包含的钚，因为可能用作燃料而很有价值。因此，这种观点认为乏燃料应该后处理并提取钚。例如印度原子能委员会前主席认为，不应将乏燃料作为废物，而是“当成可提取钚的资源”。同样地，20 世纪 70 年代关于核反应堆的标准指南认为：“对轻水堆和快增殖堆来说，乏燃料当中的铀和钚均是宝贵资源”。此种想法通常没有考虑过提取和使用钚的成本是否会超过其效益。

引言部分以简要解释后处理技术作为开始，接着探讨为何从经济角度考虑不支持增殖堆。这就是为什么虽然 20 世纪 70 年代和更早预测将会有数百座及其后数千座增殖堆，但最后只建造几个实验性的和“示范”增殖堆。接下来讨论从轻水堆乏燃料中分离出的钚的使用，这也是法国和日本在增殖堆商业化计划失败后采取的措施，发现这样做的经济性也不好。相对较新的观点指出，采用后处理来管理放射性废物有必要这一看法是错误的，因为为管理放射性废物而进行后处理的收益很小甚至是负的。最后简要概述仍在实施后处理的国家产业和政策现状。

后处理技术

在核反应堆中辐照过的燃料包括：未裂变的铀、裂变产物、铀-238 吸收中子产生的钚以及例如镅和锔的其他超铀元素。辐照后的燃料由于高放射性会产生大量的热，因此先贮存在核电厂的水池中冷却。

在进行后处理的国家中，乏燃料运到后处理厂。在接收池再贮存一段时间之后，大多数情况下燃料棒被切割，包含钚和裂变产物的铀氧化物“主要内容物”，溶解在热（约 100℃）硝酸中。包壳的大部分留下来而未发生反应，作为高放废物单独处置。切割和溶解过程都释放放射性气体。

从硝酸溶液中提取钚和铀的现行标准方法称为钚铀萃取回收法（PUREX）。PUREX 工艺分离混合物是基于在两种不同不混溶液体中的相对可溶性，即含水酸溶液和有机溶液。有机溶液是煤油稀释的磷酸三丁酯（TBP）。当两种溶液混合在一起，溶解在水相的钚和铀会转移到有机相，而裂变产物和其他元素仍留在水相。如果混合溶液接着静置沉淀，两相将会分离。将混合和沉淀的过程重复数次，以确保从酸性溶液中萃取大部分的铀和钚。含裂变产物的溶液是放射性废物（见图 1）。

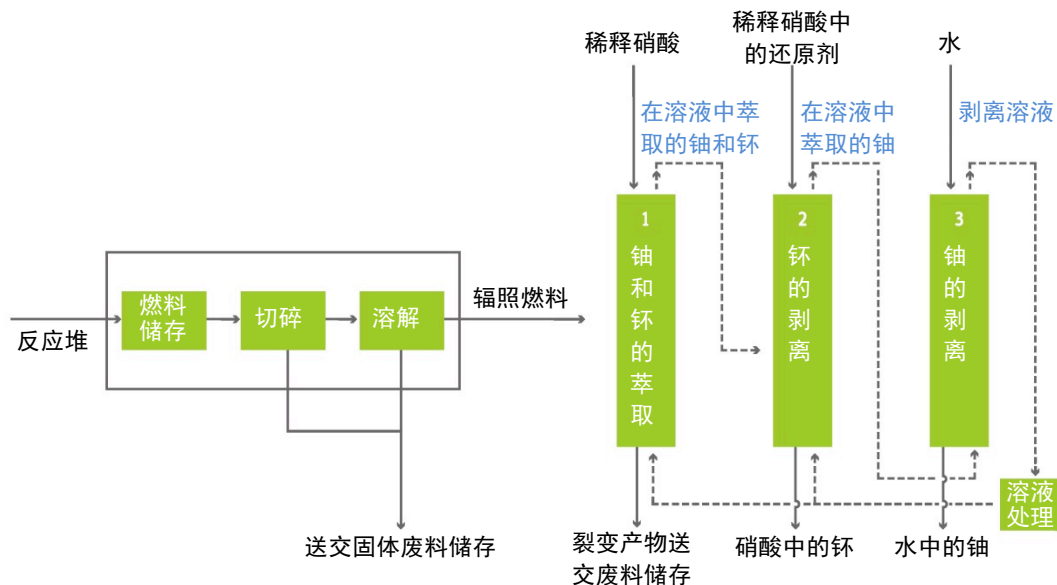


图 1 基本后处理厂的关键步骤

运用目前的 PUREX 技术, 将乏燃料切成小块并溶解在热硝酸中。在有机溶液中萃取铀, 再使用搅拌机和脉冲柱与硝酸混合, 然后利用离心萃取机分离。

钚增殖堆

第一座核电厂于 1960 年前后建成时，对于核电未来的发展期待很高，而那时已知的低成本铀资源极为有限。美国原子能机构（当时世界的领导者）提出的解决方案，就是建造钚增殖堆。这些反应堆的最终燃料是同位素铀-238，其在天然铀中的含量是链式反应同位素铀-235 的 140 倍，而后者的裂变是当前反应堆的主要能量来源。美国和印度还曾探讨另一个解决方案，就是用增殖堆将在地壳中含量是铀的 3 倍的钍转换为人工链式反应铀同位素铀-233。

