



IPFM
INTERNATIONAL PANEL
ON FISSILE MATERIALS

国际易裂变材料工作专家组

将钚制成 MOX 燃料进行处置的替代方案

作者: Frank von Hippel 和 Gordon MacKerron

2015年4月

将钚制成 MOX 燃料进行处置的替代方案

直接处置库存分离钚

作者:Frank Von Hippel 和 Gordon MacKerron

2015 年 4 月

国际易裂变材料专家组研究报告 13

2015 年国际易裂变材料专家组

该研究得到创新公共贡献-非商业认证

访问网址 www.creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0 可查看认证复印件

封面：地图所示为本报告中提到的拥有大量钚库存的国家

目 录

将钚制成 MOX 燃料进行处置的替代方案	1
直接处置库存分离钚	1
摘要	5
引言	8
分离民用钚的衰落理由	11
钚增殖堆	11
在轻水堆 MOX 燃料中使用（钚）	13
乏燃料管理	13
钚的处置原则	14
法国和日本	17
法国	17
日本	19
英国	22
贮存以备将来使用	22
MOX 的参考之一	24
考虑的替代方案	25
美国	28
最初：双轨处置战略	29
有关集中于 MOX 方案的决定	30
MOX 方案逐渐“在经济上难以负担”	30
废物隔离示范设施	33
罐中罐	35
深钻孔方案	37
液态钠冷快堆	37
从美国经验获取的教训	38
和俄罗斯谈判	39
直接处置方案	40
临时贮存	40
处置形态	41
机械混合	41
固化	41
地下目的地	44
矿井处置库	44
深钻孔	44
国际透明度	47
结论	48
参考文献	50

表目录

表—1.截至 2013 年末全球分离钚库存.....	9
----------------------------	---

图目录

图 1.全球分离钚库存增长及 1945 到 2013 年末全球在役核弹头库存增减情况.....	8
图 2.美国电力公司 1965—2013 年间支付的平均铀价（以不变美元计价）。.....	12
图 3.法国未经辐照民用钚库存增长.....	18
图 4.日本未经辐照钚库存的增长.....	20
图 5.英国民用分离钚库存增长.....	22
图 6.英国塞拉菲尔德生产和剩余贮存.....	23
图 7.美国能源部萨凡纳河场址的钚贮存容器.....	28
图 8.美国在建的 MOX 燃料制造厂.....	31
图 9.美国能源部废物隔离示范设施（WIPP）.....	33
图 10.位于前塞拉菲尔德 MOX 燃料制造厂的手套箱流水线.....	34
图 11.深钻孔处置固化钚原理图.....	45

关于国际易裂变材料专家组

国际易裂变材料专家组 (IPFM) 成立于 2006 年 1 月，是一个由 18 个国家的军控与防扩散专家组成的独立团体。这 18 个国家中，既有核武器国家，也包括非核武器国家。

IPFM 的任务，是分析实际可行的保护、合并和削减高浓铀、钚库存的政策倡议的技术基础。易裂变材料是核武器的重要组成部分，控制易裂变材料对于核裁军、防止核武器扩散和确保恐怖分子无法获取核武器都十分关键。

军用和民用易裂变材料库存都需要得到有效管理。核武器国家的核武器、海军核燃料库存中，仍有足够制造数万枚核武器的易裂变材料。民用方面，已经生产足量的分离钚，可以制造与军用库存数量相当的核武器。全球有 100 多个场址使用高浓铀作为民用反应堆的燃料，相关的易裂变材料总量足以制造数百枚广岛那样的核炸弹，而恐怖分子可能有能力实现广岛核炸弹那样的设计。

IPFM 主席由普林斯顿大学的 Alexander Glaser、Zian Mian 和日本长崎大学的 Tatsujiro Suzuki 共同担任。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、英国和美国的核专家。访问 IPFM 网址 www.fissilematerials.org 可以查看专家组成员的简介。

IPFM 会向国际组织、国家政府和非政府组织共享其研究报告。这些报告可从 IPFM 网站获取，或者通过 IPFM 博客获得，博客网址为：www.fissilematerials.org/blog。

普林斯顿大学科学与全球安保项目为 IPFM 提供管理与研究支持。

IPFM 经费支持来源于芝加哥约翰.D (Jhon.D) 和凯瑟琳 T. 麦克阿瑟 (Catherine T. MacArthur) 基金会和纽约卡内基 (Carnegie) 公司提供给普林斯顿大学的经费。

摘要

冷战遗留的一项极度危险资产就是总量约 220 吨的武器级钚，其中有 95% 归俄罗斯和美国所有。冷战结束后，美俄大幅削减了核武库，大量武器级钚成为冗余钚。

1994 年，美国能源部宣布，库存武器级钚中有一半为冗余钚，约 38 吨，此后又加上了非武器级钚，使得冗余钚总量达到 50 吨。同年，在美国国家科学院支持下组建的一个高级委员会称，库存分离钚存在被盗取的可能，“构成了明显且现实的危险”，并敦促（美国政府）不要推迟处置工作。

2000 年，俄罗斯和美国同意各处置 34 吨冗余武器级钚，而计划采用的方法是将绝大多数钚制成铀-钚混合氧化物（MOX）燃料供轻水堆（LWR）使用。为鼓励俄罗斯加入这项工作，美国同意承担俄罗斯处置冗余钚的大部分费用。处置工作原计划于 2007 年底开始。

然而，MOX 燃料计划进度停滞，项目成本上升。美国决定不再继续提高对俄罗斯项目的经费支持承诺，并于 2010 年接受俄罗斯使用冗余钚作为示范钚增殖堆燃料的选择。不幸的是，俄罗斯还计划对辐照后的钚进行分离和回收。因此，俄罗斯的钚被盗风险将不会降低。

美国 MOX 计划的预期成本继续快速攀升，目前已比最初估算增加超过 10 倍。2013 年，奥巴马政府称“可能无力再负担（成本）”，并决定寻找成本较低的替代方案。

同时，法国、日本、俄罗斯和英国也出现了冗余民用分离钚问题。这些国家在 20 世纪 60 年或 70 年代启动了乏燃料“后处理”（钚分离）计划，最初的目的是为新一代的增殖堆提供启动燃料，这种增殖堆运行时会生产出比所消耗的钚燃料更多的钚。民用钚并非“武器级”，但也能用于制造武器，因此和冗余武器级钚一样，构成“明显的现实威胁”。

2013 年底，全球民用分离钚库存总量增至 260 吨，足够制造 3 万枚广岛那样的核炸弹。但增殖堆的商业化前景还不明朗。

从 1987 年起，法国 COGEMA（现在的 AREVA）就开始将自己的和外国客户的民用分离钚制成 MOX 燃料，在生产出这些钚的轻水堆中使用。英国也建造了一个 MOX 燃料工厂，服务于国外客户，但

由于该厂存在不可补救的设计缺陷，于 2011 年废弃。日本正在建设一座 MOX 燃料厂，但完工日期被长期推迟。

不考虑从乏燃料中分离钚的高昂成本，仅仅将分离钚制成 MOX 燃料的成本就比它要替换的低浓铀燃料高。在美国，MOX 燃料成本约为低浓铀燃料成本的 20 倍。因此，通过制造 MOX 燃料利用钚必须被视作一项废物处置计划，从而给我们一个理由，去寻找是否存在同样有效但成本更低的处置方案。

另外，认识到一项事实非常重要，就是将分离钚制成 MOX 燃料后进行辐照并不能消除钚。(MOX 燃料)中有一部分钚发生了裂变，但轻水堆 MOX 乏燃料中含的钚仍占最初的 75%。通过反复循环进一步减少钚含量的方案并不现实，因为钚同位素组分会在循环中发生改变，使钚越来越难在轻水堆中裂变。

处置反应堆燃料中的分离钚的一项可选方案是将其加工成稳定结构并进行深埋。

美国能源部钚处置工作小组 2014 年得出结论称，成本最低的处置方案是将钚运至能源部位于新墨西哥州的废物隔离示范设施 (WIPP) 处置。WIPP 是一个位于地下 650 米深盐床的处置库，目前该处置库正在填埋美国核武器计划产生的钚污染废物。但是否存在政策上的可能，拓展 WIPP 的任务范围以满足美国冗余钚处置需求，仍有待观望。

美国钚处置计划最初设计了另外一条路线，即在南卡罗来纳州的萨凡纳河场址，将钚嵌入正进行玻璃固化的高放废物中。能源部钚处置工作组认为目前采取该方案已为时过晚，但可能还能处理很大部分冗余钚。能源部正在开发另一种处置，即在地下钻出深几公里的钻孔，用于处置其他放射性废物。最终，可能将一些固化的钚放入乏燃料容器中，连同乏燃料一起深埋地下。考虑到执行钚处置工作的时间窗口，可能会联合使用两种或多种方案。

美国正在公开辩论新的钚处置方案，以替代将钚制成 MOX 燃料的处置方案，但法国、日本的 MOX 计划还存在不确定性。在福岛核事故前的 10 年里，有关地区安全的担忧耽搁了日本的 MOX 计划。法国 MOX 计划成为法国电力公司 (EDF) 和 AREVA 争论的焦点，EDF 希望降低成本，AREVA 则运行着法国的钚再循环联合体。同时，法国使用 MOX 燃料的反应堆正在老化，而 AREVA 贮存的未使用的 MOX 燃料在不断增加。

不论采取何种方法处置钚，对未来核裁军来说，关键的一点是，核武器国家的钚处置工作也必须接受国际原子能机构（IAEA）的核查，就象目前非核武器国家所作的那样。

引言

冷战开始后，全球分离钚库存持续增加。冷战结束后，美国、俄罗斯、英国、法国和中国都停止了武器用钚的生产，美国和俄罗斯大幅削减各自的核武库并宣布它们的总库存中有 40% 是冗余的（见图 1）。

20 世纪 60 年代和 70 年代，法国、俄罗斯和英国开始大规模从动力堆乏燃料中分离钚，以用于民用目的。¹从图 1 可以看出，尽管开展民用后处理计划的国家于 1997 年签署了有关需要平衡分离钚生产与使用的协议，但在过去 20 年，全球民用钚库存仍持续增长。²

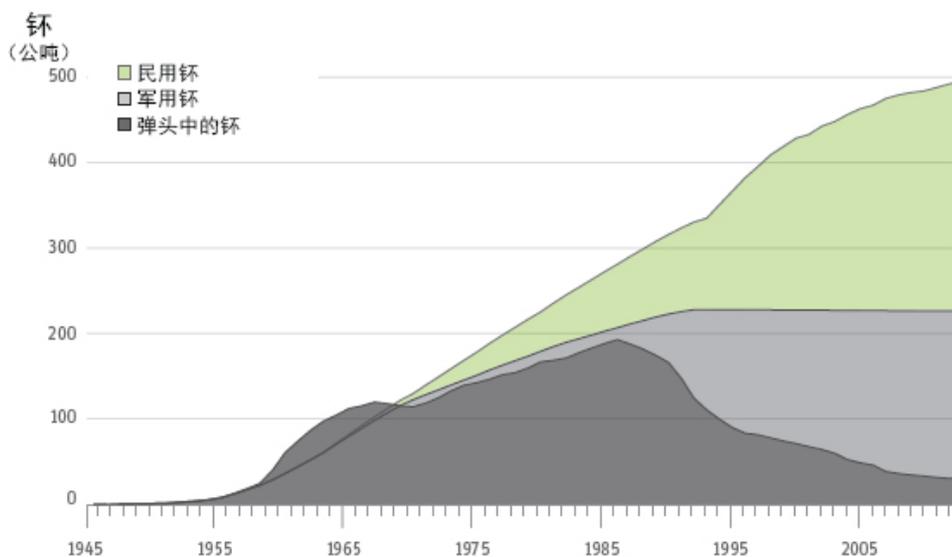


图 1. 1945 到 2013 年底全球分离钚库存增长情况及全球在役核弹头库存增减情况

由于美俄（军用钚）处置计划推迟，军用钚库存保持不变。由于从动力堆乏燃料中分离钚的速度远远超过在新燃料中使用钚的速度，民用钚库存仍持续增长。为了在同一量度下估算在役核弹头中的钚库存量，假设每枚核弹头平均含有 3kg 钚。对于 20 世纪 60 年代的美国弹头，这一值可能偏高。数据来源为，军用钚：IPFM,《2010 年全球易裂变材料报告》，《平衡账目：2013 年生产、库存和全球易裂变材料报告》；民用钚：David Albright, Frans Berkout and William Walker, 1996 年全年《1996 年钚和高浓铀》（牛津大学出版社，1997）和《2013 年全球易裂变材料报告》，附录 1.3。核弹头：Hans Kristensen 和 Robert Norris,《全球核武器库存，1945—2013》原子能科学家论坛第 69 卷，第五篇（2013），75—81 页。

因此，全球有大量冗余钚库存。考虑到民用钚可用于制造武器，³这些足够制造约 10 万枚弹头⁴的冗余钚对全球安全是一项重大威胁。

因此，所有拥有冗余武器钚和/或民用分离钚的国家都正在或计

划在反应堆中利用这些钚。但这些计划都已出现进度长期推迟和成本大幅上升的情况。本报告概述了这些计划的历史，并探讨了其他直接处置方案。

表 1 是世界各国的分离钚库存。这些钚库存被分为四类：武器及相关储备；宣布冗余的武器钚；民用钚；“其他”钚，这些钚的来源或用途需另作解释。

表—1.截至 2013 年底全球分离钚库存

国 家	未经辐照的钚库存（单位：公吨）			
	武器及相关储备	宣布冗余的武器用钚 ⁵	民用钚	其他 ⁶
美国	38.3	43.4	—	6.6
俄罗斯	88*	34	50	~6
英国	3.2	0.3	99.6	4.1
法国	6*	0	60.2	—
中国	1.8*	0	0.014	—
印度	0.54*	0	~0.5	~4.7
以色列、巴基斯坦、朝鲜	1.0*	0	0	—
日本	0	0	47.1	—
其他非核武器国家	0	0	5 ⁷	—
总计	138.8	77.7	262.4	21.4

数据来源：《2013 全球易裂变材料报告》（表中*标注数据）和各国在 INFCIRC/549 年度更新中向 IAEA 申报的数量。

20 世纪 70 年代大规模启动民用钚分离的最初目的，是为钠冷钚增殖堆提供启动燃料。但法国、德国、日本、英国和美国在 20 世纪 80 年代和 90 年代都放弃了增殖堆商业化计划，印度和俄罗斯的计划也推迟了数十年。目前，俄罗斯计划将它的 34 吨冗余武器钚、50 吨民用分离钚用作其 2 座原型增殖堆的燃料。这 2 座增殖堆为 BN-600 和 BN-800（功率约 800MWe）⁸，BN-600 于 1980 年投运，BN-800 为新建增殖堆。印度计划将全部分离反应堆级钚（表 1 中所示“其他”钚）用于启动其 500MWe 原型快中子堆。

法国和日本放弃增殖堆商业化计划后，决定继续从轻水堆乏燃料中分离钚，用于制造铀钚混合氧化物（MOX）燃料，作为轻水堆的

补充燃料。但是，法国至今已使用的钚的量，只占它 1976 年开始从本国乏燃料中分离的轻水反应堆钚的三分之二。结果法国就拥有了一个巨大且不断增长的钚库存。日本已使用的钚的量仅占其在国内外生产出的钚库存的 5%。

英国 1994 年放弃增殖堆计划以来尚无钚处置计划，目前才刚开始考虑如何处理其巨大（世界最大）的民用分离钚库存。英国承诺将处置为日本和其他国家分离的 20 多吨钚。最初计划是将这些钚制成 MOX 燃料，并返还给上述国家，但塞拉菲尔德 MOX 工厂出现技术故障，被迫于 2011 年关闭。

2010 年，美国在与俄罗斯签订的《钚管理与处置协议》⁹中承诺，将处置协议中提到的 34 吨武器级钚，将其制成 MOX 燃料。到 2014 年底，美国能源部在建造 MOX 燃料制造厂上已花费约 50 亿美元。这一额度是最初估计总费用的 4 倍，但工厂还有一半以上没有建成。进一步预计显示，完工后的工厂年度运行成本已攀升至 7 亿美元¹⁰。因此，奥巴马政府在 2013 年认为“可能无力负担”将钚制成 MOX 燃料的处置方案，并启动了评估其他钚处置方案的工作。¹¹本报告将对不同的钚处置方案进行分析。其他挣扎于 MOX 计划的国家可能会感兴趣。

在引言的剩余部分，我们重新考虑了分离民用钚的衰落原因，并列出了一些在钚处置方面（不论民用还是军用）政府政策应该考虑的基本原则。后续章节将分析法国、日本、英国和美国钚处置计划的现状；地下直接处置钚的方案；以及需要 IAEA 对核武器国家及非核武器国家的钚处置计划进行监控。

分离民用钚的衰落理由

IPFM 已经就增殖堆计划，全球乏燃料管理计划，以及法国、日本、英国和（乔治·华盛顿·布什政府提出的）美国后处理计划撰写了多篇报告，还将于 2015 年出版一份新的有关全球后处理形势的综述。对这些报告，读者可参考 IPFM 网站，www.fissilematerials.org。上面能找到报告的概述。

支持从动力堆乏燃料中分离钚的三个主要理由是：

- 为增殖堆提供启动燃料；
- 为轻水堆提供补充性的 MOX 燃料；
- 乏燃料管理。

钚增殖堆

开展民用钚分离的最初考虑，是认为高品位铀矿资源稀少，因而很快会需要更多铀资源利用效率更高的反应堆。液态钠冷却快中子钚增殖堆的铀资源利用效率很高，因为其最终燃料将是 U-238（天然铀中含量达 99.3%）而非自然界中仅存的可发生链式反应的铀同位素 U-235（天然有铀含量为 0.7%）。这种反应堆将能以反应堆产生的能进行链式反应的钚作为燃料，同时通过 U-238 的转换¹²产生更多的钚。

1975 年，有预测称，到 2000 年需建造总功率达 200GWe 的增殖堆，其中多数将于 20 世纪 90 年代建造，平均建造速度为每年建造 20 座功率为 1000 兆瓦（MWe）的反应堆。¹³每座功率为 1000MWe 的反应堆需 9 吨钚作为启动燃料。这将为增殖堆提供最初的堆芯燃料和首批一半堆芯更换用燃料，直到增殖堆堆芯后处理和它的环绕铀“增殖区”开始提供额外的钚。¹⁴常规 LWR 产生的乏燃料含钚量约为 1%。为了给新的增殖堆提供启动燃料，每年需要对约 18000 吨 LWR 乏燃料（相当于 900 座功率为 1000MWe 的 LWR 所产生的乏燃料，目前全球反应堆数量只有 450 座左右）进行后处理。

增殖堆因为经济性差而未能商业化。钠冷堆的建设成本一般远高于水冷堆，且建设成本是核电站总体成本的主要部分。由于钠在接触水和空气时会发生爆炸，钠冷快堆也因此容易发生事故，难于维护，

这降低了其可用性，并进一步增加了每千瓦时 (kWh) 的发电成本。乏燃料的后处理和含钚燃料的制造成本非常高。铀价大幅上涨，才会抵消这些额外的成本。

过去五十年，天然铀的价格 (以不变美元计价) 由于短期的供需不平衡出现过涨落，但是总体趋势并非上涨 (见图 2)。以价格 100 美元/千克铀价为例，铀的成本仅为 0.2 美分/千瓦时，约为一座新的水冷堆发电成本的 2%。¹⁵

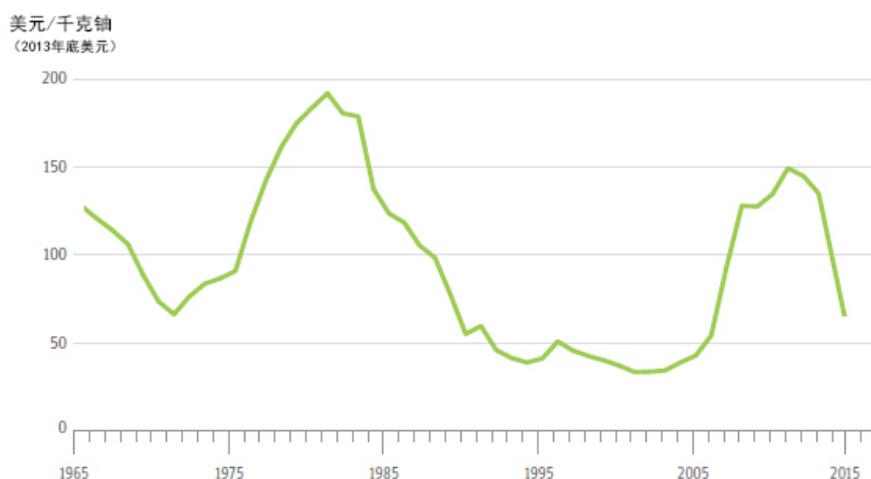


图 2. 美国电力公司 1965—2013 年间支付的平均铀价 (以不变美元计价)。

2014 年所示价格为现货市场价格。数据来源：1965 和 1968—1971 年数据源自《1975 年美国统计摘要》，表 905；1975 到 1980 年数据源自《1991 年美国统计摘要》，表 981；1981 年—1993 年数据源自美国能源信息署 (US EIA) 的《年度能源综述 (2012)》，表 9.3；1994 年—2012 年的数据源自 US EIA 的《铀市场年度报告 (2012)》；2014 年现货市场价格源自《核情报周刊》2014 年 7 月 4 日。GDP 通胀系数引自美国经济分析局。

IAEA 和经合组织 (OECD) 核能署联合发布的《2014 年铀资源红皮书》提出：

“如果以当前反应堆的铀消耗速率为基础进行估算，目前已探明 (铀) 资源储藏量足够使用 150 年。通过开发所有的常规 (铀) 资源储藏量可将上述时间增至 300 多年。”¹⁶

随着 (铀) 价¹⁷上涨，(铀) 资源储藏量也将快速增长。

20 世纪 80 年代到 90 年代，美国、德国、英国和法国都放弃了增殖堆的商业化。¹⁸俄罗斯和印度仍在继续。2014 年，俄罗斯一座新的功率为 800MWe 的原型反应堆达到了临界¹⁹。印度也希望其功率为 500MWe 原型堆在 2015 年实现临界。²⁰

中国有一座功率为 20MWe 的小型实验快中子堆 (CEFR)，于

2011 年并网。CEFR 只生产了相当于一小时满功率输出的电量，此后停止运行三年后才再次运行了 3 天。²¹中国未来的增殖堆开发计划仍存在极大的不确定性。

在轻水堆 MOX 燃料中使用（钚）

已经发现，在轻水堆中使用钚远比使用低浓铀昂贵，使用天然铀的成本约为使用钚成本的约八分之一。关于法国和日本后处理计划的章节中会详细介绍这些情况，法国和日本由于政治原因很难撤销其后处理计划。

乏燃料管理

后处理的拥护者坚持认为，后处理能大幅减少必须在深（地质）处置库中处置的高放废物的体积和寿命。他们提出的最简单的论据就是，轻水堆乏燃料中铀氧化物的质量比约为 95%，如果能将这些（铀氧化物）分离出来，就不需要深埋处置。

这一论断至少存在三方面误导：

1. 后处理产生的放射性废物在进行玻璃固化以备处置时，质量会增加数倍。而且后处理和 MOX 燃料制造产生的新的放射物流也需要进行深地质处置。考虑到上述因素，后处理和轻水堆 MOX 燃料使用钚并不会显著减少需要深地质处置的放射性废物的体积。²²
2. 放射性废物的体积并不能决定处置库的体积和区域大小。在瑞典的处置库设计（这种设计被芬兰和多数正认真计划建造处置库的其他国家采纳）中，在装有乏燃料或固化后处理废物的罐的周围包裹膨润土，必须保持膨润土温度低于沸点，以维持其锁水特性。这就对放入罐中的释热废物的量形成了限制，同时还对罐之间的空间提出了要求，以保障释放的热量不会大幅提升每个膨润土包裹层的温度。基于芬兰处置库的计算，每吨乏燃料的处置空间约为 100 平方米，远远高于基于体积考虑所要求的空间大小。²³因此，放射性废物产生的衰变热总量决定了处置库的空间大小。为回收钚所带来的后处理废物和 MOX 乏燃料产生的总热量，并不比最初未经后处理、直接处置的低浓铀乏燃料产生的热量少。²⁴

3. 剪切乏燃料时，会向空气中释放燃料中的一些放射性气体，主要是氦-85（半衰期 11 年）和碳-14（半衰期 5700 年）。据联合国原子辐射效应科学委员会（The UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation）估计，1997 年因后处理向大气中释放的碳-14 将导致未来 1 万年全球的额外人口剂量为 58000 人-西弗。²⁵相对该时期自然辐射和医学辐射剂量而言，这仅仅只是少量的增加，从这种规模上而言，通过后处理能减少的处置库泄漏的辐射剂量也同样微不足道。

至于后处理拥护者所认为的，后处理可明显缩短放射性废物的衰变期并因此降低其风险，其实也很难实现。因为很难通过 MOX 燃料在 LWR 中一次通过便实现这一目的。在轻水堆 MOX 燃料中反复使用钚以进一步消耗钚的做法也会越来越困难，因为一些钚的长寿命同位素和在 MOX 燃料中钚转化形成的超铀元素无法被水冷堆的慢中子有效裂变。

这为发展成本高昂的快中子反应堆提供了一个新的论据。²⁶但是，瑞典乏燃料处置库的模拟计算发现，钚和其他长寿命超铀元素并不构成填埋乏燃料造成的长期危害的主体。这是因为超铀元素相对而言不溶于深层地下水，也不随之迁移到地表。因此，这些元素的剂量不会占地面人口剂量的主要部分。²⁷

2013 年，法国核安全监管部门法国核安全局（ASN）关于法国的处置库也有类似的结论：

“少数锕系元素的嬗变不会明显改变深地质处置的辐射影响，因为辐射影响主要源自裂变和活化物[产物]……因此，ASN 认为锕系元素[钚和其他超铀元素]嬗变对安全、辐射防护和废物管理方面的好处很少。²⁸

日本经济、贸易和工业部放射性废物管理首席顾问最近也宣布了类似的结论：

“如果我们的目标不是利用资源[即，从乏燃料的铀和钚中提取更多的能源]，那么最好直接对废物进行处置，不进行后处理。”²⁹

钚的处置原则

无论军用和民用分离钚，都可用于制造核武器，这也是为什么乏燃料后处理如此有争议的原因。自印度 1974 年证实“和平”的后处理计划可作为发展核武器计划的基础之后，这一争议性尤其明显。³⁰近

年，在关注国家核扩散问题之外，又增加了对一些地方组织开展核恐怖主义活动的关注。地方组织想利用钚制造核炸弹不太容易，但也不是完全不可能。³¹而且，如果数千克钚氧化物（民用分离钚一般以氧化物形式贮存）被散布到空气中，可能导致大规模恐慌，且可能导致被辐射人群中数百人因此死亡。³²

这就是必须安全贮存分离钚的原因。1994年，美国国家科学院（NAS）有关钚处置方案的研究要求采用“武器贮存标准”，即分离钚贮存和加工中的安保安排应该与核武器的一样严格。³³

NAS 研究小组同时建议，处置后的钚不应该比乏燃料中的钚具有更高的可获取性，这一要求被称为“乏燃料标准”。³⁴在轻水堆乏燃料中，钚以稀释（质量分数约为 1%）、与裂变产物混合的形态存在，裂变产物在燃料组件周边产生伽马辐射场，辐射强度能在约 1 个世纪内保持 1 米外超过 1 西弗/小时的水平。这一伽马辐射场形成了显著的保护。³⁵以 MOX 燃料方法处置（钚）则须满足“乏燃料标准”。将冗余钚和后处理废物（钚就是与这些废物分离后提取的）也面临同样的问题。如果钚被固化并置于地下数千米的孔中，也可能需要满足乏燃料标准。

由于彼此之间的联系，美俄钚处置计划还有另外两项要求：

1. 一国的计划对另一国而言是可接受的。2000 年，俄罗斯仅能接受美国涉及对大多数钚进行辐照、将钚同位素混合比例从武器级转化为非武器级的计划，尽管非武器级钚仍能用于制造武器。³⁶俄罗斯对此事的立场，迫使美国采用将钚制成 MOX 燃料的方案，来处置双方协议中提到的 34 吨钚中的至少 25 吨。
2. 两国同意，一方有权核查另一方的钚处置状况。这一做法与双边核军备控制与削减协议类似，两国按照惯例都相互核查。但他们也同意，如果由 IAEA（负责监控非核武器国家的核材料）展开核查，其他国家会更加重视美俄之间的钚削减协议，进一步促进核裁军。因此美俄的钚处置协议承诺：“一方欲与另外一方展开合作，应提前同国际原子能机构（IAEA）协商并采取必要行动同 IAEA 达成适当的协议，允许 IAEA 就双方的处置计划进行核查。”³⁷

到 2014 年底，俄罗斯和美国尚未同 IAEA 就如何开展两国的钚处置核查达成一致意见，包括未能在含辐照过的处置钚的乏燃料应提交 IAEA 核保障多长时间形成统一意见。

俄罗斯计划继续分离并重复使用钚的做法无疑违背了协商《钚管理和处置协议》的目标之一，即减少地方组织窃取分离钚的风险。³⁸

法国和日本

尽管法国政府和日本政府无限期推迟了增殖堆计划，但两国仍承诺继续开展乏燃料后处理，并决定将后处理生产的分离钚制成 MOX 燃料供轻水堆（LWR）使用。

在法国，从技术角度而非经济角度而言，对低浓铀乏燃料进行后处理和 MOX 燃料中利用回收的钚进展相对顺利。利用 MOX 燃料处置分离钚在法国的欧洲后处理客户，包括比利时、德国和瑞士等，也都进展顺利。截至 2013 年底，这些客户都没有更新与法国的后处理合同，并已经几乎成功处置了所有 AREVA 为它们分离的钚。³⁹

目前，日本的钚利用计划在很大程度上已经失败。日本耗资 22000 亿日元（~220 亿美元）建造的六个后处理厂（RRP）项目已延期近 20 年，目前预计于 2016 年 3 月投入运行。⁴⁰日本已有约 50 吨分离钚。其中一部分由日本东海试验后处理厂分离生产，该厂于 1977 年开始运行，2006 年停运⁴¹；⁴²另一部分由 RRP 在 2006 年—2008 年“热试”期间分离生产；大部分是在欧洲分离生产的，其中英国塞勒菲尔德后处理厂对日本 2683 吨轻水堆乏燃料和 1510 吨气冷堆燃料进行了后处理，法国阿格 UP3 后处理厂对日本 2945 吨轻水堆乏燃料进行了后处理。⁴³

在法国和英国分离出的钚本应自 1999 年开始以 MOX 燃料的形式返还日本，但英国示范 MOX 工厂受有关制造质量控制测量结果的流言影响后关闭，塞拉菲尔德 MOX 燃料制造厂也因其 10 年内平均产量仅为设计产能的十分之一而在 2011 年被放弃。1999 年到 2014 年间，法国向日本运送了包含 4.4 吨日本分离钚的 MOX 燃料，但是日本仅辐照了 1.9 吨，主要是由于地区层面的公众安全关注。2011 年福岛事故后，日本所有核电站都被暂时关闭。

下面我们将讨论法国和日本国家 MOX 计划无法确定的未来。

法国

法国实施 MOX 燃料计划的进展相对平稳，每年从其轻水堆乏燃料中分离约 10 吨钚。这些钚多数被用于制造在法国部分反应堆中使

用的 MOX 燃料。但是，钚的生产量仍超出使用量。自 1996 年法国开始公开披露其钚库存以来，未辐照的民用钚数量平均每年增加 1.5 吨，到 2013 年底，总量达约 60 吨（见图 3）。导致增长的原因是多方面的，其中之一是不可用的 MOX 燃料库存增加。关于这一状况的更多信息可从《直接处置选择》一章中获知。

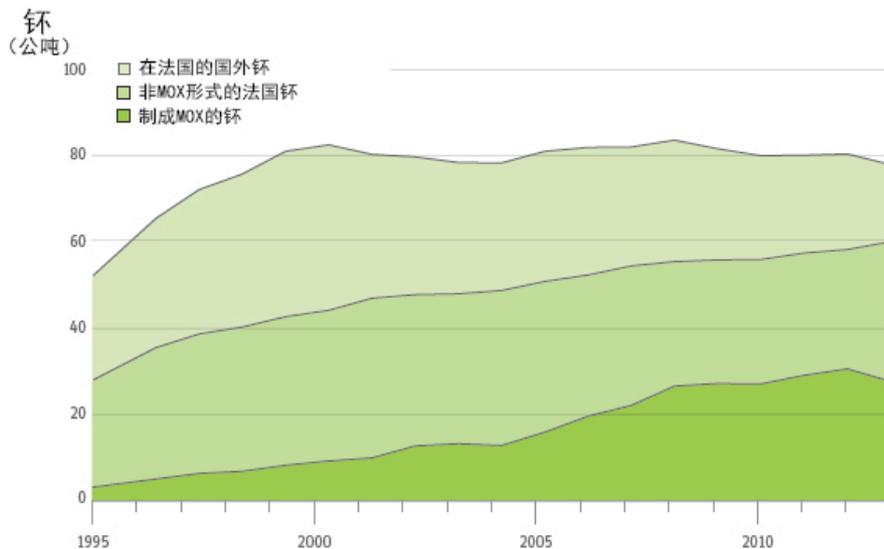


图 3. 法国未辐照民用钚库存增长

由于制造的不可用 MOX 燃料库存增加，法国库存未辐照民用钚库存持续增长。法国未制作成 MOX 燃料的钚库存维持在 30 吨左右。国外客户拥有的、贮存在法国的钚量减少，抵消了法国钚库存的增长。法国几乎所有剩余的国外钚都是日本的。数据来源：IAEA, Communications Received from France Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium, INFCIRC/549/Add5/18, 2014 和之前的年度报告。

法国的 MOX 燃料计划的成本远超过它所节约的低浓铀燃料的价值。法国国家电力公司 (EDF) 已经在向 AREVA 施压以降低成本。最近，国家议会询问委员会建议法国审计院 (相当于美国总问责署)，对法国 MOX 燃料计划进行成本-收益分析。⁴⁴

法国 MOX 计划未来的另外一个不确定性，来源于法国认证可使用 MOX 燃料的 24 座 900MWe 反应堆很快将退役。到 2028 年，法国全部 24 座 900MWe 反应堆将运行满 40 年。⁴⁵

EDF 想要将上述反应堆的寿期延长至 50 年甚至 60 年。但法国核安全监管机构 ASN 的主管警告称，“不一定”能让这些反应堆再继续运行 10 年或 20 年。⁴⁶而且在福岛核事故后，法国下议院表决(初审)，要求法国降低对核电的依赖，2025 年前将核电占比从 75% 降至 50%。

⁴⁷如果先关闭最老的反应堆，那么多数 900MWe 反应堆将被要求关闭。

法国新的 1300MWe 反应堆可以改造为使用 MOX 燃料的反应堆，但这可能需要长时间的认证和高额的反应堆改造费用。EDF 极有可能倾向于考虑成本而放弃铀的分离和使用。2013 年，EDF 向 ASN 提交的一份方案显示，如果法国所有 900MWe 都在运行满 40 年时关闭，那么法国需要在 2019 年停止后处理，以确保能在最后一座被认证可以使用 MOX 燃料的 900MWe 反应堆关闭之前用完所有分离铀。⁴⁸英国只有一座运行反应堆不归 EDF 所有，而 EDF⁴⁹拒绝更新其与英国核退役局的后处理合同。鉴于不再有任何新的国外订单，英国的后处理计划将被迫于现有后处理合同到期后停止（约 2020 年）。

日本

日本开发 MOX 燃料技术的历史可追溯至 50 年前。⁵⁰截至 2014 年 3 月 31 日，日本已在一系列研发设施中制造了含 7 吨铀的 MOX 燃料，其中多数 MOX 燃料是为两座已经关闭的实验快中子增殖堆和已退役的普贤实验重水反应堆制造的。⁵¹有约 1.6 吨铀仍留在未辐照的 MOX 燃料中。⁵²由于增殖堆商业化计划无限期推迟，未来日本可能走法国的路，将分离铀用于制造 LWR 的 MOX 燃料。

迄今为止，日本仅有的大规模 LWR MOX 燃料来源是法国的 Melox 厂，但是日本正在六个后处理厂（RRP）附近建造一座 MOX 燃料制造厂（J-MOX）。和后处理厂一样，J-MOX 也反复延期，按照 2014 年底的规划，J-MOX 将于 2017 年 10 月完工。⁵³

在日本使用法国的 MOX 燃料面临安全关注和地区与公众方面的阻力。激起反对方的最初事件，是在 1999 年披露的从欧洲运往日本的首批 MOX 燃料中英国部分燃料的质量控制文件是伪造的。该事件直接导致 2002 年该批 MOX 燃料被返回英国。⁵⁴这批燃料产自塞拉菲尔德示范设施，该设施于 2001 年关闭。同年，商业规模的塞拉菲尔德 MOX 厂完工，设计产能为每年 120 吨 MOX 燃料。但由于存在设计缺陷，该厂在完工后的 10 年内仅为欧洲反应堆生产了共 14 吨 MOX 燃料，2011 年该厂关闭。⁵⁵在可预见的未来，英国可能不会再生产 MOX 燃料。

法国已经向日本运送了含 4.4 吨日本分离钚的 MOX 燃料，但是大量地方政府官员不允许（反应堆）装载 MOX 燃料。结果日本的 MOX 燃料使用方案延期十多年。

1997 年，日本电力公司承诺在 2010 年前将在 16~18 座核反应堆中使用 MOX 燃料。⁵⁶日本电力公司联盟（FEPCo）发布了针对每座反应堆的计划，综合起来就是每年向反应堆中装载含 9 吨分离钚的 MOX 燃料。⁵⁷到 2011 年 3 月福岛核事故之前，电力公司成功地在四个反应堆中辐照了含 1.9 吨分离钚的 MOX 燃料，这些燃料的制造和所含钚的分离都是在法国完成的。⁵⁸日本未辐照的钚总量为 50 吨，如果 RRP 投入运行，这一数量还会继续增加（图 4）。