一些主要发达国家的顶尖科学家和工程师也提倡发展增殖堆。英国物理学家 Franz Simon 1953 年写道：

“如果我们不得不仅依赖已探明的高品位矿藏中的[铀-235]可用数量，那么就不可能大规模生产电力……。较大规模电力生产的真正希望在于通过‘增殖’利用铀-238 或钍的可能性。虽然目前不是绝对可行，不过可能性很大。”

在前苏联，物理学家 Aleksandr Ilich Leipunskii 提出了类似的观点，并协助启动该国的钚增殖堆计划，现在俄罗斯仍在执行该计划。

1975 年，国际原子能机构（IAEA）分析家特别警告指出：“价格在低于 30

美元/磅 U_3O_8 [2014 年美元币值约 270 美元/千克铀] 的目前已知和估计的资源总量将会在 2000 年前后用尽。”20 世纪 60 年代和 70 年代建造后处理厂的基本理由，在于需要第一代反应堆乏燃料中的钚，作为第一批增殖堆的燃料。

事后看来，铀的成本将会飙升的看法很明显是错误的。事实上即使是在 20 世纪 70 年代后期，至少有一个顶尖的资源地质学家 Kenneth Deffeyes 就主张，如果开采较低品位的矿石，“矿石品位每降低 10 倍，可回收铀的数量约可增加 300 倍。”

几十年以来，考虑到目前的使用率，IAEA 对于铀的供给量越来越乐观。他们与国际经合组织 (OECD) 的核能署于 2014 年共同发表有关全球铀资源的“红皮书”指出：“如果按照反应堆目前使用铀的消耗率来推算，确定的资源基础就足够供给反应堆 150 年以上，整个传统资源基础的开采会增加至 300 年以上。”

IAEA 红皮书系列引用的估算是完整的国家估算。大多数国家没有将高于每千克 130 美元的铀回收费用估算进来。

最近资源环境工程师 Gavin Mudd 在对全球铀资源的全面评估中得出一个更有力的结论：“有很好的案例说明已探明的铀资源充足，不论是目前报道的官方矿产资源，或更多的推断铀资源，都足以满足核电可预见的未来。”

Mudd 考虑的核能未来的范围，包括国际原子能机构要求至 2100 年之前投产约 2000GW 核电的情况，这较 2015 年大致增长 5 倍，是作为限制大气中二氧化碳浓度低于 450 ppm 的策略之一，以减少灾难性气候变化的可能性。

还有一项指标可以说明世界上低成本铀尚未用尽的就是铀价。经过一般通货膨胀的修正，铀价由于短期供需不平衡，曾经上下波动，但是长期趋势来看铀价并没有持续上升（见图 2）。以长期约 100 美元/千克平均成本计算，铀在美国的新型轻水堆的发电成本中仅约占 2%。核电大部分成本来自核反应堆的总投资成本。迄今为止，所有为了降低钠冷增殖堆的总投资成本以达到可与水冷反应堆相提并论的努力均告失败。

建成的增殖堆经验也表明，多数反应堆一直都有可靠性问题，主要是因为作为冷却剂的熔化钠接触空气或水都会燃烧。这些可靠性问题导致增殖堆的运行时间更少，这反过来又进一步增加了每度电的资金费用。因此，虽然增殖堆要商业化已有 40 年，没有一个国家这样做，也仅仅只建造了几个示范堆。自 1995 年以来，只有俄罗斯和印度已建成或正在建造新的示范性增殖堆。