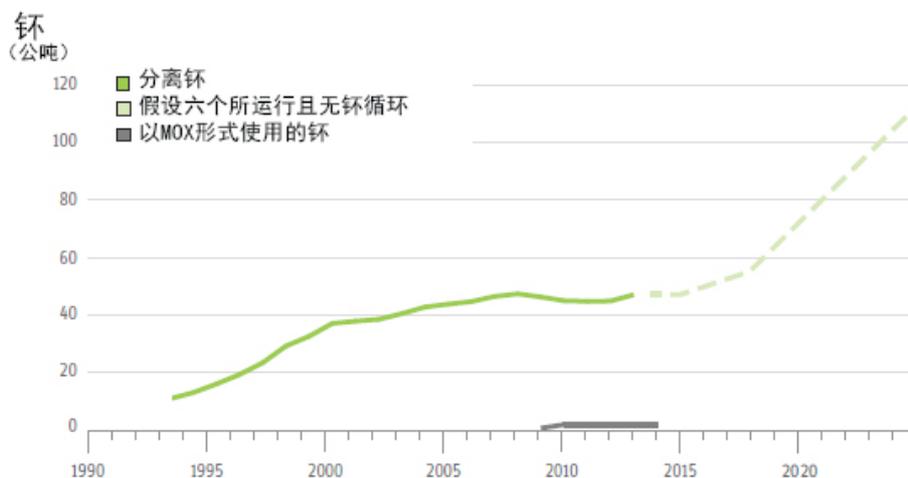


图 4. 日本未辐照钚库存增长情况

虚线：增长预测，假设 RRP 在 2016 年春季开始以其产能的三分之一运行三年，此后按照设计产能（8 吨/年）运行且日本继续延迟以 MOX 燃料的形式使用钚。

下方线：日本累计在轻水堆 MOX 燃料中使用的钚。数据来源：分离钚库存历史增长数据源自日本根据钚管理指导方针每年向 IAEA 申报的数据。日本轻水堆中装载的 MOX 燃料所含钚的数量源自日本原子能委员会《当前日本钚管理现状》（日文版）（The Current Situation of Plutonium Management in Japan）2014 年 9 月出版。

截至 2015 年 2 月底，日本所有反应堆仍处于停堆状态，等候重启决定。重启首先需要得到日本新核监管机构的批准，之后还需所在县和地方政府的许可。2014 年 4 月发布的一份路透社开展的专家意见调查显示，日本现存 48 座反应堆中，“14 座可能在某一时间点重启，另有 17 座不确定，最后 17 座可能永远不会重启。”⁵⁹即便如此，截至 2015 年 2 月中，日本电力企业联盟（FEPCo）网站上仍继续宣称“日本电力公司计划最迟在 2015 财年前在 16~18 座反应堆中使用 MOX

燃料”。⁶⁰日本的 2015 财年从 2015 年 4 月 1 日开始，到 2016 年 3 月 31 日截止。

截至 2013 年底，日本在 RRP 贮存了 3.6 吨分离钚，等待六个所 J-MOX 厂完工。不仅如此，建造和运行 RRP 与 J-MOX 两座设施的日本核燃料公司计划，RRP 一旦获得安全认证就将立即启用。根据 2014 年底的计划，RRP 将于 2016 年 3 月开始运行。⁶¹同时，日本在法国和英国分别贮存着 16.3 吨和 20 吨钚，等待签署合同并制成 MOX 燃料后返回日本。⁶²自 2011 年英国决定放弃塞拉菲尔德 MOX 工厂后，英国已不具备执行 MOX 合同的能力，但英国承诺可以回收和处置这些钚，前提是日本愿意支付足额费用使上述安排具有商业吸引力。截至 2014 年底，日本尚未接受上述承诺。让日本向其他国家支付费用以拿走它拥有的钚这一思路与日本政府的立场相冲突，日本政府认为分离钚是一项资产。

日本近期不会使用分离钚，它声称的启动后处理厂的目的是为了几乎已经装满的 3000 吨 RRP 乏燃料水池腾出空间，来接受另外的从日本国内核电站运来的乏燃料。⁶³同时，日本青森（Aomori）县（RRP 所在县）也声明，在 RRP 开始商业运行前，不允许在已完工的容量为 3000 吨的陆奥（Mutsu）乏燃料干法贮存设施（也位于该县）存放乏燃料。最近 RRP 的计划启动时间已经从 2014 年 10 月推迟到 2016 年 3 月，陆奥贮存设施的计划启动时间也从 2015 年 3 月推迟到 2016 年 10 月。⁶⁴

英国

英国正在为其民用分离钚库存寻找一项长期管理战略,预计英国的库存钚总量到终止后处理厂运行前可达 140 吨(见图 5)。⁶⁵其中有 20 多吨是为其他国家(主要是日本)生产的钚,英国已提出愿意在“商业化安排可行的情况下”⁶⁶接收这部分钚库存。

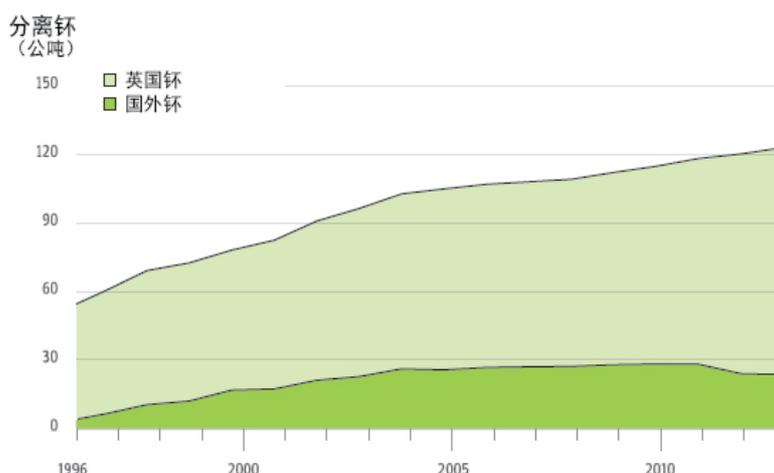


图 5. 英国民用分离钚库存增长情况

自英国开始向 IAEA 申报钚库存数量开始。数据来源: Communication Received from the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium.INFCIRC/549/Add8/17 (2014 年 8 月 15 出版) 及之前的年度报告。

英国 1994 年终止增殖堆计划后,一直没有处置分离钚的计划。针对国外钚的管理,英国也只是计划将其制成 MOX 燃料然后返还给来源国。然而,2011 年用于处理国外钚的塞拉菲尔德 MOX 燃料厂废弃,针对国外钚的计划便无法实施。塞拉菲尔德 MOX 燃料厂被废弃的原因是 10 年来其产能仅达设计产能的十分之一,⁶⁷且该厂在任何情况下都不能用于处置本国的分离钚,因为英国仅有的轻水堆属于 EDF,而 EDF 明确表示对使用 MOX 燃料没有兴趣。当前英国管理分离钚的政策是将其存放在塞拉菲尔德的后处理场址(见图 6)。

贮存以备将来使用

英国在终止增殖堆开发计划后,经历了漫长曲折的钚处置方案

开发历程。2005 年前，国有企业英国核燃料公司 (BNFL) 负责开发钚处置方案。1998 年，其方案是将英国的分离钚贮存起来“用于未来的热[慢]或者快[中子]堆”⁶⁸。然而就在同一年，这一消极的观点受到了英国皇家学会 (Royal Society) 国家科学院赞助的一份研究的挑战。这一研究可能受美国国家科学院 1994 年关于美国冗余武器钚问题研究的启发。⁶⁹1998 年皇家学会研究认为，目前英国没有开发民用钚库存处置策略⁷⁰是件“令人头疼”的事情，他们督促政府同时考虑 MOX 燃料和固化深埋两种方案。



图 6.英国塞拉菲尔德生产和剩余贮存

该设施 2011 年投入运行，钚罐被存放于分开的箱子中，以防发生临界事故。

第二年，BNFL 成立了一个钚工作小组，根据股东意见“为 BNFL 管理和减少分离钚库存开发和推荐方法。”⁷¹小组 2002 年发布的工作报告称，MOX 燃料可用于英国最新的两座气冷堆 (AGR) 和唯一一座轻水堆 (Sizewell B，为法国所有)。报告还督促英国就一系列固化方案开展实质性工作。这些工作包括在塞拉菲尔德 MOX 厂 (该厂于 2001 年完工) 完成国外后处理客户的 MOX 燃料制作商业合同后，生产“低规格 MOX (low-spec MOX)”。⁷²生产低规格 MOX 燃料 (可能仅仅是将燃料球封装到容器里) 将遵循比实际燃料更为宽松的规格

要求，并将直接处置在深地质处置库中。同时，两位独立分析师首次给出了几种主要处置方案的成本估计，得出的结论是，制成低规格 MOX 燃料并进行直接处置的成本最低。⁷³

偏爱 MOX

BNFL 于 2005 年被英国核退役局 (NDA) 取代。NDA 开始着手承担钚处置责任，并聘请一群顾问 (多数是 BNFL 以前的员工) 就未来铀和钚管理的“微观经济性”展开研究。他们对永久贮存、以废物形式处置和用作快堆燃料三种方案进行了成本估算。在未能提供可查依据的情况下，顾问们认为最后一种方案将产生利润。⁷⁴

2007 年，英国皇家学会再次研究这一问题，在一份新的报告中，反对任何超出现有合同的钚分离工作。在这份报告中，它强烈主张将 MOX 方案作为处置英国国内和存放在英国的国外钚的“最佳方案”，但同时承认，如果不建设新的反应堆，那么将无法以 MOX 燃料的形式处置全部库存钚。皇家学会因此推荐将剩余钚以 MOX 燃料球的形式贮存起来。这样可以减少贮存设施在遭到恐怖分子袭击时，钚以可吸入粉末形式弥散的风险。从长远角度而言，在深地质处置库投入运行时，能将燃料小球直接处置在深地质处置库中。⁷⁵

2008 年，NDA 宣称，不能接受对钚永久贮存的方案。NDA 还拒绝了 2007 年其顾问组研究的结论，即以 MOX 燃料形式处置钚能产生利润。⁷⁶2009 年，NDA 发布一份关于管理英国分离钚的可选方案中“可靠方案”的报告。该报告并未将在英国反应堆中使用 MOX 燃料作为可能的方案，原因是 EDF (当时正在收购英国的反应堆) 反对这一做法。⁷⁷

最终发现，成本最低的钚管理方案是将其永久贮存和“出售”——但实际上，是支付其他国家资金 (假设是法国)，让他们将钚运走。考虑的其他方案有将钚混入水泥或者熔融玻璃中，通过热等压工艺 (HIP) 固化在陶瓷或玻璃中，利用现有塞拉菲尔德 MOX 燃料厂或新设施将钚制造成低规格 MOX 燃料小球，以及将钚制成加拿大重水堆或欧洲轻水堆的 MOX 燃料。然而，在已发布的报告中，所有成本数据都不完整，只有一张归纳图给出了不同方案的相对成本。⁷⁸

NDA 在 2010 年发布的可靠方案报告修订版中，补充了未来在英国本国轻水堆中使用 MOX 燃料的方案。⁷⁹NDA 还透露，已经向加拿

大原子能公司和 AREVA 提交“低价值”合同，以就使用 MOX 燃料方案向它们寻求建议。⁸⁰据报道，AREVA 建议，在清污后，英国 99.8% 的钚可以通过 MOX 方案处置⁸¹，并认为在英国轻水堆中使用 MOX 燃料“几乎没有缺点”。⁸²

考虑的替代方案

2011 年英国能源和气候变化部 (DECC) 咨询报告首度作出官方回应，提出一项“初步政策观点”，支持在本国和海外使用 MOX 燃料。这一观点的主要依据，是 MOX 燃料处置是一种“经验证的成熟技术”，其他处置技术都不够成熟。⁸³尽管 EDF 公开声明反对在英国使用 MOX 燃料，但英国政府仍鼓励其他国家电力公司在英国建造轻水堆。DECC 指出，只要有两座新的大型轻水堆使用 40% MOX 燃料运行，就能在 60 年内对英国所有的钚库存进行辐照。⁸⁴

针对固化方案，报告指出，MOX 乏燃料所含易裂变产物形成周边伽马辐射场，使得 MOX 乏燃料比未经辐照的固化钚具有更高的内在安全性。因此，DECC 称，在地质处置设施尚未到位之前建造固化厂是“不明智”的做法，因为需要为固化产物建造新的安全贮存设施。这一说法似乎让英国政府无法认真考虑任何一种固化方案，因为英国政府为钚处置计划预留的理想时限是 25 年 (即 2036 年之前)，但目前却没有可能在 21 世纪 40 年代前建好处置库。

2011 年底，DECC 对 2011 年初的咨询作出回应，确认了它优先选择 MOX 方案的政策。同时，DECC 还给出时间表，建议监管部门在 2014 年底完成所需的“合理性证明”工作，即提供证据证明 (采用 MOX 方案) 利大于弊。然后，就可以在 2019 年前启动 MOX 燃料制造厂的建设工作。⁸⁵DECC 在 2012 年和 2013 年发布了一系列文件，向开发者阐述其结论并提供指导。⁸⁶

2013 年期间的新开发工作推迟了政策制定进度。2014 年 1 月，NDA 编制了一份叙述这些开发工作的报告：⁸⁷

1. 英国期待的首批新一代轻水堆 (两座功率 1650MWe 的欧洲压水堆 (EPR)，将由 AREVA 建造，EDF 运营)，建设工作已经推迟启动。欧洲委员会 (EC) 正在评估英国为上述反应堆所发电力提供的高价格保证。2014 年 10 月⁸⁸EC 的批准最初似乎是鼓励其他运营商-电力公司组合建造另外的轻水堆，但奥地利政府 2015 年初宣布会对 EC 为项目提供“国家补助”一事向欧洲法庭提出上诉。

如果法院受理了该上诉 (似乎极有可能) , 那么 (项目) 将至少再延期 2 年。⁸⁹如果项目最终存活, NDA 还需另外数年, 才能和电力运营商就后续提议的 LWR 使用 MOX 燃料问题展开协商。⁹⁰

2. 对英国铀库存进行进一步分析, 认为只将 85% ~ 90% 的铀制成 MOX 燃料才具有成本效益。⁹¹因此约 12 ~ 14 吨铀可能需要固化处置。
3. 最后, 坎杜能源公司和通用-日立公司提供了其他辐照英国铀的反应堆方案, 且 NDA 鼓励它们将这些想法深化为提案。⁹²坎杜能源公司提议建造两座功率 700MWe 的 CANDU-6 型重水堆, 通用-日立公司则提议建造两座功率 311MWe 的 PRISM 钠冷快堆。⁹³通用-日立公司称, 英国全部铀库存 (包括 10% ~ 15% 不适合制成轻水堆 MOX 燃料的铀) 都能转化为 PRISM 金属铀-铀-锆合金燃料。

⁹⁴

坎杜能源公司和通用-日立公司都建议在塞拉菲尔德后处理场址附近建造它们的反应堆。两者都称, 为各自反应堆制造铀-钍燃料的成本比为轻水堆制造 MOX 燃料低。因此, 有可能让它们资助建造各自的反应堆, 同时英国可以将一部分本来计划用于建设轻水堆 MOX 燃料制造厂的经费投入到这一项目中。另外, AREVA 一个功率 1.65GWe 的轻水堆预计建设成本 (不含建造期间的利息) 高达 80 亿英镑 (7760 美元/kWe) (这已使英国政府为其生产的电力做出了高价格保证)⁹⁵, 为成本高的重水堆和钠冷堆的发展创造了空前的机会。

NDA 明显认为 CANDU-6 型反应堆方案是可靠的选择, 原因是: 目前全世界有 11 台 CANDU-6 型重水堆在运行;⁹⁶其 MOX 燃料的制造过程与轻水堆中使用的 MOX 燃料相似; 这种反应堆的建造可能有股权投资者愿意介入。相对而言, PRISM 钠冷快堆还是一种“停留在纸面上的反应堆”, 即这种反应堆尚未建成; 另外液态钠冷快堆系统历史上就有很多问题, 自 1994 年英国原型快堆关闭以来, 许多安全问题尚未被英国安全监管系统解决。

另外, 辐照后的 PRISM 燃料将对 NDA 所谓的 (乏燃料) 处置构成“独一无二的挑战”。⁹⁷燃料棒中含有钠, 用于将燃料“芯块”产生的热量传递至燃料包壳。这导致乏燃料可以自燃, 即在接触到水时瞬间燃烧, 因此无法地下处置。美国认为, 这与实验增殖反应堆 II (EBR-II, 功率 20MWe, 运行时期 1963—1994 年, PRISM 设计是基于该堆型)

的“含钠 (sodium-bonded)”乏燃料的情况是一样的。2006 年，美国启动了一项计划，将 3 吨含 0.6 吨钚的乏燃料转化为可接受的废物形式。这项计划耗资约 2 亿美元，或说 3.3 亿美元/吨钚。⁹⁸如果英国处置后处理遗留钚的昂贵计划需要对处置废物体进行后处理的话，那就具有讽刺意味了。NDA 可能更有兴趣鼓励坎杜能源公司和通用-日立公司与 AREVA 争夺英国钚处置合同，以降低成本。⁹⁹

同时，英国国家核实验室正在塞拉菲尔德后处理场址建立一套钚固化流程，让被污染的钚氧化物能在玻璃基体中固化为相对不溶的晶体。这一将粉末转化为固体复合物的流程被称为“热等静压工艺 (hot isostatic pressing)”。在此流程中，粉末被置于高压 (1000 个标准大气压)、高温 (1200—1300°C) 环境 8 到 9 个小时。¹⁰⁰

上述流程产生的圆柱体材料每个含质量分数高达 10% 或重约 2kg 的钚。¹⁰¹最初，(英国) 仅计划将 0.1 公吨的钚用上述方法固化，但考虑到英国 140 吨钚中有 14 ~ 21 吨分离钚杂质太多不适合用作 MOX 燃料，上述流程的规模可能会扩大。

英国制定公共决策的新自由主义氛围以及固化方案技术供应商的缺乏，使得英国很难认真考虑处置其所有的分离钚。

美国

1994年，在大幅削减冷战核武库的情况下，美国宣布其85吨用于制造核武器的武器级钚中有38.2吨冗余。¹⁰²美国还宣布有7.5吨冗余的非武器级钚，这些钚一部分是由纽约州运行时间较短（1966-72年）的商用西谷后处理厂分离的，还有一部分是美国1983年放弃增殖堆和民用后处理计划前从国外获取的。¹⁰³

一些冗余武器级钚以稀释形态存在于核武器生产过程产生的废物中。截至2009年，有4.5吨这种钚在能源部（DOE）位于新墨西哥州的深地质处置库——废物隔离示范设施中处置。¹⁰⁴但这一削减量并未能赶上增加的冗余钚量，2007年美国宣布另外增加了9吨冗余武器级钚。因此美国共有约50吨冗余分离钚。

DOE决定将除武器“弹芯”外的所有冗余钚合并贮存到萨凡纳河场址的K-区材料贮存设施（见图7）中。¹⁰⁵DOE位于德克萨斯州阿马里洛的潘特克斯弹头组装/拆卸厂存放了1万多枚含冗余钚的核武器“弹芯”，等待提取其中的钚。



图7.美国能源部萨凡纳河场址的钚贮存容器

K-区材料贮存设施存放了约13吨美国冗余钚。每个贮存容器高约0.9米，直径0.5米，可装钚量达4.4kg。为了保护内部小罐封装的钚，外部容器足够大以预防相邻小罐所装材料引发链式裂变反应。¹⁰⁶数据来源：H.Allen Gunter（高级技术咨询和助理经理，核材料固化工程，萨凡纳河运行办公室）向公民咨询委员会核材料委员会（Citizens Advisory Board Nuclear Materials Committee）做的汇报，2009年4月。

最初：双轨处置战略

1997 年，DOE 决定同时采取两种不同的钚处置路线¹⁰⁷，即：

1. 制成 MOX 燃料用于轻水堆 (LWR)；
2. 在萨凡纳河场址和汉福特场址，将钚和后处理废物一起固化在玻璃中 (玻璃固化)。

美国同时采用固化和 MOX 方案的原因是冗余钚中有一部分并非来源于弹头弹芯且已被其他材料污染，而移除污染材料以便这些钚可用于制造 MOX 燃料的成本很高。此外，

“同时采取固化和制成 MOX 燃料两种方案……能为防范因只实施两者中任何一种方案所带来的不确定性提供重要保障。”¹⁰⁸

2000 年，DOE 决定在萨凡纳河场址建造一座 MOX 燃料制造厂和一个钚固化厂。计划将高达 33 吨钚制成 MOX 燃料，并至少固化 50 吨钚中的 17 吨不纯钚。¹⁰⁹

同年，俄罗斯和美国签订了一份《钚管理和处置协议》，双方同意同步削减各 34 吨冗余的武器级钚。俄罗斯谈判代表反对美国对协议提及的美方 34 吨武器级钚的任意量进行固化，他们认为钚只有在反应堆中辐照才能改变其同位素组分，从武器级钚变为非武器级钚。作为折中，美国将把 34 吨钚中的至少 25.6 吨以 MOX 燃料的方式进行处置。¹¹⁰很明显，DOE 计划将协议范围外的钚以固化形式进行处置。

DOE 选择的固化方法是“罐中罐”方法：首先将钚转化为氧化物，然后以质量分数约 10% 的比例混和到陶瓷“小球 (pucks)”中；将混合物填入直径 6cm、高 25cm 的钢罐中，每个钢罐能装 1kg 钚；将 28 个钢罐装入 3 米高的大罐框架中，在大罐内部，小钢罐之间填充有熔融的高放废物玻璃。¹¹¹最终的废物体将贮存在萨凡纳河场址，直到放射性废物处置库投入使用，萨凡纳河还在生产其他玻璃固化高放废物罐。每个大罐可存放约 28kg 钚，处置 50 吨钚将需要约 1800 个玻璃固化高放废物罐。

将钚固化到高放废物玻璃中的目的，是在罐周围形成一道“自我防护”的伽马辐射障碍，以满足国家科学院的“乏燃料标准”。几乎所有这种辐射场都与半衰期 30 年的裂变元素铯-137 的衰变有关。

有关集中于 MOX 方案的决定

2002 年，布什政府认为只采取一种钚处置方案的成本更低。考虑到俄罗斯坚持要美国以 MOX 燃料方式处置《钚管理与处置协议》（PMDA）涉及的 34 吨钚，美国决定以 MOX 燃料方法处置涉及的所有 34 吨钚。能源部告知国会，建造和运行 MOX 燃料制造厂的净成本将达 21.5 亿美元（以 2014 年美元计约为 28 亿美元）。¹¹²

美国负责处置 PMDA 协议涉及的 34 吨冗余钚的机构是能源部下国家核军工管理局（NNSA）。不在 PMDA 协议范围内的冗余钚则由能源部环境管理（EM）办公室负责处置。对于不包括在 PMDA 协议中的 17 吨冗余钚，布什政府的决定未给出明确的处置路线。

2007 年，布什政府宣布，可能以 MOX 燃料方式处置剩余 17 吨冗余钚中的 4 吨。2 吨可以和萨凡纳河场址的槽贮废物混合然后进行玻璃固化，7 吨可以固化在玻璃中以“罐中罐”形式和萨凡纳河场址的高放废物一起处置，预计估算费用约为 8 亿美元。¹¹³ 4 吨留在爱达荷州国家实验室的零功率物理反应堆（ZPPR），以便“未来规划使用”（这一决定于 2012 年被推翻）。¹¹⁴

有一份明显可作为上述决定部分依据的研究报告称，从 2011 年起，有 13 吨钚可以利用 6 年时间以“罐中罐”方式进行处置。可以在存放非弹芯钚的萨凡纳河场址 K 区设施生产装有玻璃固化钚的罐。¹¹⁵

尽管 2000 年到 2013 年间每年几乎都会对计划进行修改，¹¹⁶但事实上，针对非弹芯钚的处置计划从未启动过。¹¹⁷

MOX 方案逐渐“在经济上难以负担”

到 2013 年，在萨凡纳河场址建设的 MOX 燃料制造厂（MFFF）的建设进度和成本已明显超出控制。该场址发布其 2014 财年预算案时，奥巴马政府就宣布“由于成本增加和财政压力，当前的钚处置方法可能难以负担……”。¹¹⁸

主承包商 Shaw AREVA（现在是 CB&I-AREVA）MOX 服务公司给出的费用估算已经大幅上升。增长的部分原因是 MFFF 增加了一个“水抛光”区，导致其规模扩大了一倍。水抛光涉及钚的溶解和化学处理，以清除可能降低 MOX 燃料产品品质的杂质，然后将清除了杂质的钚转化成氧化物。成本上升的其他原因包括：MOX 燃料制造

厂的制造部分需要重新设计，以满足美国的安全和安保要求；供应商无法满足 DOE 的核质量标准；人员薪酬被低估，符合核认证要求的人员的生产率被高估；符合核认证要求的人员迅速离职，前往东南部核电站建设工程工作。¹¹⁹

到 2013 年，主承包商估计，MFFF 和相关废物固化建筑(Waste Solidification Building, WSB) 的建造成本为 83 亿美元，MFFF 和 WSB 的运营成本为“每年 6.4 亿美元，处置 34 吨钚需 15 年，成本共计 180 亿美元”。¹²⁰以不变美元计价，这一成本相比 2002 年的估计增长了 6 倍。2015 年，美国陆军工程兵团 (Army Corp of Engineers) 给 DOE 做的一份评估将成本又提高了 40%，总额达 250 亿美元。¹²¹这一成本还不包括 MFFF 和 WSB 完成任务后的退役成本，也不包括从武器“弹芯”中提取钚的成本、处置钚污染的废物的成本、MFFF 及 WSB 的安保成本。

大量能源部核武器相关的项目也都面临巨额成本超支问题，国会在所有的可自由支配开支上都施加了严格的预算限制。因此美国政府提议，将部分完工的 MOX 工厂 (见图 8) “[在政府评估]其他替代性钚处理技术时，置于冷备用状态……这样能更快、成本更低地找到安全稳妥的解决方案。”¹²²



图 8.美国在建的 MOX 燃料制造厂

2014 年 10 月 25 日，南卡罗来纳州能源部萨凡纳河场址。资料来源：High Flyer, Savannah River Site Watch。

在建的 MFFF 位于南卡罗来纳州，萨凡纳河场址很大一部分劳动人员来自乔治亚州，包括 1585 名 MFFF 建设人员。¹²³因此，这两个州的国会代表进行了争论，并为 2014 和 2015 财年继续开展建设工作分别争取了 3.43 亿和 3.45 亿美元经费。2015 年 1 月，随着共

和党在参议院占据多数席位，奥巴马政府没有等国会采取行动，直接在递交国会的 2016 财年预算案中另外增加了 3.46 亿美元经费。¹²⁴按照这一速度，参考奥巴马政府提交的同一份预算给出的成本概算，可能还需要 20 年才能完成 MOX 燃料厂的建设。

国会拨款委员会的一些重要成员似乎意识到了这一问题。在 2015 财年拨款法案中，要求 DOE 下属负责钚处置的国家核军工管理局 (NNSA) 在法案生效[2014 年 12 月 16 日]后 120 天内，向众议院拨款委员会和议员提交一份独立核算的完成建造、运营 MOX 设施方案和在处置库稀释、处置这些材料方案的全寿期成本概算。”¹²⁵

众议院和参议院军事委员会在《2015 年国防授权法》中提出了一项更详细的报告要求。¹²⁶

同时，能源部迫于压力，开始从萨凡纳河场址转移走钚。根据南卡罗来纳州国会代表已经写入法律的一份协议，如果 MOX 燃料制造厂未能在 2014 年投入运行，那么 2016 年前需从萨凡纳河场址转移至少 1 吨钚，且所有 2002 年 8 月 15 日后转入的钚都需在 2022 年转移走。与未达到这些要求有关的处罚将需要国会拨款，而且 2016 年这个截至期限也是通过修订从之前的 2011 年 1 月变更来的。¹²⁷

2014 年 4 月，奥巴马政府的钚处置工作小组发布了一份 MOX 替代方案的初步评估报告。¹²⁸考虑的替代方案有：

1. 在 DOE 的深地质超铀废物隔离示范设施 (WIPP) 中稀释并处置；
2. 以“罐中罐”方式将钚嵌入玻璃固化的后处理废物中；
3. 在深度超过 5km 的钻孔中处置；
4. 在 1~2 座新的液态钠冷却快中子反应堆中辐照，英国也在讨论这一方案（见前文）。

至少还有一项有关 MOX 替代方案的独立研究。¹²⁹

废物隔离示范设施

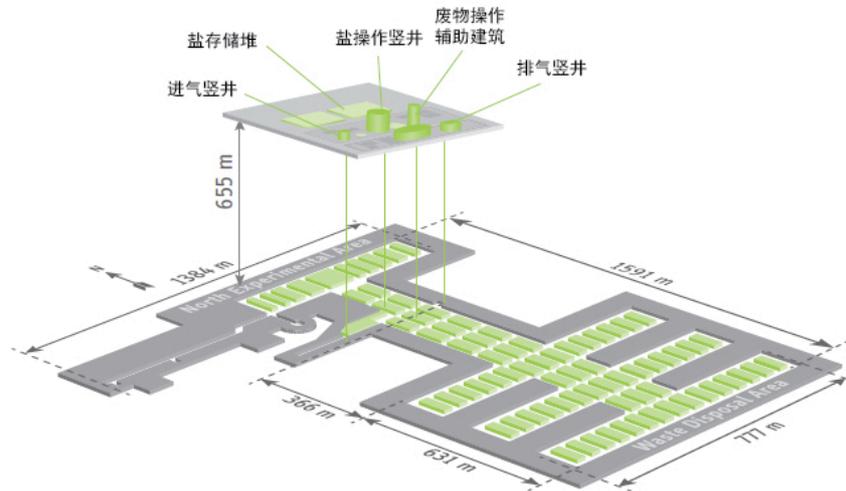


图 9.美国能源部废物隔离示范设施（WIPP）

位于新墨西哥州卡尔斯巴德（Carlsbad）附近。武器研发和生产制造产生的钚污染废物在此处置。资料来源：Improving Operations and Long-Term Safety of the Waste Isolation Pilot Plant（National Academy Press，2001），图 1.2.

工作小组发现，成本最低的钚处置方案是在 WIPP 中掺混（稀释）和处置，成本约为 30 亿美元。¹³⁰

DOE 已经在小规模实施这一处置方法。2011 年，DOE 授权掺混和处置“内装管道容器（pipe-overpack container）”中的钚。贮存在萨凡纳河场址的内装管道容器是一个中心有 6 英寸（15cm）管道的 55 加仑（200 升）桶¹³¹，其装有 0.585 吨钚氧化物粉末。¹³²钚氧化物将以质量分数低于 10%的比例与一种被列为“终极保障”的材料混合，此后钚很难以化学方式再分离出来。

由于吸入人体的钚粒子具有极高的致癌性，¹³³所以从“DOE-3013”标准贮存容器中移出钚氧化物粉末、将其与管道中的稀释物混合的操作都是在手套箱中进行的。手套箱内的气压比外界低，不会出现任何向外的泄漏。手套箱内部空气经高效过滤器排出（见图 10）。



图 10.位于前塞拉菲尔德 MOX 燃料制造厂的手套箱流水线

资料来源：英国核退役局

在初步的处置运行中，每个桶中装的钚量限制在低于 175 克。¹³⁴ 每千克钚的处置成本估计为 10 万美元。¹³⁵DOE 钚处置工作小组认为，在 55 加仑桶中另外增加支撑内部管道的木质盘，可以形成“临界控制二次包装”容器，¹³⁶装载量可提高至相当于 380 克易裂变材料，即每桶可装 380 克钚-239。¹³⁷这样能将处置成本降低至约 6.8~8.8 万美元/千克钚¹³⁸，相当于目前估计的 MOX 方案处置成本的十分之一。

为了完成这一任务，钚处置工作小组预计还需在萨凡纳河场址钚贮存设施再建造两条手套箱流水线，萨凡纳河场址和 WIPP 需额外雇用 200 名工作人员。每条手套箱流水线每班能填充一个空桶。假设每个桶平均装 340 克钚，稀释和封装工作 24 小时不停，每年每条手套箱流水线累计能处置的钚量可达 0.4 吨，3 条流水线可处置的钚量为 1.2 吨。如果在位于新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯国家实验室钚处理设施中建设类似的处置能力，那么每年能处置的钚量将翻倍。¹³⁹

按照每个桶处置约 340 克钚计算，处置 DOE 所有 50 吨冗余钚需要约 15 万个空桶。理论上，在 WIPP (图 9) 规划的总共 7 个处置室中 (见图 9)，1 个处置室可存放 9 万个桶。但事实上，6 个已经封闭的处置室中，每个实际装载的废物平均为 7.5 万桶。¹⁴⁰考虑到 DOE 其他场址的钚污染废物的处置要求，DOE 钚处置工作小组在 2014 年的报告中称，在不增加规定体积限制的情况下，仅能在 WIPP 稀释并处置 13 吨钚。¹⁴¹忧思科学家联盟全球安全计划高级科学家

Edwin Lyman 称，为其他废物保留的空间未被全部利用，这些空间能存放超过 10 万个 55 加仑桶。由于 WIPP 现存的一些处置室在尚未装满之前就已经用墙隔开，为存放批准数量的废物，需要建造数量超出最初规划的处置室。¹⁴²

DOE 钚处置工作小组和 Lyman 都建议寻求增加每个桶的钚容量的方案。美国政府法规要求，如果每个 55 加仑桶中可存放的钚量增加至 1 千克甚至更多，需要更严格的安保和安全安排。¹⁴³即便装载量较低，一项独立评估也可能建议提高安全性。桶中装钚的管道长度稍稍超过 0.6 米（2 英尺），直径约为 15cm（6 英寸）。如果不对人员、材料和上升到地表的通道进行严格监控，存在管道被拆卸并从处置库中转移的可能。盗取 20 根以下的管道，每根管道含钚 340 克，便相当于长崎核炸弹 6 千克的钚装载量。因此，应在处置库进入通道安装能监测钚中瞬态裂变所发射中子的仪器。¹⁴⁴

2014 年 2 月 14 日，贮存在 WIPP 的一个废物桶发生了小规模化学爆炸，并释放了钚和镅污染的烟雾，造成设施及地表通风排出口一些工作人员的轻度污染。洛斯阿拉莫斯国家实验室的一个废物桶也发生过化学反应。¹⁴⁵根据 DOE 目前的修复计划，WIPP 存放含类似同种爆炸物的容器的屋子都将用墙体隔离开，地面部分含类似物质的容器也将在填埋之前固化。它们希望能在 2016 年初前重新启用该设施，但从萨凡纳河场址向外运送的工作在 2018 年前可能无法继续。

¹⁴⁶

WIPP 的未来很大程度上依赖于 DOE 能否重新获得新墨西哥州的信任。从 1978 年到 2004 年，DOE 为新墨西哥州安全与环境部的一个环境评估小组提供经费，让他们就 WIPP 安全问题提供独立建议。¹⁴⁷DOE 可能收到强烈建议，要求资助该小组重建。

DOE 钚处置工作小组的报告提出一种可能，即假如无法获得许可，来扩大 WIPP 任务范围以涵盖处置美国所有冗余钚，那么也许可以新建一座处置库。WIPP 建于 20 世纪 80 年代，耗资 7 亿美元（以 2013 年美元计价，为 14.7 亿美元），但如果“按照今天的设计、建造和运行标准，其成本明显会更高”。¹⁴⁸即便如此，成本还是远低于 MOX 方案。

罐中罐

对于罐中罐固化方案，DOE 钚处置工作小组发现，与之前 DOE

的分析一致，再也没有可能在萨凡纳河场址 (SRS) 以这种方式固化美国 34 吨冗余钚。

“因为 SRS 近一半高放废物已被处理，因此没有足够的剩余高放废物来处理 34 公吨冗余钚。另外，萨凡纳河国防废物处理设施 (DWPF) 计划 2032 年前完成运行，届时很有可能还没有设计和建造新的固化设施。”¹⁴⁹

因此工作小组称，如果采取罐中罐方法，就必须在汉福特场址建设一个固化工厂，而该场址正在建设一个大型废物处置和固化工厂 (其中包括一个高放废物玻璃固化单元)。这一方案的成本几乎和 MOX 方案的成本一样高，因为汉福特场址不像萨凡纳河场址那样拥有钚管理和安保基础设施 (包括 K-区钚贮存设施和相关评估钚容器状态、重新封装钚容器的能力)。¹⁵⁰

两年前，已经出现过几乎相同的陈述，当时预计的玻璃 (固) 化完成时间比现在早 6 年。¹⁵¹事实上，萨凡纳河场址几乎没有固化过铯-137 (铯-137 能在含钚的高放废物罐周围形成保护性的伽马辐射场)，因为从高放废物贮槽内的盐中分离铯-137 的工艺失败，所以需要建造一个新的含盐废物处置设施，而该设施的完工日期已拖后数年，成本急剧上升。据 2014 年底预计，该设施将在 2018 年 12 月至 2021 年 1 月的某一时间投入运行。¹⁵²同时，贮槽底部含少量铯-137 的泥浆被玻璃固化。截至 2013 财年底，萨凡纳河场址的高放废物贮槽中的液体和盐块中仍含有约 7300 万居里的铯-137。¹⁵³

DOE 对罐中罐方案采用的自保护标准是，罐填充 30 年后产生的辐射剂量水平至少需达到 1 米处 1 西弗/小时。¹⁵⁴这要求每个罐中需装入 11000 居里 (约 125 克) 的铯-137。¹⁵⁵按照每个小罐装 0.6 千克钚、每 28 个小罐装入一个大罐计算，¹⁵⁶需要约 3000 个大罐装 50 吨冗余钚，所有固化废物总计需包含 3300 万居里铯-137。截至 2014 年底，能源部已在萨凡纳河场址装填 4000 个高放废物罐 (从 1996 年开始)，预计未来还需要封装 4600 罐。¹⁵⁷能源部承诺每年完成 200 个罐的封装任务，按照这一进度，封装任务可于 2037 年完成，但近年 DOE 每年仅封装 125 罐。¹⁵⁸

2004 年的一项设计研究发现¹⁵⁹，如果有可能以罐中罐方法，从 2020 年开始每年固化 2 吨钚，那么 32 吨钚可以在 2037 年前全部固化。在萨凡纳河场址的玻璃固化工作完成后，DOE 可以将装有固化钚的小罐运往汉福特场址，将它和汉福特场址生产的高放废物玻璃固

化体一起装入大罐中。这将需要一个安全的建筑物，来接收这些小罐并将其装入大罐中，但不再需要其他钚相关的基础设施。

在 2015 财年《国防授权法》中，华盛顿州国会代表加入了一条禁令，反对 DOE 在未能在汉福特场址完全实现其清污承诺的情况下，考虑将钚运入华盛顿州。¹⁶⁰华盛顿州目前正起诉 DOE，因 DOE 未能实现已经同意的清污承诺和进度。¹⁶¹

深钻孔方案

DOE 钚处置工作小组认为，深钻孔处置方案的成本介于 WIPP 和固化方案之间，但“深钻孔处置的成本可能更接近于稀释 (WIPP) 方案”。¹⁶²工作小组称，尚未开展充分的研发，以详细评估深钻孔处置方案。但他们指出，2010 年桑地亚国家实验室已提出一个为期 5 年、耗资 7500 万美元的深钻孔示范项目，这适用于处置 DOE 的一些放射性废物。