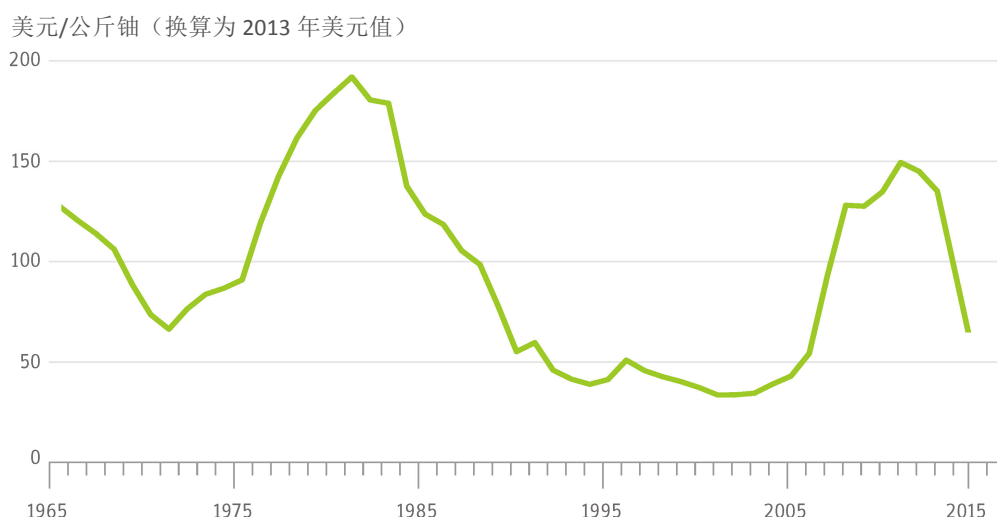


图 2 美国核电公司 1965-2013 年支付的平均铀价格

2014 年的点是现货市场价格，用以指示市场方向。在这里和本报告其他地方，用美国国内生产总值（GDP）的通膨指数，将早年的美元数转换成 2013 年美元币值。美元以外的币种，先转换为美元，然后用 GDP 平减指数将数额转换为现今的美元。

大规模运行增殖堆计划的失败，使法国、日本和英国发展大型后处理厂的最初理由不复存在。

轻水堆燃料

然而，法国和日本用他们分离的民用钚与贫化铀混合，将混合氧化物燃料（MOX）用于水冷反应堆。MOX 燃料里链式反应钚-239 和钚-241 取代了低浓铀（LEU）里数量相近的铀-235。

但是，钚-239 和钚-241 的核特性与铀-235 不相同，在设计为使用低浓铀燃料的反应堆中使用 MOX 燃料会产生安全问题。主要担心钚-239 裂变时释放的缓发中子份额比铀-235 裂变的少。份额占百分之几的缓发中子为用移动中子吸收控制棒来保持反应堆堆芯链式反应处于控制之下提供时间。由于使用 MOX 燃料减少了这种控制所需的时间裕量，大部分轻水堆最多只允许三分之一的堆芯装载 MOX 燃料。

法国及西欧从前的几个后处理客户都正在轻水堆中以 MOX 燃料形式使用分离钚。日本电力公司也计划这样做，但是因为县一级的政府反对 MOX，经过福岛事故发生之前 10 年的尝试，只设法辐照了日本乏燃料在欧洲分离的近 40 吨钚

中的 2.5 吨。英国分离了 100 多吨自己的钚，但是还没有用在 MOX 燃料中。

法国、日本和英国过去都在低估成本一个数量级的基础上作出建造后处理厂的决定（见图.3）。生产 MOX 燃料的费用，包括后处理 LEU 燃料取得钚的费用，在今天要比同等数量的低浓铀燃料费用高一个数量级。乏燃料后处理费用，与管理乏燃料替代方案（干法罐装贮存乏燃料）相比，也高了 10 倍左右。

尽管增殖堆商业化计划没有成功以及钚用作轻水堆 MOX 的经济性不佳，但是一直在通过后处理分离钚，从而积累了大量分离钚库存。甚至在法国，尽管其技术上（如果不是经济方面）成功的计划，每年约将 10 吨钚制成 MOX，未经辐照的钚存量一直在稳步上升，并于 2013 年底达到 60 吨，1995 年底时是 30 吨。2012 年，英国在结束增殖堆计划 18 年之后，终于决定适当的处理方式将是停止后处理。