2014 年 9 月，DOE 深钻孔评估项目汇报了有关可能合适的深钻孔处置场址的初步评估结果。该项目发现，DOE 的 110 个场址中，萨凡纳河场址 (SRS) 适合度评分排名第三，这一评分是基于场址区域、离城市的距离、地表以下两公里内是否有结晶基岩、平整度、低地热流量、低火山喷发率。减分项包括基岩结构复杂度和地震风险。有趣的是，所有场址中得分最高的是潘特克斯，阿马里洛外的一个弹头组装/拆卸和钚弹芯存放场址，该处基岩位于浅层。潘特克斯场址相对萨凡纳河场址的不足之处在于其附近有高密度的石油钻孔。¹⁶³

钻孔评估项目的报告还包含一份针对 DOE 已经装入和可以装入足够小废物包中的放射性废物是否适合进行深钻孔处置的初步讨论。提出的方案是在不锈钢罐内，将废物包埋入隔水粘土或其他材料中，同时，不锈钢罐的壁应具有足够的厚度，以抵抗钻孔深度巨大的静水压。¹⁶⁴

液态钠冷快堆

建造和运营两座 311MWe 快中子反应堆¹⁶⁵和相关燃料制造设施比完成和运行 MOX 燃料制造厂的成本更高。另外，与上文讨论的通用-日立公司给英国政府的提案一样，处理含钠乏燃料需要额外花费数十亿美元。

从美国经验获取的教训

美国的灾难性经验很大程度上是自己造成。尽管是二战期间美国显赫的曼哈顿计划的继承者，美国能源部核军工管理局在大型项目的管理上遇到很大麻烦，制定了一种项目成本加倍、不能按期完工的管理模式。¹⁶⁶英国核退役局在项目管理上也遇到了类似的问题。¹⁶⁷

以 MOX 燃料形式处置钚难度极大，因为这要求遵守严格的质量标准，并遵循可以满足核电公司需求的进度。相比而言，直接处置执行起来要简单得多。

美国 DOE 钚处置工作小组集中于可能是最简单的直接处置策略：将钚进行掺混稀释后，封装入桶，存放到一个已经运行的地下钚废物处置库。不幸的是，处置库发生的一次事故导致该方法中止了至少数年。是否能为已稀释的钚找到另一个潜在目的地？基于美国石油、天然气和地热工业钻孔技术的深钻孔方法似乎是一种可能的方案。

其他方案，例如罐中罐处置和包装后与美国乏燃料和/或玻璃固化高放废物一起在地质处置库处置，可能需要混合物以固体而非粉末形式存在。可以通过玻璃固化、加压和烧结或热等静压方式，生产固体混合物。这些工艺的难度比简单的稀释要大得多，但比 MOX 燃料制造仍要小很多。

从上述历史学到的第二个教训似乎是“不要把你所有的鸡蛋放到一个篮子里”。事实上，这也是为什么美国钚处置计划最初设计时采用平行双轨制（即 MOX 和同高放废物一起直接处置两种方案）的原因。未来，应继续开展两种方案的研究，直到成本大幅提升，达到数十亿美元的量差。事实上，考虑到一些方案在处理钚数量上的限制和开发其他方案的需求，最优化的策略很可能是在各种方案可行的情况下实施其中的两种或更多种。

假如情况就是这样，DOE 应该以公开、可核查的方式比较萨凡纳河场址和洛斯阿拉莫斯国家实验室现有设施生产不同形式钚固化物的潜在处理能力和成本，同时弄清可能的最终处置目的地的不确定性。

最后，无须着急。美国的冗余钚目前相对安全地贮存在 DOE 的萨凡纳河场址，和以武器“弹芯”形式贮存在潘特克斯的武器组装/拆卸场址的地堡里。

和俄罗斯谈判

美国如果重启直接处置方案，要么就要说服俄罗斯放弃坚持美国辐照大多数冗余武器级钚的要求，要么无视俄罗斯的坚持。理想的情况是俄罗斯能对美国采取妥协态度，正如 2010 年当俄罗斯决定使用增殖堆而不是轻水堆辐照钚时美国采取的妥协态度一样。

不论哪种情况，俄罗斯计划分离已辐照的钚基本上抵消了俄罗斯执行《钚管理与处置协议》(PMDA) 所获得的所有安全收益。事实上，俄罗斯分离和再利用钚增加了其被盗的风险。相比而言，在协议涉及的 34 吨钚中，还不如简单地将其中 25 吨存放到高安保级别的玛雅克易裂变材料贮存设施（该设施是在美国经费支援下建造的），剩余 9 吨存放到位于 Zheleznogorsk 的地下钚贮存设施中。¹⁶⁸

即便俄罗斯不同意美国转向直接处置方案而决定宣布放弃 PMDA，美国也将没有损失，且这一情况不太可能发生。PMDA 是一个执行协议，因此两国的执行方可以重新协商或者终止该协议。

直接处置方案

理解这一点很重要，即如果选择直接处置，需要填埋的钚的量不会比在 MOX 乏燃料中的多很多。辐照仅将 MOX 燃料中的钚和其他长寿命超铀元素的量减少 25%。这部分是因为钚的质量数为偶数的同位素（钚-238、钚-240、钚-242）都是“非易裂变”材料。尽管上述同位素能在快中子堆或核爆炸中被快中子激发而发生裂变，但是被轻水堆链式反应中的慢中子激发裂变的可能性很低。即便作为 MOX 燃料中主要裂变元素的钚-239，在吸收一个慢中子后也有四分之一的概率不发生裂变，而是简单地转变为钚-240。¹⁶⁹另外，在 MOX 燃料中，每 10 个裂变钚原子中约有 6 个是铀-238 吸收中子新产生的，而铀-238 占 MOX 重金属质量的 90%。¹⁷⁰

有人可能会认为，如果某个国家对分离和使用钚感兴趣的话，那么该国的 MOX 乏燃料将成为其最富有的“矿石”，因为 MOX 乏燃料中钚的质量分数约为低浓铀乏燃料中的 6 倍。但是，LWR 的 MOX 乏燃料中的燃料价值会递减，因为每次循环后，钚中的非易裂变同位素的比例会上升。例如，假设新装的 MOX 燃料中非易裂变钚的质量分数为 35%，经辐照后，非易裂变钚的质量分数会上升至 54%。¹⁷¹即使法国从其 MOX 乏燃料中分离钚的规模也没有超出示范规模。相反，25 年来，法国的 MOX 乏燃料被累积存放在阿格一个巨大的乏燃料贮存池中，等待在快中子堆的商业化应用。2005 年，负责法国放射性废物处置的机构法国放射性废物管理局（ANDRA）开始考虑在地下处置库中处置 MOX 乏燃料的方案。¹⁷²

临时贮存

如前文美国和英国章节所讨论的，目前正在考虑替代固化分离钚后在地下管道或深地下空间、深钻孔中直接处置方案的各种方案。在地下处置库建成运行前（一些情况下可能不到几十年¹⁷³），将钚加工成可处置形态前后，都需要进行临时贮存。

可以认为，由于生产可处置的钚涉及钚稀释工作，因此需要等待处置库建成运行，以免稀释过程中需要更多的高安保级别贮存空间。

从图 6 和图 7 可以看出，为避免临界（即相邻钚罐之间发生链式裂变反应），纯的钚氧化物在任何情况下都不能紧凑贮存。但是，如果在固化物中混入中子“毒物”（中子吸收材料），能降低发生临界的风险。最后，钚氧化物是一种潜在的强致癌物，将其转化为固体能消除钚（不论是偶然还是有意）弥散到大气中的风险。

下文我们首先给出了钚可能的处置形态及其地下处置的策略。

处置形态

在前文我们讨论了三种制造待处置钚废物体的可替代方法：

1. 将钚氧化物与一种稀释剂机械混合，将很难从混合物中再回收钚；
2. 在非放射性玻璃或陶瓷中固化；
3. 制成一种特殊形式的陶瓷固化物，即“低规格”或“贮存”MOX。

机械混合

美国正小规模尝试机械混合钚氧化物与稀释剂（很难从混合物中再回收钚）的方法，以利用现有的用于存放钚污染废物的地下处置库。¹⁷⁴如上文所述，美国 DOE 钚处置工作小组发现，如果对废物隔离示范设施（WIPP）存放废物体积的规定限值能稍微提高的话，（机械混合法）将是处置美国全部冗余钚成本最低的方案。2014 年 WIPP 一个桶发生爆炸，损害了 DOE 与新墨西哥州的友好关系，因此扩建 WIPP 以接收更多、浓度更高的钚废物在政治上是否可行仍有待观察。¹⁷⁵

固化

美国开发了两种钚固化体，即将其混入陶瓷或玻璃中。

陶瓷

制造含钚陶瓷的工艺涉及高温高压环境。美国为钚处置计划开发

的方法与制造 MOX 燃料小球的方法类似，不同的是，固化体的体积是约 1 立方厘米的 MOX 燃料小球的 100 倍。¹⁷⁶

钚氧化物与铀氧化物混合后被研磨成粉末（尺寸约 1 微米）。然后往混合物中添加其他材料，包括有机粘结剂，可能还需添加中子吸收物以控制临界。之后，将混合物加工成粒状，在 140 ~ 350 个标准大气压下压成要求的形状。所形成的“绿色”球将被加热至 1350°C，并在此温度下熔融数小时后形成一个固体块。¹⁷⁷一项为 DOE 所做的研究估计，需要 300 名工作人员每天 24 小时不停工作才能完成每年固化 5 吨钚的任务量。¹⁷⁸

第二种生产陶瓷或玻璃与晶体混合物的方法是同时加压加热，这种方法被称为“热等静压”（HIP）。澳大利亚核科学与技术组织（Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO）已经开发出人造合成岩石，“人造岩石”能以低浸出率体的形式隔绝多种放射性核素，其中包括钚。¹⁷⁹英国国家核实验室（NNL）已经与 ANSTO 开展合作，在塞拉菲尔德后处理场址建设一个固化污染钚氧化物的流程，该流程将混合污染的钚氧化物与含相对难溶晶体（用于隔离钚）的玻璃。同时，混合物将被放到高压（1000 个大气压）和高温（1200 ~ 1300°C）环境中 8 ~ 9 小时。混合物中钚的平均浓度可以达到 10% 质量分数，或者说 NNL 正在开发的 5 升最终废物体中含约 2kg 钚。按照最初英国的设计，因为将要固化的废物在与基体材料混合前仅平均含 20% 的钚，所以每 5 升废物体中预计仅含 0.3—0.5kg 钚。¹⁸⁰

玻璃固化

玻璃固化方法将钚氧化物和中子吸收体、玻璃料在熔炉中混合，然后将熔融混合物倒入容器中冷却并固化。¹⁸¹这种方法比冷压烧结成本更低，多个国家都大规模采用这种方法固化后处理废物。美国的一个项目开发了一种特殊的硼硅酸盐玻璃，每立方厘米可溶解多达 0.5 克钚，或者说能在 2 升容器中溶解 1kg 钚。以上述浓度完全溶解钚需要在 1450 ~ 1500°C 高温下进行。¹⁸²在 HIP 过程的低温阶段，富含钚的晶体倾向于从玻璃中析出。随着 HIP 的继续进行，晶体开始变的相对难溶，并最终形成一种可以接受的非均一物质形态。

贮存 MOX

20 世纪 90 年代，一些非政府分析师研究了一种铀固化方法，就是将铀制成低质量的 MOX 燃料后直接处置，或许就是将 MOX 燃料小球用罐子装起来。

仅仅为了生产贮存 MOX 而建造 MOX 燃料厂的成本会非常高。如果现有的 MOX 燃料厂，如英国的塞拉菲尔德 MOX 燃料厂，不再有生产任务，可以考虑用于贮存 MOX 的生产。这样一来，建设成本将成为“沉没”成本，而运营成本也会因为尺寸公差放宽而降低。

事实上，西欧燃料制造商已经生产了含数十吨铀的 MOX 燃料，因不能用作燃料而被视为贮存 MOX。对此，AREVA 拒绝作出任何解释，¹⁸³但这似乎就是法国制造的成品中未经辐照的铀量从 1995 年的 3.6 吨增至 2011 年的约 30 吨（见图 3）的主要原因。

法国贮存的不用 MOX 燃料包括以下部分：

1. 为法国失败的超凤凰快中子增殖反应堆制造的整个堆芯的未辐照 MOX 燃料，其中包含约 6 吨铀。¹⁸⁴

2. 为德国从未运行过的 SNR-300 增殖反应堆¹⁸⁵生产的整个堆芯的未辐照 MOX 燃料，其中包含约 1.6 吨铀。这部分 MOX 燃料可能已经卖给法国，以支付 AREVA 的费用和获取含等量铀的 MOX 燃料（用于德国的轻水堆）。¹⁸⁶

3. 废料中含有的数量未知的铀被制造成低规格 MOX，以便运输。因为 AREVA 卡达拉齐、¹⁸⁷比利时德赛尔（Dessel）¹⁸⁸和德国哈瑙（Hanau）¹⁸⁹MOX 燃料制造厂都已退役，将废料制成低规格 MOX 燃料是在 AREVA 的 Melox 燃料制造厂运行期间进行的。¹⁹⁰

上述不用的 MOX 燃料中，除超凤凰快中子增殖反应堆堆芯燃料仍贮存在日内瓦附近的罗纳河反应堆场址外，其他都被暂时存放在法国阿格后处理厂的一个乏燃料水池中。

具体这些未辐照的 MOX 燃料中有多少将被溶解，并重新制成轻水堆 MOX 燃料尚不可知。目前，法国阿格后处理厂已拥有生产 MOX 粉末和小球的许可证，但不能生产燃料棒和燃料组件。最终，所有不用的 MOX 燃料中有一部分可能会在法国未来的高放废物处置库中直接处置。

美国存放在萨凡纳河场址的冗余铀有 0.7 吨包含在不用的 MOX 燃料中，这些 MOX 燃料最初是为 DOE 钠冷快中子通量测试设施

(sodium-cooled Fast Flux Test Facility)(已终止)¹⁹¹制造的。日本的不用辐照的 MOX 燃料中约含有 1.6 吨钚。¹⁹²

地下目的地

钚一旦被固化、封装后，便可放置于深地下矿井、通道或钻孔中。

矿井处置库

一旦处置库可用，MOX 乏燃料最可能与低浓铀乏燃料混合装罐后处置。适当形态的未辐照的钚可以和乏燃料一起处置。短期而言，乏燃料形成的伽马辐射场能在处置库关闭时起到保护作用，防止 MOX 燃料被盗取。长期而言，将钚含量高的材料与低浓铀乏燃料混合能降低临界的风险，直到水渗入罐中，内容物开始泄漏。

玻璃固化高放废物预计也将放入矿井处置库中。任何固化到玻璃中的钚（不论是均匀混合还是固化到罐中）也将随之处置。

在关闭处置库或至少在利用回填和工程屏障隔离含钚处置库空间前，没有辐射屏障的钚将需要特殊的安保安排。

深钻孔

人们对于利用地下 3~5km 深的钻孔处置固化钚很有兴趣。¹⁹³深钻孔的深度多达矿井处置库的十倍，因此很难在处置后回收其中的钚。而且，这样做至少存在三方面的因素，能降低钚被溶解并被污染的水带回地面的可能性：

1. 在这一深度，来自上层岩石的巨大压力阻止了裂缝的产生，因此，水流动非常慢；
2. 深地质层老化水中的氧因与周边岩石发生反应而耗尽，钚在这种水中相对难溶；
3. 这一深度的水中通常含溶解盐，因此密度较大，上升并与接近地表的蓄水层中密度低的新鲜水混合的能力受限。¹⁹⁴

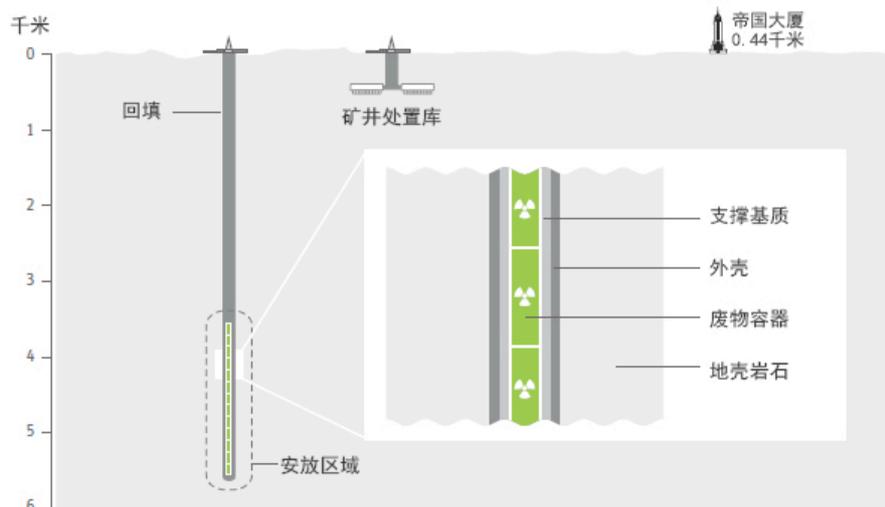


图 11.深钻孔处置固化钚原理图

本例中所示钻孔深度约为 5km。下半部周边全部是基底地壳岩石，这部分钻孔的周边岩石中会被填充一系列密封物，然后装入固化钚。钻孔的上部岩层多孔，填充的密封物更多，密封物可能由多种材料组成，如水泥、黏土、沥青等。作为对比，一个典型的矿井地质处置库的深度约为 0.5km，相当于 20 世纪最高的摩天大楼。资料来源：Harold Feiveson, Alexander Glaser, Zia Mian 和 Frank von Hippel, 解构炸弹 (*Unmaking the Bomb*) (麻省理工大学出版社, 2014) 图 9.3。

美国及其他国家已经就深钻孔处置高放废物的可能性开展了大量研究分析工作。¹⁹⁵美国 DOE 桑迪亚国家实验室已经在主导开展一项处置非放射性材料的示范性工程。¹⁹⁶尽管桑迪亚国家实验室的研究人员尚未讨论如何在深钻孔中处置钚，但已经讨论了在一个 5km 深的钻孔中处置乏燃料的可能性。钻孔底部 2km 圆柱空间放置着存有燃料的坚固容器，钻孔圆柱空间直径约 16 厘米 (6 英寸)，体积约 40 立方米。¹⁹⁷

为避免钻孔中发生临界事故，须将钚按 3% 的平均浓度与贫铀氧化物混合。¹⁹⁸这样处置 50 吨钚将形成 1700 吨“重金属”——铀和钚的混合物。

如果这些混合物按照燃料小球中重金属一样的密度 (9.6 克/立方厘米) 加工成陶瓷，处置所需的空间体积为 177 立方米，只需要 5 个钻孔。但是，即使加工形成的陶瓷很大且质量要求比燃料小球低得多，将 1700 吨重金属氧化物加工成陶瓷的成本仍旧很高。

从另一个极端考虑，重金属氧化物可以以粉末形式存在。事实上，为简化操作钚的流程，萨凡纳河场址贮存的钚氧化物小罐可以被装入填满铀氧化物的大罐中。但粉末形态的重金属密度仅为 1.4 克/立方厘米，约为陶瓷中重金属密度的七分之一。¹⁹⁹

可以采取的一个折衷方案是，将钚氧化物贮存小罐周围的铀氧化物粉末压缩到密度约 4 克/立方厘米。²⁰⁰这样，每个钻孔将可以存放约 4 吨钚，13 个钻孔就能存放 50 吨钚。制造、装载和密封一个 5km 深钻孔的成本约为 4000 万美元。²⁰¹

还有很多关于用低浸出率陶瓷封装钚的研究资料。²⁰²可能没有必要特殊设计低浸出率的陶瓷废物体。多数钚将在地质处置库内被装有因热膨胀和收缩、裂变气体形成引起开裂的燃料小球的乏燃料所环绕。

关键的问题在于，钻孔的选址相比矿井地质处置库在政策层面上是否更具有可行性，即深钻孔的深度更深、覆盖区域更小是否会让公众直观上觉得更加安全？美国 DOE 钚处置工作小组认为不是。²⁰³这一观点可从不同候选场址的研究小组中得到验证。

有关公众接受度的一个潜在的问题是，近年来，人们开始重视在矿井处置库中处置放射性废物的“可逆性”。²⁰⁴例如：

2006 年法国有关放射性材料和废物可持续管理的法案明确称，“作为预防措施，许可证需指定保证处置过程可逆性的最低期限。在任何情况下，这一最低期限不得少于 100 年。”²⁰⁵

2005 年，加拿大核废物管理组织建议，在最终关闭进出通道和竖井之前，乏燃料处置库性能监控应持续 240 年。²⁰⁶

国际透明度

在非核武器国家，钚（包括乏燃料中的钚）的填埋将由 IAEA 监控，以核实处置库回填之前没有钚被转移。IAEA 还有责任对处置库进行永久监控，以确保无人再进入和处置库中没有钚被转移出 IAEA 保障活动。

签订《核不扩散条约》(NPT) 的 5 个核武器国家在条约的第六条“在核裁军上展开协商”中承诺，如果成功开展，最终结果是它们都成为非核武器国家。如果 IAEA 监控这些国家冗余钚的处置情况，将有利于未来对其非核武器状态进行核查，也能短期内大幅提升削减协议的可信度。

美国计划在废物隔离示范设施 (WIPP) 中固化和填埋钚污染废物可能是核武器国家中首个填埋大量钚的计划。截至 2013 年底，美国向 IAEA 汇报称已在 WIPP 中处置 4.5 吨钚。²⁰⁷

当 DOE 桑迪亚国家实验室的专家们探索将 WIPP 作为地下处置库信息透明的示范场址的可能性时，²⁰⁸IAEA 实际上却没有核查 WIPP 中填埋的废物所含钚的数量。导致这一状况的部分原因是 IAEA 经费紧张，不急于针对核武器国家开展核查工作。

2000 年俄罗斯-美国钚管理和处置协议涵盖了一项两国的共同承诺，即与 IAEA 协商两国钚处置的监控安排。截至 2014 年底，上述协商仍未完成。

结论

美国 DOE 位于南卡莱罗纳州的萨凡纳河场址正在建设的 MOX 燃料制造厂出现巨额成本超支，奥巴马政府被迫在 2013 年宣布通过 MOX 方法处置钚“在经济上难以负担。”上述情况引发了政治上对钚以废物形式直接处置可能性的兴趣。

在英国，将外国的分离钚制造成 MOX 燃料遇到了技术问题，塞拉菲尔德 MOX 厂被迫关闭。因此，英国也至少在以备用的心态考察直接处置，作为替代方案。

日本和法国仍将注意力集中在 MOX 上，若两国政府的政策继续选择对乏燃料进行后处理，这种情况还将继续。但日本的计划已明显延迟，法国也马上面临正辐照 MOX 燃料的两座反应堆的退役。

20 世纪 90 年代末，美国深入研究了“罐中罐”方案。按照这一方案，固化钚将被嵌入一些高放射性后处理废物(最初钚是从中分离的)中。通过这一方式，可以在钚周围形成和乏燃料周围一样的放射性屏障，使得对钚的操作只能通过在厚辐射防护屏蔽后利用远程控制的化学和机械方法进行。罐中罐方法和 MOX 方法的相同点是，都只向已有废物体中增加少量重量，且无论哪种方法都需要地质处置库。美国仍可能对这方案特别感兴趣，并在未来几十年用该法处置后处理废物。

在法国和英国，高放废物玻璃固化和后处理是并行的，因此不太可能采取“罐中罐”方案，除非该方案在后处理结束前早已规划好。

但还有其他一些方案，其中越来越具吸引力的是钻孔处置法。这种方法不涉及辐射屏障，但是从封闭地质处置库中回收(废物)更加困难。

如美国在其废物隔离示范设施正开展的活动，也可能在不使用辐射屏障的情况下在矿井中处置钚。在这种情况下，处置库中任何含有钚的开放空间或通道都需要特殊的安保安排。美国能源部认为，将钚稀释至每桶含量少于 1 千克后，上述(特殊安保安排)便无必要，将钚与混合后很难分离的化学物质混合就更不需要特殊安保安排，但这一说法尚存争议。以 WIPP 为例，桶中心实际含有钚的管道体积仅为约 12 升，且该管道可能从桶中被分离出来。²⁰⁹

长期而言，处置库关闭，贡献多数伽马射线场的半衰期 30 年的放射性同位素铯-137 消失后，处置库的深度和国家、国际的永久监控安排才能保护处置库中的钚不被滥用。

对于一些国家，仅采用一种方法处置钚可能不够。法国尽管热衷于 MOX 燃料方法，但也可能最终以“贮存 MOX”形式直接处置多达 20 吨的钚。考虑到每种处置方案都存在问题，美国很可能会采用至少两种处置方案。WIPP、罐中罐和深钻孔处置法，在不同的时间点上似乎都值得采纳。

此前，将钚制成 MOX 燃料的方法似乎不太昂贵，并且能生产出与乏燃料一同处置的废物体。但事实上，这一方案比预期的成本要高，并且在技术有很大挑战。作为替代的每种直接处置方案都有其复杂性，但目前需要对这些方案进行认真分析。

理想的情况是，有冗余钚库存问题的国家能开发联合项目，以分析直接处置方案。但只要法国、日本和俄罗斯政府仍承诺进行后处理，且英国政府继续依赖核工业提供解决方案，短期内这种合作的可能性就比较低。如果这些国家的 MOX 计划被放弃，它们的核机构具有相关的知识和工业能力，就会有商业兴趣参与（开发联合项目）。

参考文献

- 1.主流的反应堆是（普通）轻水堆（LWR），其乏燃料中含钚量约为1%。
2. IAEA, *Communication Received from Certain Member States Concerning their Policies Regarding the Management of Plutonium*, INFCIRC/549,16 March 1998.
- 3.自20世纪70年代以来的数十年，法国和日本的后处理提倡者声称从反应堆钚中分离出来的钚不能用于制造武器，因为其同位素组分与制造武器的钚不同，而武器用钚是从所受辐照相比反应堆中燃料弱得多的铀中获得的。这一说法目前虽然已经说得不多，但是还是有人提及。1978年，美国一位名叫Robert Selden高级武器设计专家在向法国领导汇报法国和日本的后处理机构时，解释称“反应堆级钚”也可以被用于制造武器。法国支持后处理者的回复是“不论你怎么说，我们的钚是清白的！”1995年，法国CEA的一位高级官员被问及法国的武器设计专家是如何向其后处理机构阐述反应堆级钚的武器用途时回答道“他们没这么说！”1993年，洛斯阿拉莫斯国家实验室武器设计部一位前主管发布了一份关于为什么长崎型原子弹在与任意一种钚同位素混合时都能达到至少1000吨TNT当量的威力的非密文章。（J. Carson Mark, “Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium,” *Science & Global Security* Vol. 4 (1993) pp.111 – 128.）1997年，一组美国武器实验室专家发布了一份长达两页的关于上述问题的非密总结声明，称“反应堆级钚可被不专业的扩散者或现金核武器国家用于制造武器。分离钚（不论是武器级或者反应堆级）被盗将造成严重的安保风险。”（*Nonproliferation and arms control assessment of weapons-usable fissile material storage and excess plutonium disposition alternatives* (U.S. Department of Energy, DOE/NN-0007, 1997), pp. 38 – 39.）基于上述建议，IAEA在其非核武器国家钚安保中并未对不同级别的钚进行区分，但含钚-238超过80%的钚除外。（因为钚-238半衰期相对较短，仅88年，每千克钚-238产热衰变热超过0.5千瓦。）
- 4.假设每个弹头含3千克军用钚且保守地使用IAEA假设的每个一代（长崎型）核武器所使用的民用钚包括产生的废物在内一共8千克。*IAEA Safeguards Glossary*, 2001 Edition, p. 23.
- 5.美俄在两国政府签订的协议中声明各有34吨过剩钚不再用于国防目的及相关合作。（2000年钚管理与处置协议经2010年议定书修订，<http://fissilematerials.org/library/PMDA2010.pdf>）。美国2005年宣布另有9吨过剩钚。在其2014年向IAEA提交的报告(INFCIRC549/A6/17)中，美国宣称已在WIPP中处置额外的4.5吨钚。英国在1998年宣布有0.3吨过剩钚。（*Global Fissile Material Report 2010*, p. 78）.
- 6.印度已宣布为增殖堆“战略性”地分离钚，因此不接受IAEA监管。这样一来，印度保留了将这些钚或增殖堆生产的钚用于武器生产的权利。根据美俄1997年9月23日签订的关于产钚反应堆合作的协议，俄罗斯同意不将自1994年9月后生产堆生产的钚用于武器，*Global Fissile Material Report 2011*，尾注120.约6吨钚未被列入俄罗斯宣布的34吨过剩钚中，*Global Fissile Material Report 2010* (IPFM, 2010) 表 3.5. 英国在1998年《国防战略综述》（Strategic Defense Review）中声明在塞拉菲尔德存放有4.1吨过剩的武器用钚有反应堆级钚。美国政府所声明为“国防需求过剩”且未能在WIPP中作为废物处置的49吨钚中，6.6吨为非武器级钚，IAEA, “Communication Received from the United States of America Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium”, INFCIRC/549/Add.6/17, 6 October 2014 and *United States Plutonium Balance, 1944 – 2009* (U.S. Department of Energy, 2012), Table 3.
- 7.法国和英国的国外分离钚目前不属于日本。
8. 2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol, *op. cit.*
9. 2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol, *op. cit.*, 数量、形式、地点和处置方法附录。
10. *Department of Energy (DOE) FY 2016 Congressional Budget Request*, Vol. 1, pp. 635-6.
11. *Department of Energy (DOE) FY 2014 Congressional Budget Request*, Vol. 1, p. DN-113.
- 12.钚的产生过程：铀-238吸收中子形成铀-239（半衰期24分钟）后发生放射性衰变成为镎-239（半衰

期2.4天), 镎-239衰变成钚-239 (半衰期24000年)。钚是在轻水堆中生产的, 部分会裂变, 但是但是轻水堆产生的钚量不足以改变其对钍-235的依赖。

13. R.B. Fitts and H. Fuji, IAEA, "Fuel Cycle Demand, Supply and Cost Trends," *IAEA Bulletin* Vol. 18 (1975) p. 19.
 14. *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation*, Vol. 5, "Fast Breeders" (IAEA, 1980), p. 53, *Superphenix* case.
 15. Assuming 53 MWh-days/kg, a thermal to electric energy conversion efficiency of 1/3 and 8.5 kg of natural uranium per kg of low-enriched uranium (4.4% enriched uranium with a depleted uranium assay of 0.23%).
 16. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand* (OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2014) p. 130.
 17. 如见 Erich A. Schneider and William C. Sailor, "Long-Term Uranium Supply Estimates," *Nuclear Technology*, Vol. 162 (2008) p. 379.
 18. 比利时、意大利和荷兰参与了法国和德国的增殖堆计划, *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (IPFM, 2010).
 19. "Rosenergoatom already learning from BN-800," *World Nuclear News*, 10 December 2014.
 20. "India's nuclear power," *Frontline*, 3 October 2014.
 21. 截至2013年底, CEFR累计发电量仅20兆瓦时, IAEA Power Reactor Information System, <http://www.iaea.org/PRIS/>. 2014年运行状况见 http://www.heneng.net.cn/index.php?mod=news&category_id=9&action=show&article_id=33209&category_id=9 (in Chinese).
 22. Mycle Schneider and Yves Marignac, *Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France* (IPFM, 2008) chapter VI.
 23. Kari Ikonen and Heikki Raiko, *Thermal Dimensioning of Olkiluoto Repository for Spent Fuel* (Posiva, Working Report 2012-56, 2012), http://www.posiva.fi/files/3143/WR_2012-56.pdf.
 24. Roald A. Wigeland et al, Argonne National Laboratory, "Repository Impact of Limited Actinide Recycle," *Proceedings of Global 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9 – 13, 2005*, Paper No. 496.
 25. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Vol. I. "Sources," (UNSCEAR, 2000), Tables 42 – 44. 自20世纪70年代以来, 因后处理每单位核电所用的燃料向大气中泄漏的碳-14的量已出现一个数量级的递减。
 26. 镎-237、钚-238、钚-240、钚-242、镅-243和锔-243都有可能发生裂变, 但裂变概率比钚-239小100到1000倍。"Le Projet ASTRID," (Société Française de Energie Nucléaire, SFEN/GR21, 2013) p. 6.
 27. *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark: Main report of the SR-Site project*. Volume III (SKB, TR-11-01, 2011) http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-11-01_vol3.pdf.
- 见例图 13 – 18. 按照泄漏贡献多少对放射性同位素排序 (从大到小) 为: 镭-226, 钍-238衰变产物之一; 碘-129, 也是一种裂变产物; 镎-237, 一种嬗变同位素; 硒-79, 一种裂变产物; 铅-210, 钍-238的一种衰变产物; 镍-59, 钢合金的一种活化产物; 铯-227, 钍-235的一种衰变产物; 铯-94, 钢合金的另一种活化产物。
28. 从 "Avis no. 2013-AV-0187 de l' Autorité de sureté nucléaire du 4 July 2013 sur la transmutation des elements radioactifs a vie longue" ["Opinion No. 2013-AV-0187 of the Nuclear Safety Authority of July 4, 2013 on transmutation of long-lived radioactive elements"]翻译而来. 也可参考 IRSN (ASN的辅助研究机构) 的结论, "Avis IRSN n° 2012 - 00363, Objet: Plan national de gestion des matieres et des déchets radioactifs... Etudes relatives aux perspectives industrielles de séparation et de transmutation des éléments radioactifs a vie longue: Examen durapport d' étape du CEA, d' octobre 2010, relatif aux évaluations technicoéconomiques des options deséparation-transmutation" ["IRSN review No. 2012-00363 of National management of radioactive materials and waste... Studies on the industrial prospects of separation and transmutation of longlivedradioactive elements: Review of the CEA October 2010 interim report on technical and economic assessments for partitioning and transmutation"].

-
29. Osamu Tochiyama是METI废物处置技术工作小组主席，核安全研究协会（Nuclear Safety Research Association）放射性废物处置安全研究中心（Radioactive Waste Disposal Safety Research Center）主任，在Daisuke Yamada引用称，“据我所见：政府需考察操作、处置放射性废物的方案”*Mainichi*, 1 May 2014.
30. 参考例子 George Perkovich, *India's Nuclear Bomb: The Impact on Global Proliferation* (University of California Press, 1999).
31. J. Carson Mark, Theodore Taylor, et al, “Can Terrorists Build Nuclear Weapons?” in *Preventing Nuclear Terrorism*, Paul Leventhal and Yonah Alexander, eds. (Lexington Books, 1987).
32. Steve Fetter and Frank von Hippel, “The Hazard from Plutonium Dispersal by Nuclear-warhead Accidents,” *Science & Global Security*, Volume 2 (1990) pp.21 – 41.
33. *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* (National Academy Press, 1994) p. 31.
34. *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium*, op. cit. p. 34.
35. IAEA, Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5, 2011) para. 4.6.
36. 俄罗斯和美国同意将钚-240和钚-239含量比率小于0.1的钚定义为武器级钚。
- “2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol,” op. cit. Article I. 反应堆中的中子辐射会增加该比率，因为中子将引发其中一些钚-239的裂变并将其中一些转变为钚-240。其中也有少量抵消过程，即钚-240俘获中子之后可悲转化为钚-241。
37. “2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol,” op. cit. Article VII.3.
38. 通常认为增殖堆会在堆芯周围的铀“包覆层”产生武器级钚。Mortitz Kütt, Fredericke Frieß and Matthias Englert, “Plutonium disposition in the BN-800 Fast Reactor: An assessment of plutonium isotopics and breeding,” *Science & Global Security* Vol. 22 (2014) pp. 188 – 208.
39. 据法国、英国和日本向IAEA提交的声明显示，截至2013年底，仅有5吨非日本国外分离钚存放在法国和英国。这一数量相比2012年底的11吨和2011年底的16吨已有所下降。
40. 成本源自 JNFL, Oct. 2012, <http://www.jnfl.co.jp/jnfl/establishment.html> (in Japanese).
41. JNFL 出版社发布, 31 October 2014, <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/pr141031-1.html> (in Japanese).
42. IAEA 核燃料循环信息系统（IAEA Nuclear Fuel Cycle Information System, INFCIS）。
43. 送往法国和英国的乏燃料数量数据源自日本经济、贸易与工业部自然资源和能源机构对饮食员（Diet member）Mizuho Fukushima的回复。16 January 2013, http://kakujo.net/ndata/pu_jp.html.
44. *Rapport fait au nom de la Commission D'enquete relative aux couts passes, presents et futurs de la filiere nucleaire*, [Report of the Commission of Enquiry relative to the costs past, present and future of nuclear power] (National Assembly, 5 June 2014), <http://www.assemblee-nationale.fr/14/rap-enq/r2007-tl.asp>, p. 217, recommendation 11.
45. 首次并网日期源自 IAEA 反应堆信息系统（PRIS）。
46. Tara Patel, “France May Face Reactor Shutdowns in 2020, Regulator Says,” *Bloomberg News*, 3 December 2013.
47. “French MPs back cut to nuclear energy reliance,” (Reuters, 10 October 2014).
48. *Plan National de gestion des matieres et dechets radioactifs, 2013 – 2015* [National Plan for Radioactive Waste Management, 2013 – 2015] (ASN, 2013) p. 16; Phil Chaffee, “A 2019 Halt to La Hague?” *Nuclear Intelligence Weekly*, 10 May 2013, p. 5. ASN 被错误地认为是 ANDRA（法国负责处理放射性废物的机构）。
49. 英国核退役局2014年仍继续运行英国最后一座第一代美诺克斯（Magnox）反应堆，Wylfa-1（功率460MWe），但是计划在2015年关闭该反应堆。 <http://www.magnoxsites.co.uk/site/wylfa/>.
50. 日本原子能机构, “MOX Fuel Technology Development,” <http://www.jaea.go.jp/english/04/tokai-cycle/03.htm>.
51. <http://www.jaea.go.jp/04/ztokai/facilities/sisetu/PuHP/report/Today/pudaily1.htm>;