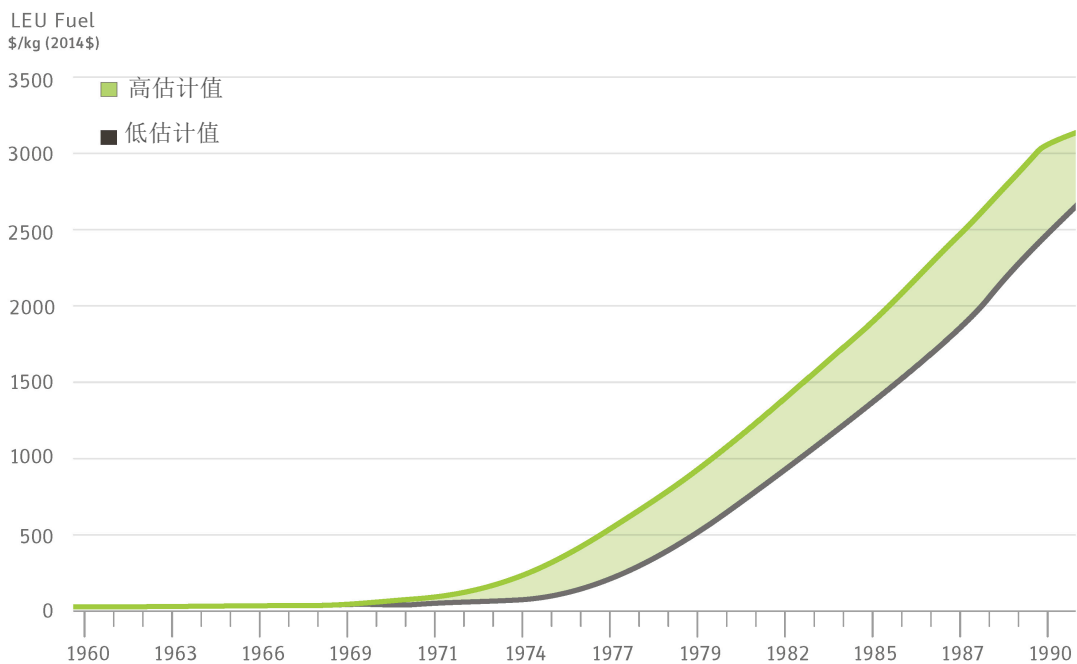


图 3 后处理费用估算

此图显示以定值（2014 年）美元计算的美国于 1975-1983 年进行后处理的费用估算，并与由美国国家科学院在 1992 年根据英国和法国提供的适合不受监管的私人产业采取融资假设数据所估算的费用进行了比较。来源：改编自《核废物：分离与嬗变技术》，美国国家科学院出版社，1996 年，第 117 页，以及 B. 沃尔夫和 B. 贾德森，《美国燃料再利用——意义、现状、限制条件和前景》，第四届亚太基础核会议文集，加拿大核能协会，加拿大多伦多，第 134-138 页。

在 20 世纪 90 年代中期，对民用后处理计划有不同方面兴趣的 9 个国家开会探讨钚的管理。美国迫切要求制定协议以减少库存，但只达成一项模糊的协议，9 个国家将分别“只要实际可行，（在考虑其他诸多因素的同时）考虑供需平衡的重要性，包括核电厂运行对于合理营运库存的需求。”

这 9 个国家也同意每年向 IAEA 报告其民用钚库存。自 1972 年以来，美国一直没有分离民用钚。其他 8 国的申报都标在图 4 上了，在此期间，所有这些国家要么后处理核电反应堆的乏燃料，要么在法国和英国进行后处理。由此可以看出，4 个后处理国家（法国、日本、俄罗斯和英国）所拥有的库存都呈现上升趋势，而 4 个客户国家（显示为“其他国家”，包括比利时、德国、意大利和瑞士）则呈稳定态势，在他们结束钚分离计划并开始处理库存之后，库存急剧下降。