- <http://www.jaea.go.jp/04/ztokai/summary/center/plutonium/> (in Japanese).
- 52.日本原子能委员会,“The Situation of Separated Plutonium Management in Japan as of the End of the Year 2013” (in Japanese).
- 53.Japan Nuclear Fuel Limited Press Releases, 11 April 2014, <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/pr140411-2.html>, and <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/20140411besshi.pdf> (in Japanese).
- 54.“An Investigation into the Falsification of Pellet Diameter Data in the MOX Demonstration Facility at the BNFL Sellafield Site and the Effect of this on the Safety of MOX Fuel in Use,” (UK Office for Nuclear Regulation, 18 Feb. 2000) <http://www.onr.org.uk/mox/mox1.htm>.
- 55.*Sellafield MOX Plant: Lessons Learned Review* (UK Department of Energy and Climate Change, 18 July 2012); Brian Brady, “Revealed: L2bn cost of failed Sellafield plant,” *The Independent*, 9 June 2013.
- 56.IAEA, “Communication Received from Certain Member States [Japan] Concerning their Policies Regarding the Management of Plutonium,” INFCIRC/549/Add. 1, 31 March 1998.
- 57.日本原子能委员会2000年11月出版物, *Long-Term Program for Research, Development and Utilization of Nuclear Energy*, includes a discussion in the reference section, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/siryoe.htm#_Toc496950128,描述了日本分离钚的使用计划:“当文殊[日本的原型增殖堆]堆继续运行[截至2014年底尚未此事发生], 每年约需数百千克钚用于研发目的……根据电力公司的计划, 到2010年前, MOX燃料的使用量将逐步提升至供应16—18个轻水堆, 根据已经明确的计划, 预期每台机组每年需要约0.3—0.4吨钚。Oomas核电站全MOX堆芯每年将需使用1.1吨钚”。最早关于日本电力公司联盟(FEPCo)计划的英文翻译源自文章“Utilization plan for plutonium recovered at Rokkasho Reprocessing Plant (Fiscal years 2005 – 2006),” <http://www.cnrc.jp/english/topics/cycle/MOX/pluplanFEPCO6Jan06.html>. 该文章与2006年1月发布, 计划公布了2012财年及以后将使用16—18座反应堆的具体名称。该计划的目的是将六个后处理厂(RRP)的运行合理化, RRP于2006年进入热试阶段。那时, J-OMX预期在2012财年投入运行且预期每年使用易裂变材料(钚-239和钚-241)的(总)量为5.5—6.5吨。日本原子能委员会在2013年9月11日发布的声明中指出“日本当前的钚管理现状”, 总钚量和易裂变钚之间的比率为1.5。FEPCo每年重新发布的“钚使用”计划, 有时甚至半年发布一次, 直到2010年9月17日, 他们将所有反应堆“开始使用”钚的时间改成2015财年之后。
<http://www.cnrc.jp/english/topics/cycle/MOX/pdf/files/puplan17sep10.pdf>.
- 58.Fukushima #3, Genkai #3, Ikata #3 and Takahama #3.截至2014年底,含2.5吨未使用的MOX 燃料被存放在六座反应堆中,即: Genkai #3, Hamaoka #4,Kashiwazaki Kariwa #3, Takahama #3 and Takahama #4, Masa Takubo, “MOX Fuel Transportation/Use/Storage,” <http://fissilematerials.org/blog/MOXtransportSummary10June2014.pdf>.
- 59.Mari Saito, *et al*, “Japan may only be able to restart one-third of its nuclear reactors,” Reuters, 1 April 2014.
- 60.Federation of Electric Power Companies of Japan, “MOX Fuel Use in Thermal Reactor[s],” http://www.fepec.or.jp/english/nuclear/fuel_cycle/mox_fuel/index.html.
- 2009年, 根据MOX计划实际的延期状况对1997年的声明进行调整, 年份上将2010年改称2015年。2009年声明指出“MOX燃料制造厂最迟在2015财年将投入运行。”
http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/1198266_1511.html (in Japanese).
61. Tsuyoshi Nagano and Hiroshi Ishizuka, “Completion of nuclear fuel processing plant postponed for 21st time,” *Asahi Shimbun*, 31 October 2014.
62. Japan Atomic Energy Commission, “The Current Situation of Plutonium Management in Japan,” 26 September 2014 (in Japanese).
- 63.即使电力公司能够重启反应堆, 也可能因自身乏燃料池存满、六个后处理厂不能接受额外的乏燃料而被迫关闭。Tsuyoshi Nagano and Hiroshi Ishizuka, “Completion of nuclear fuel processing plant postponed for 21st time,” *Asahi Shimbun*, 31 October 2014.事实上, 日本15座反应堆中的12座在自身乏燃料池存满之前能额外运行至少10年。Masafumi Takubo and Frank von Hippel, *Ending reprocessing in Japan: An alternative approach to managing Japan’s spent nuclear fuel and separated plutonium* (IPFM, 2013) Table 2. See

另外,“电力公司在更安全存放乏燃料问题上采取推诿态度以避免‘无效投资’”, *Asahi Shimbun*, 4 January 2015.

64. “Interim storage startup to be postponed to Oct. 2016, Nuclear Fuel Cycle,” *Daily Tohoku*, 10 January 2015 (in Japanese).

65. 2014年1月英国核退役局估计“后处理一旦完成,英国将拥有约140吨民用分离钚”*Progress on approaches to the management of separated plutonium* (2014), p. 3.

66. 英国能源与气候变化部 (UK Department of Energy and Climate Change), *Management of the UK's Plutonium Stocks: A consultation response on the long-term management of UK-owned separated civil plutonium*, 2011, para.6.3. 截至2013年底, 英国有23.4吨外国分离钚, IAEA, “Communication Received from the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium,” INFCIRC/549/Add.8/16, 18 July 2013.

67. Fiona Harvey, “Sellafield MOX nuclear fuel plant to close,” *The Guardian*, 3 August 2011. 20世纪70年代, 英国原子能机构 (AEA) 在塞拉菲尔德制造了约3吨轻水堆用MOX燃料以备留个不同的海外反应堆使用。英国AEA (即后来的英国和燃料公司 (British Nuclear Fuels Limited, BNFL) 的前生, BNFL 1971年接管了AEA的后处理部分) 也为英国的敦雷 (Dounreay) 快堆 (功率为11MWe) 和原型快堆 (功率为234MWe) 制造了约18吨含钚量高达33%的MOX燃料, 上述两座反应堆都位于苏格兰的敦雷, 二者均于1988年终止运行。BNFL之后在塞拉菲尔德建造了一个MOX示范设施, 这一设施在被关闭之前制造了少量的海外轻水堆用MOX燃料, 20世纪90年代初该设施因为质量管理数据造假谣言而被迫关闭。 *BNFL View of UK Plutonium Usage*, UK Nuclear Safety Advisory Committee (98)P4, January 1998, p. 2.

68. *BNFL View of UK Plutonium Usage*, 提交给英国核安全咨询委员会, *op. cit.* p. 2.

69. *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* (National Academies Press, 1994) *op. cit.*

70. *Management of Separated Plutonium* (Royal Society, 1998), Summary, paragraph 9.

71. The Environment Council, *BNFL National Stakeholder Dialogue Plutonium Working Group Final Draft Report*, November 2002, p. 1.

72. *BNFL National Stakeholder Dialogue Plutonium Working Group Final Draft Report*, *op. cit.* p. 42.

73. F. Barker and M. Sadnicki, *The Disposition of Civil Plutonium in the UK*, 2001, p. xii.

74. NDA *Uranium and Plutonium: Macro-economic Study*, 2007.

75. Royal Society, *Strategic Options for the UK's Separated Plutonium*, Policy, 2007.

76. NDA, *Plutonium Options: for Comment*, 2008.

77. NDA (2009), *Plutonium Topic Strategy: Credible Options Technical Analysis*, 30 January 2009. For EDF views, see p. 16.

78. NDA (2009) *op. cit.* Figure 5, p. 34.

79. NDA (2010) *Plutonium Credible Options Analysis (Gate A)* (2010). In the 2010 report, a few new cost numbers were not redacted, presumably by mistake.

80. NDA (2010) *op. cit.* p. 18.

81. AREVA特别建议道, MOX燃料制造中可接受的由钚-241产生的镅-241的最高含量为4%, 通过稀释的方法可实现上述要求。这会钚库存中被视为废物部分的量从假定的5%降低至0.2%。另外, 有11.7吨钚需经过化学清理后再能被用于制造MOX燃料。NDA (2010) *op. cit.* pp.143, 148, 153.

82. NDA (2010) *op. cit.* p. 55.

83. DECC (2011a) *Management of the UK's Plutonium Stocks – a consultation on the long-term management of*

UK owned separated civil plutonium, February 2011, para. 20, p. 8. 连同该报告一起还有一份简要的NDA文件, *Plutonium Strategy Current Position Paper* (2011), 但此报告未能增加 NDA早期报告的内容。

84. DECC (2011a) *op. cit.* p. 19. 假设MOX燃料含钚8.5%, 140吨钚则能制造1650吨MOX燃料。如果按照60年使用完这些MOX燃料计算, 每年需要消耗27.5吨。如果这些MOX燃料仅占两座反应堆装料的40%, 那么每年反应堆燃料的使用量将为70吨。今天, 一座功率为1000MWe的反应堆每年使用的低浓铀燃料约为20

吨。两座功率1700MWe的反应堆将需使用70吨低浓铀燃料。AREVA的EPR反应堆作为所能提供的最大功率的反应堆，其发电能力为1650MWe。

<http://www.aveva.com/EN/global-offer-419/epr-reactor-one-of-the-mostpowerful-in-the-world.html>.

85. DECC, *Management of the UK's Plutonium Stocks: A consultation response on the long-term management of UK-owned separated civil plutonium*, 1 December 2011.

86. DECC, *Management of the UK's Plutonium Stock – a consultation on the proposed Justification process for the reuse of plutonium*, 28 May 2012; DECC, *Management of the UK's Plutonium Stock – a consultation response on the proposed Justification process for the reuse of plutonium*, May 2013; 和 DECC, *Guidance for Applicants on the justification process for the reuse of plutonium*, May 2013.

87. NDA (2014), *Progress on Approaches to the Management of Separated Plutonium – Position Paper*.

88. “EC Approval of UK Nuclear Subsidy Sets Off European Firestorm,” *Nuclear Intelligence Weekly*, 10 October 2014.

89. *The Guardian*, 22 January 2015, <http://www.theguardian.com/environment/2015/jan/22/uknuclear-ambitions-dealt-fatal-blow-by-austrian-legal-challenge-say-greens>.

90. EDF和Horizon是英国两个最活跃的潜在反应堆开发者，他们公开表示强烈反对使用MOX燃料。或者，如NDA所言“开发者是否将MOX燃料列入其考虑上不确定”，NDA (2014) *op.cit.* p. 6.

91. NDA (2014) *op. cit.* p. 6.

92. NDA (2014) *op. cit.* p. 7.

93. *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (IPFM, 2010), p. 93.

94. NDA (2014) *op. cit.* p. 16.

95. *Nuclear Intelligence Weekly*, 10 October 2014, p. 1.

96. 阿根廷、中国、加拿大、韩国和罗马尼亚都有CANDU-6型反应堆。

97. NDA (2014) *op. cit.* p. 18.

98. 美国能源部*Preferred Disposition Plan for Sodium-Bonded Spent Nuclear Fuel*, 国会报告(2006年3月)表1和3, 假设燃料中含钷量为20%。有关计划的缓慢痛苦进程的信息也可参考能源部,《2014财年国会预算申请》(*Fiscal Year 2014 Congressional Budget Request*), Vol. 3, p. NE-51.2012财年, 仅加工了68千克EBR II乏燃料, 预计2013年和2014年处理量也类似。

99. NDA (2014) *op. cit.* pp. 9 – 10.

100. J.W. Hobbs, C.R. Scales, *et al.*, “A Programme to Immobilise Plutonium Residues at Sellafield,” Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, Florida, July 15 – 19, 2012.

101. 最初每罐批料中含钷0.3—0.5千克, 需要进行固化的混合物中平均含钷量仅20%。C. R. Scales, UK National Nuclear Laboratory, personal communication, 11 April 2014.

102. U.S. DOE, *Plutonium: The First 50 Years* (DOE/DP-0137, 1996) Figure 3 and Table 15.

103. 1996年, 美国宣布有14.5吨过剩的政府燃料级钷和反应堆级钷, 美国能源部, *Plutonium: The First 50 Years* (1996), 图3, 但是其中7吨钷为乏燃料中的钷, *Draft Surplus Plutonium Disposition Supplemental Environmental Impact Statement: Summary* (US DOE, DOE/EIS-0283-S2, 2012)图 S-7, 包括5吨位于DOE汉弗特场址的未加工的生产堆燃料(多数为N-反应堆), *Management of Spent Nuclear Fuel from the K Basins at the Hanford Site, Richland, Washington* (Draft Environmental Impact Statement (DOE, DOE-EIS-0245, 1995) p. 1.1.

104. IAEA, *Communication Received from the United States of America Concerning its Policies Regarding the*

Management of Plutonium, INFCIRC/549/Add.6/17, 6 October 2014.

105. US DOE, “Amended Record of Decision: Storage of Surplus Plutonium Materials at the Savannah River Site,” *Federal Register*, 11 September 2007, pp. 51807-11.

-
106. “Designing a container for safe, long-term storage: A primer on the DOE 3013 Standard,”
<http://www.lanl.gov/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/04fall/primer.html>.
107. US DOE, “Record of decision for the Storage and Disposition of Weapons-Usable Fissile Materials Final Environmental Impact Statement,” *Federal Register*, Vol. 62, No. 13, 21 January 1997, p. 3014.
108. US DOE, *Surplus plutonium disposition: Final Environmental Impact Statement* (DOE/EIS-0283, 1999) Vol. 1, p. 10.
109. US DOE, “Record of Decision for the Surplus Plutonium Disposition Final Environmental Impact Statement,” *Federal Register*, Vol. 65, No. 7, 11 January 2000, p. 1608.
110. Agreement between the Government of the United States of America and the Government of the Russian Federation Concerning the Management and Disposition of Plutonium Designated as No Longer Required for Defense Purposes and Related Cooperation, Annex on Quantities, Forms, Locations, and Methods of Disposition (2000), hereafter the PMDA.
111. U.S. Department of Energy, *Surplus Plutonium Disposition Final Environmental Impact Statement* (1999)
Vol. 1a, pp. 2 – 26 to 2 – 29.
112. DOE, National Nuclear Security Administration, Office of Fissile Materials Disposition *Report to Congress: Disposition of Surplus Defense Plutonium at Savannah River Site* (2002) Table ES-3 and US DOE, “Amended Record of Decision, Plutonium Disposition Program,” *Federal Register*, Vol. 67, No. 76, 19 April 2002, p. 19432. DOE已对MOX燃料法和罐中罐法处置钚进行了成本分析。所计算的将33吨钚转化为MOX燃料的成本为20亿美元，K. A. Williams, *Life Cycle Costs for the Domestic Reactor-Based Plutonium Disposition Option* (Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-1999 – 257, 1999) 表 1. 罐中罐方法固化50吨钚的成本约为13亿美元，*Design-Only Conceptual Design Report: Plutonium Immobilization Plant Prepared by Bechtel for Lawrence Livermore National Laboratory* (Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-I31617, Rev. 1, 1999) 表 9.3.成本分析由不同的研究组完成，因此无一致偏差。但是更低的钚固化成本也是可行的，因为这将产生未经加工的钚“球”，每个含约50克钚（基于每小罐所含钚为1千克，每个小罐有20个球，见上文）每个MOX燃料小球含钚仅1克，这些小球需经精密加工后装入燃料棒包壳管。布什政府在向国会汇报的报告中（表ES-3）中假设低浓铀燃料替代费用（credit）为7.33亿美元，约相当于当时低浓铀的总成本。美国反应堆在使用MOX燃料是需提交许可证的附件，且MOX燃料运输和现场存储也有特殊安保需求。另外，低浓铀燃料是一种可以从多个供应商获取的商品，MOX燃料的生产依赖于政府且生产安排不确定。考虑到额外的成本和风险，1999年橡树岭研究估计MOX燃料销售折扣因子应该在0.5到0.9之间，*Life Cycle Costs for the Domestic Reactor-Based Plutonium Disposition Option*, op. cit. p. 9.
113. U.S. DOE, *Plan for Alternative Disposition of Defense Plutonium and Defense Plutonium Materials that were Destined for the Cancelled Plutonium Immobilization Plant* (2007).使用玻璃而不是陶瓷的原因是萨凡纳河场址有很多玻璃化专业储备。每个小罐中的平均钚量可减至1到0.6千克，因为多数的钚是和其他物质混合在一起。这也将致使每个高放废物罐中的钚量从28千克减至16千克。计划将在高安保级别的K区设施（这里集中了DOE其他场址的非弹芯钚）建造钚-玻璃化工厂。
114. *Plan for Alternative Disposition of Defense Plutonium* op. cit. p. 1. In 2012, “the bulk” of the ZPPR plutonium was declared surplus again, DOE, *Draft Surplus Plutonium Disposition SEIS* (2012), p. S-3.
115. DOE, *Alternative Study for Locating a Plutonium Vitrification Process in Existing Savannah River Site Process Facilities*, Report Y-ADS-G-00002, 8 June 2004, cleared for public release, 9 October 2014,
p. 4. 研究假设有一条手套箱生产线将被用于钚的玻璃化。有可能较晚时候的计划假定仅将一条生产线用于钚玻璃化。
116. Edwin S. Lyman, *Excess Plutonium Disposition: The Failure of MOX and the Promise of Its Alternatives* (Union of Concerned Scientists, December 2014) <http://www.ucsusa.org/sites/default/>

files/attach/2015/01/Excess%20Plutonium%20Disposition.pdf, Figure 1.

117. 奥巴马政府在2012年的一份环境影响声明 (SEIS) 补充草案中在此提到13吨非弹芯钚的问题。目前较好的方案是纯化尽量多的钚以便用于MOX燃料制造, 同时稀释剩余的2吨钚, 将其在新墨西哥州西南部深地下盐床的废物分离试验设施。DOE, *Draft Surplus Plutonium Disposition SEIS* (2012), p. B-17. 2013年, 美国主要钚处置计划, MOX燃料制造再次成为担忧的焦点, 该补充EIS计划于是被搁置。

118. “Department of Energy”, factsheet on fiscal year 2014 budget, April 10, 2013, www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2014/assets/energy.pdf.

119. DOE, *Improving Project Management: Report [to the Secretary of Energy] of the Contract and Project Management Working Group*, November 2014, p. 21.

120. *Department of Energy FY 2014 Congressional Budget Request*, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration* (2013) pp. DN-119, 129, 137.

121. MFFF的建造和运营成本数据来自《能源部2016财年国会预算申请》, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration*, pp. 628, 636 加上23亿建造和运行相关废物固化建筑物的成本, *Department of Energy FY 2015 Congressional Budget Request*, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration*, pp. 542, 564.

122. “能源部,”2015财年预算资料, 4 March 2014, www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/budget/fy2015/assets/energy.pdf.

123. Savannah River Site Force, Report, 30 September 2014.

124. Explanatory Statements Submitted by Mr. Rogers of Kentucky, Chairman of the House Committee on Appropriations Regarding the Consolidated Appropriations Act, 2014” *Congressional Record*, 15 January 2014, p. H879, column 3; the Consolidated and Further Continuing Appropriations Act, 2015, *Congressional Record*, 11 December 2014, p. 9705, column 2; and *DOE FY 2016 Congressional Budget Request*, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration*, p. 623.

125. Explanatory Statement Submitted by Mr. Rogers of Kentucky, Chairman of the House Committee on Appropriations Regarding the Consolidated and Further Continuing Appropriations Act, 2015, *op. cit.*

126. “法案生效日[2014年12月19日]30天内, 部长应该和联邦基金研发中心达成合作, 开展研究评估过剩武器钚方案……法案生效日180天内, 联邦基金研发中心开展研究……应该想部长提交研究报告, 包括发现和建议……法案生效日270天内, 部长应该向国会国防委员会提交该研究的报告……该报告……应该包括……联邦研发中心的报告……确认部长考虑的MOX设施的替代方案, 包括对替代方案的生命循环成本分析……确认所有替代方案的生命循环成本分析的比例……讨论MOX设施的持续问题, 包括一个未来经费简况和一个部长选定觉得合适的替代方案的详细讨论……讨论有关实施这种替代方案的讨论, 包括所有的法规和公众接受度问题, 包括与相关国家的互动……解释MOX设施的替代方案为何是符合钚处置协议的, 和假如替代方案不符合协议规定, 应该采取什么措施来确保其符合规定……确认部长清除MOX设施相关所有活动的步骤和相应的成本……”《2015财年国家国防授权法案》, Section 3120, *Disposition of Weapons-Usable Plutonium*, <https://www.congress.gov/113/bills/hr3979/BILLS-113hr3979enr.pdf>.

127. U.S. Code 50, Chapter 42, Subchapter III, section 2566, “Disposition of weapons-usable plutonium at Savannah River Site” as amended in the National Defense Authorization Act For FY 2013. 2016年1月截止日期最初在《2003年国家国防授权法案》中被设定为2011年。

128. U.S. DOE, Report of the Plutonium Disposition Working Group, *Analysis of Surplus Weapon - Grade Plutonium Disposition Options*, April 2014, <http://nnsa.energy.gov/aboutus/ourprograms/dnn/fmd/plutonium/pudispositionoptions>.

129. Edwin S. Lyman, *Excess Plutonium Disposition: The Failure of MOX and the Promise of Its Alternatives* (Union of Concerned Scientists, 2014).

-
130. DOE, Report of the Plutonium Disposition Working Group (2014), *op. cit.* Tables F1 and F2.
131. “Pipe Overpack Container for Transuranic Waste Storage and Shipment,” U.S. Patent 5,998,800, 7 December 1999.
132. “85千克”源于 “Amended Interim Action Determination, Disposition of Plutonium Materials from the Department of Energy (DOE) Standard 3013 Surveillance Program at the Savannah River Site, Savannah River Operations Office,” Aiken, South Carolina, 30 March 2011. “500千克”数据来自David C. Moody, Manager, Savannah River Operations Office, “Interim Action Determination: Disposition of Certain Plutonium Materials Stored at the Savannah River Site,” 17 October 2011. 截至2014年12月9日,已经加工27罐钚,内容源于规划分析师(Planning Analyst)Rich Olsen写给Tom Clements 的邮件, DOE-Savannah River. 其中所含钚量并未给出,但3013罐中允许的钚量是4.4千克。
133. 大量工人吸入总量为一毫克武器级钚将可导致约10人死于癌症, Steve Fetter 和 Frank von Hippel, “The Hazard from Plutonium Dispersal by Nuclear-warhead Accidents,” *op. cit.*
134. David C. Moody, Manager, “Disposition of Certain Plutonium Materials Stored at the Savannah River Site,” *op. cit.*
135. Patrick W. McGuire, 和材料固化项目经理助理, Savannah River Operations Office to Edgardo Deleon, Director,核材料处置办公室, U.S.Department of Energy, “Proposed Cost for Receipt and Disposition of GAP Plutonium Materials,” 12 June 2012.
136. *CH TRAMPAC*, Rev. 4, April 2012, <http://pbdupws.nrc.gov/docs/ML1214/ML12145A261.pdf>, Figure 2.9 – 23.
137. *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (April 2014) p. 29.
138. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (2014) Table F1.
139. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (2014) Attachment F.
140. *WIPP Status Report*, (DOE, WIPP Waste Data System, 14 February 2015).
141. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group* (2014), *op. cit.* p. C-F-6. 《废物分离试验厂土地回收法案》(The Waste Isolation Pilot Plant Land Withdrawal Act) 将能在其中存放的嬗变废物总量为620万立方英尺 (176,000 立方米)。截至2015年2月14日,已使用约91,000立方米, *WIPP Status Report*, (DOE, WIPP Waste Data System, 14 February 2015).
142. Lyman, *Excess Plutonium Disposition* (2014), *op. cit.*, p. 65.
143. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (2014) p. C8 and Appendix C-F.
144. 每千克武器级钚每秒发射的穿透中子数约56000, Steve Fetter et al, “Detecting Nuclear Warheads,” *Science & Global Security*, Vol. 1 (1990) p. 229.
145. Patrick Malone, “Missteps & Secrets: LANL [Los Alamos National Laboratory] officials downplayed waste’s dangers even after WIPP leak,” Santa Fe New Mexican, 15 November 2014.
146. *Waste Isolation Pilot Plant Recovery Plan* (US Department of Energy, 30 September 2014); and Meg Mirshak, “Repository work delays Savannah River Site nuclear waste shipments,” *Augusta [South Carolina] Chronicle*, 28 January 2015.
147. Robert Neill, “New Mexico Environmental Evaluation Group Experience in Reviewing WIPP,” *Waste Management Symposium*, 1983, <http://www.wmsym.org/archives/1983/V1/17.pdf>. “新墨西哥州环境评估组(EEG)之前对WIPP进行了独立技术评估以确保其对公众健康、安全和环境方面的保护。DOE 在2004年停止了对EEG的经费支持,网站也因此下线。”<http://www.nmenv.state.nm.us/wipp/wipplinks.html>.
148. *Report of the Plutonium Disposition Working Group* (DOE, 2014), *op. cit.* p. 25.
149. *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (DOE, April 2014), C-8.
150. *Report of the Plutonium Disposition Working Group*, *op. cit.* (April 2014), pp. C-E-4 to C-E-11. 据称,未发表的DOE评估报告给出结论说对K-区升级以满足钚玻璃化要求将耗资数十亿美元。这一说法需独立审核。

151. “需要在2026年之前完成钚的固化以避免影响目前国防废物加工设施（DWPF）的高放废物玻璃化时间安排;这一时间安排由可申请的允许和同意命令来协调……基于DWPF中高放废物处置的提案速度和日程安排，有可能满足可用于玻璃化约6吨过剩钚的高放废物量不够。这种情况下，可能剩余约7.1吨钚不能被固化和玻璃化，这些钚需要通过其他方法处理,” DOE, *Draft Surplus Plutonium Disposition SEIS* (2012) p. S-26.
152. Meg Mirshak, “Costs increase nearly \$1 billion for salt waste facility at Savannah River Site, *Augusta Chronicle*, Sept. 17, 2014.
153. Savannah River Remediation, *Liquid Waste System Plan* (SRR-LWP-2009-00001, Revision 19, May 2014) Figure 7-1. 与铯-137衰变有关的能量为0.66MeV的伽马射线实际上是由短寿命的亚稳态放射性同位素钡-137发射的，铯-137衰变时间的95%会以钡-137的形态存在。
154. Leonard W. Gray and Thomas H. Gould, *Immobilization Technology Down-Selection: Radiation Barrier Approach* (Livermore National Laboratory, UCRL-ID-127320, 1997) p. 4.
155. L. W. Gray and J. M. McKibben, *The Spent Fuel Standard – Does the Can-in-Canister Concept for Plutonium Immobilization Measure Up?* (Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-134620, 1999); L.J. Jardine, G.A. Armantrout, and L.F. Collins, “Utilization of Cs137 to Generate a Radiation Barrier for Weapons Grade Plutonium Immobilized in Borosilicate Glass Canisters,” *Waste Management ‘95 Winter Meeting, Tucson, AZ, 26 Feb. to 2 March 1995*; and Dr. Jungmin Kang (unpublished).
156. U.S. DOE, *Plan for Alternative Disposition of Defense Plutonium and Defense Plutonium Materials that were Destined for the Cancelled Plutonium Immobilization Plant* (2007).
157. 预测总计8582个罐子中的 3,912已填满, Rich Olsen, Planning Analyst, DOE-SavannahRiver, presentation to the SRS Citizens Advisory Board, 27 January 2015, slide 9.
158. DOE FY 2016 Congressional Budget Request, Vol. 5, *Environmental Management*, pp. 263, 287.
159. DOE, *Alternative Study for Locating a Plutonium Vitrification Process in Existing Savannah River Site Process Facilities*, 8 June 2004, cleared for public release, 9 October 2014, p. 4.
160. National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2015, Section 3120, part d.
161. Austin Jenkins, “[Governor] Inslee Announces Court Action In Hanford Cleanup Fight,” KPLU, 3 October 2014.
162. U.S. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group, op. cit.* (2014) p. C-G-3.
163. Bill W. Arnold, Patrick Brady, et al, *Deep Borehole Disposal Research: Geological Data Evaluation, Alternative Waste Forms, and Borehole Seals* (Sandia National Laboratory, SAND2014-17430R, 2014)
- 附录 A. 作为之前位于Maxey Flats的一个地表放射性废物处置场址, Kentucky 的排名也在萨凡纳河场址之上。萨凡纳河场址与美国原子能委员会位于内布拉斯加州的短寿期钠冷哈勒姆核电站排名并列。
164. *Deep Borehole Disposal Research* (2014) *op. cit.* chapter 3.
165. 很明显，DOE被限制不能将这些描述为通用-日立PRISM反应堆，但是这些反应堆的参数与PRISM是一样的。
166. See e.g. *Project And Program Management: DOE Needs to Revise Requirements and Guidance for Cost Estimating and Related Reviews* (U.S. Government Accountability Office, GAO-15-29, 2014).
167. “Sellafield firm loses L9bn clean-up contract,” BBC, 13 January 2015, <http://www.bbc.com/news/business-30785623>.
168. Pavel Podvig, *Consolidating Fissile Materials in Russia’s Nuclear Complex* (IPFM, 2009) pp. 10 – 13.
169. 速度为2.2千米/秒的种子能量转化为温度的公式为： $E = 0.0252 \text{ eV} = kT$ ，其中k是玻尔兹曼常数，对应的温度是20摄氏度, *Handbook Of Nuclear Data For Safeguards: Database Extensions, August 2008* (IAEA, INDC[NDS]-0534, 2008) Table A-5.

170. 对于燃耗为50MWt-天/每千克重金属MOX燃料, 如果新的MOX燃料含8.6%的钷, 经过5年冷却的乏燃料中将含6%加0.7%的其他嬗变元素(钆、铈和钷), *MIT Study on the Future of the Nuclear Fuel Cycle* (2011) p. 74.
171. 用于MOX燃料的燃耗为53MWd/千克的低浓铀中的钷的计算由Jungmin Kang, 18 November 2014.
172. ANDRA, *Architecture et gestion du stockage géologique [Architecture and management of geological storage]*(2005), p. 74.
173. 2013年1月, 奥巴马政府宣布“支持在2048年建成地质处置库”的战略, *Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste* (U.S. Department of Energy, 2013). 日本和英国也开展了放射性废物地质处置库的选址计划。
174. 这种废物有时候被描述为“超铀元素” – 可能是因为其中包含少量因短寿期的钷-241(半衰期14.4年)衰变而形成的铈-241。
175. 目前假定WIPP风险评估中钷的量为12公吨, DOE, *Title 40 CFR Part 191 Subparts B and C Compliance Recertification Application 2014 for the Waste Isolation Pilot Plant Appendix SOTERM-2014 Actinide Chemistry Source Term*, Table SOTERM-9,
http://www.wipp.energy.gov/library/CRA/CRA-2014/CRA/Appendix_SOTERM/Appendix_SOTERM.htm#Figure_SOTERM-6.
176. 压水堆和沸水堆的(燃料)小球直径分别为1.04和0.82厘米,
http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22_06F10_lec06a.pdf, slide 12.
177. Bechtel, *Design-Only Conceptual Design Report: Plutonium Immobilization Plant*, *op. cit.* (1999) p. 5.
178. *Plutonium Immobilization Plant Using Ceramic in New Facilities at the Savannah River Site* (Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-128273, 1998) p. 1 – 6, Table 6 – 2.
179. “Synroc Wasteform” (World Nuclear Association),
<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Synroc/>
180. C. R. Scales, UK National Nuclear Laboratory, personal communication, 11 April 2014.
181. U.S. DOE, *Technical Summary Report for Surplus Weapons-Usable Plutonium Disposition*, *op. cit.* (1996)
Figure 2 – 4.
182. *Alternative Study for Locating a Plutonium Vitrification Process in Existing Savannah River Site Facilities*, *op. cit.* p.6.
183. Pascal Aubret, Director of AREVA La Hague, to Mycle Schneider, 2 February 2015.
184. Mycle Schneider, “Fast Breeder Reactors in France,” *Science & Global Security* Vol. 17 (2009) pp. 67– 84.
185. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kötting-Uhl, Cornelia Behm, Harald Ebner, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – “Stand der Wiederaufarbeitung deutscher Brennelemente im Ausland und des deutschen Plutonium-Inventares” [Reply of the Federal Government [of Germany] to questions of Members Sylvia Kötting-Uhl, Cornelia Behm, Harald Ebner, other Members and the Green Faction on the “State of the reprocessing of German fuel abroad and German plutonium Inventories”, 31 January 2012.
186. Klaus Janberg, personal communication, 15 May 2014.
187. “2008年6月30日, AREVA La Hague场址的钷转移和处置操作已完成。2003年到2008年间, 相当于3年的(钷)产量被以新燃料的形式回收。”

<http://www.aveva.com/EN/operations-1094/the-cadarache-facilityactivities--cleanup-and-disassembly.html>.
基于Cadarache每年40吨的产率（in *Status and Advances in MOX Fuel Technology* (IAEA, 2003) 表 2），并假设其中含6%的钚，这样算的话钚的量约为7吨。

188. “Residues conditioned into rods and shipped back to customers: 2007,” J. M. Cuchet et al, “Decommissioning the Belgonucleaire Dessel MOX Plant: Presentation Of The Project and Situation, End August 2013”, ICEM’2013, Session 3.11, slide 6. 来自德赛尔（Dessel）的库存MOX燃料的所有权被转移至其客户，而很可能这些客户将MOX燃料转移给了La Hague以交换支付AREVA的费用和等量包含在MOX燃料中的钚的。

189. “当局要求关闭就得MOX设施。接下来数年提交的要求继续运行的申请也被拒绝。这意味着全面运行的生产线已经停滞，留下2.25吨处于不同加工阶段的钚……适合转移的材料中，有550千克以PuO₂及混合氧化物的形式存在的钚目前已经被运往英国和法国， Helmut Rupa et al, “Decommissioning of Four German

Fuel Cycle Facilities,” Waste Management 2000 Conference, February 27 – March 2, 2000, Tucson, AZ; “直到MOX厂清理干净之前，核燃料仍被以可长期存储并在任何反应堆中使用的“仓储元件（storage elements”形式存放在其中。这些仓储元件被送往法国La Hague的AREVA NC进行加工,” Werner Koenig et al, “Release and Disposal of Materials During Decommissioning of Siemens MOX Fuel Fabrication Plant At Hanau, Germany,” *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management ICEM2007, September 2 – 6, 2007, Bruges, Belgium, ICEM07-7205*.

190. Melox工厂约5%的钚产量被最终制造成这种低规格MOX燃料， Yves Marignac, personal communication.

191. David Kossen et al, *External Technical Review of the Plutonium Preparation Project at Savannah River Site* (2008), <http://energy.gov/sites/prod/files/em/PuPPETRreport.pdf>.

192. Japan Atomic Energy Commission, “The Situation of Separated Plutonium Management in Japan as of the End of the Year 2013” (in Japanese).

193. 据我们所知，最早对钻孔处置钚进行分析的是Johan Swahn. *The Long-Term Nuclear Explosives Predicament: The Final Disposal of Militarily Usable Fissile Material iInNuclear Waste from Nuclear Power and from the Elimination Of Nuclear Weapons* (Technical PeaceResearch Group, Institute of Physical Resource Theory, Göteborg, Sweden, 1992.)

194. 美国要求的钻孔处置方提议设计的要求是，深度低于2公里时，母岩应该是花岗岩基底或玄武岩， *Deep Borehole Disposal Research, op. cit.* (Sandia, 2014).

这种岩石没有岩层结构，因此不可能会有积存的、压缩的水分，即自流水。

195. 参考例 A. John Beswick, Fergus G. F. Gibb and Karl P. Travis, “Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering challenges,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (2014) <http://dx.doi.org/10.1680/ener.13.00016>.

196. U.S. Department of Energy, *FY 2015 Congressional Budget Request*, Vol. 3 (2014), pp. 449 – 450.

197. 圣地亚钻孔设计钻孔的底部两公里深度可容下253公吨重金属乏燃料， Pat Brady et al, *Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report*(Sandia National Laboratory, SAND2012-7789, 2012), p. 9. 燃料呈圆柱形棒的形式以最密排（六方）方式存在，罐中91%的体积可被棒材占据。棒73%的横截面由铀氧化物“肉”填充。其余的为燃料包壳和“肉”间空隙及外壳。容器体积约三分之二为燃料小球。铀燃料小球的密度约为9.6克/立方厘米。罐中铀的平均密度为6.3克/立方厘米，装载253吨乏燃料重金属的体积约为40立方米。这相当于直径16厘米（6英寸）、长2公里的圆柱体的体积。

198. 对于含有水和3%浓缩铀优化混合物，即一种不现实的极端例子，达到临界的最小直径是约27厘米， *Critical Dimensions of Systems Containing U-235, Pu-239, and U-233* (LosAlamos National Laboratory,

LA-10860-MS, 1987), Fig. 24. Results with MOX mixes with the same percentage of plutonium mixed with depleted uranium are comparable, *op. cit.* Table 18. 3%也是MOX乏燃料中易裂变材料（钚-239和钚-241）的平均浓度， *Plutonium Fuel: An Assessment* (OECD Nuclear Energy Agency, 1989) 表 12B.

199. 小罐直径为5英寸，高10英寸，体积3.2升，装钚量可达4.4千克，

<http://www.lanl.gov/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/04fall/primer.html>.

200. Auric̃a Barbu and Mihai Ovidiu Cojokaru, “The Cold Pressing Behavior of Uranium Dioxide and Triuranium Octoxide Mixed Powders,” *Universitatea Politehnica Bucuresti, Bulletin Stiintific, Series B*, Vol. 75, Issue 4 (2013) pp. 221 – 230.

201. Pat Brady et al, *Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report op. cit.* Table 1.

202. See e.g. William Weber and Rodney Ewing, “Ceramic Waste Forms for Uranium and Transuranium Elements,” in *Uranium: Cradle to Grave*, Peter C. Burns and Ginger E. Sigmon, eds. (Mineralogical Association of Canada Short Course Series Volume 43, 2013).

203. DOE, *Report of the Plutonium Disposition Working Group, op. cit.* (April 2014), p. 29.

204. 这一问题由Johan Swahn提出，他是瑞典核废料评估非政府组织办公室主任（Sweden’s NGO Office for Nuclear Waste Review）。

205. *Radioactive materials and waste Planning Act of 28 June 2006* (ANDRA)

<http://www.andra.fr/download/andra-international-en/document/editions/305cva.pdf>, Article 12.

206. *Choosing a Way Forward: The Future Management of Canada’s Used Nuclear Fuel, Final Study* (Nuclear Waste Management Organization of Canada, 2005) p. 27.

207. IAEA, “Communication received from the United States of America concerning its policies regarding the management of plutonium,” INFIRC/549/Add. 6/17, 6 October 2014.

208. *Concepts and Strategies for Transparency Monitoring of Nuclear Materials at the Back End of the Fuel/ Weapons Cycle: Summary of the [Cooperative Monitoring Center] WIPP Monitoring Workshop February 16 – 18, 1999, Albuquerque, NM and Carlsbad, NM*; David Betsill, et al, *Nuclear Waste Repository Transparency Technology Test Bed Demonstrations at WIPP*, and DOE, *Report to Congress on the Use of the Waste Isolation Pilot Plant to Develop and Demonstrate Transparency Technologies* (2000).

209. “Pipe Overpack Container for Transuranic Waste Storage and Shipment,” Patent Number 5,998,800, 7 December 1999.