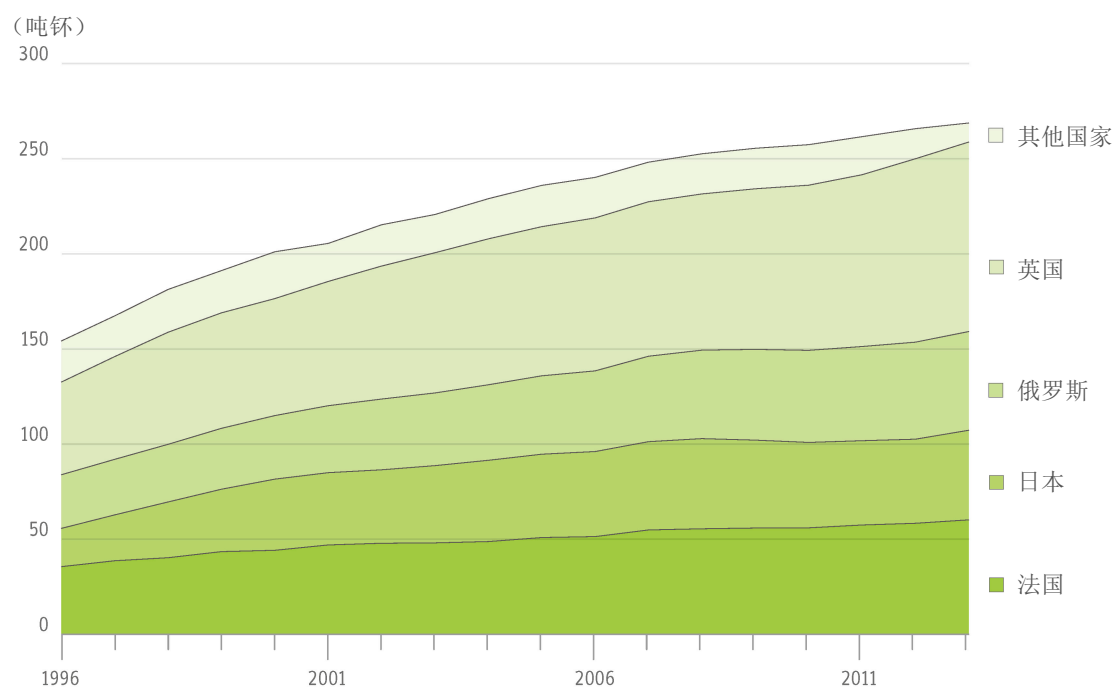


图 4 1996 至 2013 年分离民用钚库存的增长

这些数字是根据自 1996 年开始的每年向 IAEA 申报的，“其他国家”（客户国家，即比利时、德国、意大利和瑞士）的库存存放在法国和英国，并包含在“其他国家”。中国于此期间的库存忽略不计。

嬗变

考虑到增殖堆以及在轻水堆内使用钚经济性很差，后处理的最终理由是：后

处理可以在分离并消除钚以及其他本来会与乏燃料一起被掩埋的长寿命超铀同位素上获利。例如，钚-239 的半衰期为 24000 年。由于水冷式反应堆内的慢中子对使所有钚同位素裂变的效率不高，认为必须继续发展并最终使用钠冷快堆，对 MOX 乏燃料中的钚进行“嬗变”（裂变）。

这些都是误导性的观点。实际上，钚在地下深层相对不溶于水，那是因为水中所含的氧在与周围岩石的化学反应中已经耗尽。我们所知道的所有计算都显示，从地质处置库泄漏并到达地表的剂量主要来自乏燃料中长寿命裂变与活化产物。

同时，后处理厂日常释放的气态裂变产物以及液态高放废物罐或蒸发器爆炸引起的可能的大量释放造成的人员受照剂量，比深地质处置库将来泄漏的剂量要高许多。美国有一项在其境内恢复后处理和钠冷快堆计划的建议，以减少钚和要求深埋的其他超铀元素数量，美国国家科学院对此进行了评估，在 1996 年得出结论：“剂量降低幅度似乎没有大到足以保证费用及嬗变的其他操作风险。”

后处理对国际安全的影响

后处理让人担心的最重要原因就是钚可用于制造核武器。除非钚包含超过 80% 的稀有同位素钚-238，其他几乎任何钚同位素的组合都可用来制造武器。区分“武器级”钚与反应堆级钚的一种方法是，“武器级”钚包含超过 90% 的钚-239，而反应堆级钚则有较大比例的钚-240。使用反应堆级钚通常举出的问题是投放在长崎的武器设计类型“失败”的可能性增加，其中由钚-240 裂变所释放的中子使裂变链式反应过早开始而导致武器提前引爆，使爆炸当量只能达到设计值的几个百分点。美国核武器设计者曾指出：

“在最低的武器复杂水平上，潜在的扩散国家或亚国家集团无需使用比第一代核武器更复杂的设计和技术，就能利用反应堆级钚制造出当量达一千吨或数千吨（当量可能还要比这高）确实可靠的核武器。在最高的武器复杂水平上，先进核武器国家，如美国和俄罗斯，采用现代设计，用反应堆级钚制造的核武器具有的可靠爆炸当量、重量以及其他特性，可与用武器级钚制造的核武器相比。”

国际原子能机构认为 8 千克钚就足以制造第一代长崎型核武器。这里的 8 千克数量考虑了制造第一枚核武器过程中不可避免的耗损。用这个标准衡量，用图 4 所示的分离后钚库存可以制造 30000 枚以上的弹头。如果采用先进核弹头设计，则可制造 60000 枚以上的弹头。

从历史上来看，印度在 1974 年进行“和平核爆炸”之后，民用后处理与国际安全之间的关联已成为广泛的关注问题。印度首先使其分离钚合法，提出这是为增殖堆开发计划所必需的。美国在 20 世纪 60 年代推动了后处理和增殖堆的发展，为印度和平利用原子能计划提供了帮助，它对印度的做法尤其感到震惊。福特政府（1974—1977 年）和之后的卡特政府（1977—1981 年），要求评估增殖堆和后处理是否确实是核电未来发展所不可或缺的。在研究了这些评估之后，卡特政府决定暂停给位于南卡罗来纳州巴恩韦尔建造中的大型商业后处理厂，以及田纳西州橡树岭附近建造中的示范增殖堆颁发许可证。

里根政府（1981—1989 年）于 1981 年就职后撤销了这些决定。然而，里根政府也明确表示不会再补贴后处理。1982 年，美国核电公司得出以下结论：直接处置乏燃料的费用远低于后处理费用，并说服联邦政府负责选址并建造深地下乏燃料贮存库，每千瓦时核电交 0.1 美分处置费用。从那时开始，美国政府一直努力阻止更多国家启动民用后处理计划。这个时期的大多数时间，争议其实一直都在：“我们不进行后处理，你们也不需要。”该项政策加大了经济方面反对后处理的观点。正如已经指出的，没有新的国家再投入后处理，3 个国家已停止后处理，并且第四个国家（英国）也决定这样做了。

后处理现状

有 10 个国家建造了民用后处理厂，还有 10 个国家将乏燃料运送到他国进行分离（见表 1）。

这 20 个国家中，只有不到一半的国家还以很大规模继续运行后处理厂，目前运行后处理厂的 6 个国家可分为三大类。

第一类是印度和俄罗斯，他们的政府继续同时支持后处理和增殖堆的研发计划，并且目前保留自己分离后的钚用于未来的增殖堆。印度是唯一仍在积极扩大后处理能力的国家，主要理由是为了建造更多的增殖堆。这种堆最初以 MOX、最终则以金属钚作为燃料。俄罗斯的计划暗示了更大的不确定性，因为他们正在开发 3 种不同类型的快堆（钠冷、铅冷和铋冷）和三种不同的钚燃料（MOX、快堆使用的氮化物燃料和轻水堆使用的 MOX）。这两个国家的增殖堆计划都已经延迟了几十年。

表 1 过去与现在的民用后处理厂

国家	设施	设计能力 (吨铀/年)	运行年度
比利时	Eurochemic	30	1966—1975
中国	酒泉中试厂	50	2010—
法国	UP1	400	1958—1997
	UP2	1000	1966—
	UP3	1000	1989—
德国	WAK	35	1971—1990
印度 (重水堆 [HWR])	塔拉普尔 I	100	1982—
	塔拉普尔 II	100	2011—
	卡尔帕卡姆	100	1996—
意大利 (研究堆和 HWR)	EUREX	中试厂	1970—1983
日本	东海	200	1977—2014
	六个所村	800	2006—2008, 2016—?
前苏联/俄罗斯	RT1	200~400	1976—
英国 (B204 和 B-205 用于石墨慢化堆)	B204	300	1952—1973
	B205	1500	1964—2020?
	THORP	1200	1994—2020?
美国	西谷	300	1966—1972

除非特别注明，所有后处理厂进行轻水堆燃料的后处理。法国和英国后处理服务以前的客户有：比利时、德国、意大利、日本、荷兰、西班牙、瑞典和瑞士，只有荷兰已经续约。由前苏联/俄罗斯设施提供后处理服务的以前客户有：亚美尼亚、保加利亚、捷克斯洛伐克、东德、芬兰、匈牙利和乌克兰等。设计能力通常也以每年吨重金属 (tHM/y) 表示。对于天然铀或低浓铀燃料，重金属指的是原始燃料中的铀。对于 MOX 燃料，指的是燃料中的钚和铀。

法国和日本属于第二类国家。他们继续在口头上承诺大型后处理计划，但是

目前并未建造增殖堆，而且在可预见的未来也没有这样的计划。法国正在轻水堆 MOX 内使用其分离后的钚。日本自 2001 年以来也一直在尝试，但迄今没有成功，并且目前和预计未来都将付出巨大成本。日本的后处理计划由于技术问题已严重推迟。

英国属于第三类国家，已决定待完成目前的后处理合约就结束后处理计划（目前估计约在 2018 年）。目前专注于如何处置超过 100 吨分离后的民用钚及清理塞拉菲尔德后处理场址。2011 年，在制造的 MOX 燃料里仅仅包含了 1 吨过去积累的钚后，他们以极大的代价放弃了 MOX 制造厂的建造。其后，英国以合理价格取得贮存在英国的国外（主要是日本）大约 20 吨钚的所有权。

最后是中国，尽管口头表示兴趣，对于后处理和增殖堆的立场似乎不是很确定。虽然中国已建造了后处理中试厂和实验型增殖堆，中试厂曾在 2010 年底首次短暂运行，2011 到 2014 年第二次短暂运行。自 2007 年法国 Areva 集团提议向中国出售大型后处理厂以来，中国政府也一直迟疑不决。

目前将乏燃料出口到其他国家进行后处理的国家更是大幅减少。

荷兰是唯一与法国更新合约的西欧后处理客户国，对其仅有的 500 MW 动力堆乏燃料进行后处理料。分离后的钚以 MOX 燃料形式交还荷兰，在其反应堆上使用。

俄罗斯后处理客户的情况则是喜忧参半。在前苏联时期，拥有由前苏联提供的第一代（约 400 MW 的容量）轻水堆的外国与非俄罗斯共和国将乏燃料运往乌拉尔的 RT-1 后处理中试厂进行后处理。拥有前苏联/俄罗斯设计的大约 1000 MW 发电能力的第二代轻水堆的国家，签约将乏燃料运往西伯利亚热列兹诺戈尔斯克一座未完工的后处理厂场址贮存，等待将来在该场址建造新后处理厂的决定。

前苏联解体后，多数俄罗斯客户国决定将乏燃料贮存在本国而不运往俄罗斯。乌克兰于 2014 年作出此决定，中国和印度不打算将俄罗斯在这些国家设计的反应堆产生的乏燃料送到俄罗斯。但是，为了减少西方国家担心燃料里面的钚，伊朗同意将由俄罗斯建造的布什尔反应堆产生的乏燃料运回俄罗斯。俄罗斯提出给一些国家提供资金的核电厂合同中也包含收回乏燃料的条款。

前苏联拥有从外国的乏燃料中分离钚的所有权，俄罗斯延续此措施。俄罗斯为外国乏燃料进行后处理，因此未再增加能获得分离钚的国家的数量。



图 5 世界各地民用乏燃料后处理厂

目前只有欧洲和亚洲还有运行中的工厂。

只有一个新的国家对后处理其乏燃料表示出兴趣：韩国。它认为，在对 1974 年与美国达成的民用核能合作协议进行续约谈判时，同日本在 1988 年与美国达成的合作协议一样，美国应事先同意韩国进行乏燃料后处理。韩国政府提出和日本相同的观点，后处理厂将对其核电厂中乏燃料的累积提供场址以外的存放地，另外一个错误的观点是最终有必要裂变乏燃料中的钚和其他超铀元素，从而将韩国核废物在地下深地质贮存库的面积降至可接受范围。然而，美国立场坚定，反对在协议中包括事先同意在韩国进行后处理。

制度的力量

上述论及的后处理问题不是新问题，几十年来，对于后处理观点本质的质疑不断增加，而且进行后处理的国家数量呈现稳定下降趋势，所有这些都指出这一趋势可能会持续下去。同时，经济状况不好以及与核武器扩散相关的对后处理的反对，并没有使下降趋势那样迅速。本报告的内容对国家承诺维持分离钚以及通

常为增殖堆的体制上的力量进行了深入研究。

在所有继续或正在探索后处理的国家中，由政府拥有的主管机构对国家政策施加强大的影响力，像中国的中核集团、法国的阿海珐集团和原子能委员会、印度的原子能部、日本的原子能机构、韩国的原子能研究所和俄罗斯的 Rosatom。这就使独立的观点进入国内的政策辩论中，并且对由后处理所造成的经济、环境 and 安全问题获得适度的评估，一直是一个大问题。

虽然印度和俄罗斯积极实施增殖堆计划，为后处理找到一个正当理由，在法国和日本的核能机构中仍有一些有影响力的派别认为，增殖堆在 2050 之后将具备经济上的竞争力——尽管此种想法没有明显的客观依据。即使福岛事故的后果使核电在日本的前景变得十分暗淡，日本的“核电村”仍然一直特别顽固地坚持日本承诺继续进行后处理。

核武器国家在民用后处理上的坚持不懈，在某种程度上反映了他们的后处理机构在提供武器用钚时在政府内部形成强有力的体制联系，这些机构希望继续有这样的使命。美国是个例外，因为他们决定后处理将私有化，从而结束了财政部的拨款。日本坚持进行后处理，部分原因也可能是由于日本的安保机构出于对来自中国和韩国安全威胁忧虑增加而保持核武器选择权方面的利益。然而，军事计划和民用计划之间的这种重叠，是停止后处理最重要的理由之一。

政治学家威廉·沃克在其 1999 年出版的《核能陷阱》一书中提到，尽管“后处理的产品市场已彻底改变”，并且更多地认识到直接处置乏燃料将更为经济，英国政府仍决定在塞拉菲尔德建造并运行昂贵且低效的热氧化后处理厂。15 年过后，英国政府决定停止后处理，并且其注意力已经转移到处置大量分离钚危险库存和巨额的清洁费用。英国的转变虽然姗姗来迟，但表明经济、环境和安全相关的观点结合在一起，将随着时间推移克服体制上的阻力。类似的过程也在其他国家上演。事实上，正如这份报告所表明的，世界正越来越接近结束乏燃料的后处理和分离钚。

撰稿人

- 阿纳托利·迪亚科夫(Anatoli Diakov), 系莫斯科物理与技术学院的物理学教授, 为莫斯科军控、能源和环境研究中心的创办局长。他发表过的论文包括核军控、俄罗斯铀生产历史、过剩铀处置方案、俄罗斯的铀生产, 以及将俄罗斯的破冰船反应堆从 HEU 转换成 LEU 的可行性, 还有关于核武器军控和裁军等许多其他议题。他是 IPFM 成员, 也是俄罗斯篇章的主要作者。

- 克劳斯·简伯格(Klaus Janberg), 为德国工程师及法国物理学家, 现已退休, 从 1969 至 1976 年先后在法国、美国和德国从事不同的快中子增殖堆项目。从 1976 年 9 月至 1980 年 10 月, 担任德国后处理公司 DWK 的部门负责人, 并为德国电力公司负责与 COGEMA 公司谈判 UP3 合同。与此同时, 他负责在德国阿豪斯和高勒班开发核电厂外乏燃料贮存场址。从 1980 到 2000 年, 他担任工程公司 GNS 的总经理, 负责开发 CASTOR 干式贮存桶。他是德国篇章的主要作者。

- 姜正民(Jungmin Kang)为韩国科学与技术高等研究院的客座教授。他研究的一系列问题包括: 核能防御与安全之间的关联、验证朝鲜的铀生产、放射性废物管理、乏燃料贮存以及封闭燃料循环的扩散阻力。他是评估伊朗和朝鲜核武器计划(2013 年)的编辑。他是 IPFM 成员, 也是韩国篇章的撰稿人。

- 戈登·麦克寇朗(Gordon MacKerron)于 2014 年自萨塞克斯大学科学与科技政策研究所(SPRU)所长职位退休。从 2005 至 2008 年, 在 SPRU 内部指导萨塞克斯能源研究小组。他是训练有素的经济学家, 主要研究能源的经济和政策议题, 尤其在核能方面, 还有更广泛的当代能源政策议题, 包括气候变化和供给的安全性。他是英国政府辖下放射性废物管理独立委员会的首任主席(2003-2007 年), 且是 IPFM 成员, 为英国与经济情况篇章的主要作者。

- M.V.拉曼那(M.V. Ramana)是普林斯顿大学核能未来实验室及科学与全球安全计划的物理学家。他在气候变化和核裁军的架构之下研究核能的未来, 是《承诺的力量:在印度的核电调查》(2012 年)的作者。他是 IPFM 成员, 为印度篇章的主要作者, 并且是报告的共同编辑。

- 迈可·施奈德(Mycale Schneider)以巴黎为根据地, 是一位独立的能源

和核能政策国际顾问。他是《世界核电产业情况》年度报告的主要作者和发行人。他是国际能源咨询委员会的董事会成员兼发言人，并在 14 个国家的国会作证或发表简报，且于 10 个国家的 20 所大学和工程学院讲学或任教。在过去的 30 年，他对一些国家的政府和欧洲机构以及众多的非政府组织和智囊团提供信息和咨询服务。他是 IPFM 成员，为法国篇章的主要作者。

- 田洼雅文(Masafumi Takubo)主要在东京，是一位独立的核能政策分析师。他负责经营他于 2004 年所成立的核能信息网站-Kakujoho[核能信息]。他是日本国会反对原子弹和氢弹（GENSUIKIN）-成立三十年以上的领导基层组织的成员，包括担任国际部高级研究员与顾问。田洼转写许多日本核能的相关政策，包括乏燃料后处理。他是 IPFM 成员，为日本篇章的主要作者。

- 戈登·汤普森(Gordon Thompson)是资源与安全研究机构的执行董事，并且是克拉克大学的资深研究科学家。他研究一系列与人类安全和我们的文明持续发展相关的技术和政策议题。这些议题都是与核能技术有关的各种风险，包括放射学、核扩散，以及后处理的相关计划风险。他是放射性风险该篇章的主要作者。

- 弗兰克·凡·希佩尔(Frank von Hippel)为资深研究物理学家及普林斯顿大学科学与全球安全计划公共和国际事务的荣誉教授，也是 IPFM 的创始共同主席和普林斯顿对科学与全球安全计划的创始共同处长。他在过去 40 年研究易裂变材料的政策议题。他是这篇报告的共同编辑，为韩国、日本和核变迁等篇章的主要作者。

- 张会(Hui Zhang)在哈佛大学约翰·肯尼迪政府学院的科学与国际事务贝尔弗中心担任原子能项目管理资深副研究员。他的研究领域包括核武军控的核查技术、易裂变材料的控制、防止核武恐怖主义、中国的核能政策、核能保障和防止核武扩散，以及后处理和核能燃料循环的相关政策。他是中国篇章的主要作者。

- 周云(Yun Zhou)担任 Ux 咨询公司的特别顾问暨马里兰大学国际与安全研究中心的研究学者。从 2009 年至 2014 年，她在哈佛大学的科学与国际事务贝尔弗中心担任资深研究员，目前的研究兴趣包括全球核武扩张和替代核能技术对于国际防御与安全的影响。她主修核子工程取得加州大学柏克莱分校的博士学位，以及主修工程物理取得中国清华大学的学士学位。他是中国篇章的主要作者。

A report published by

The International Panel on Fissile Materials (IPFM)

www.fissilematerials.org

Program on Science and Global Security

Princeton University 221 Nassau Street, 2nd Floor Princeton, NJ 08542, USA

May 2015