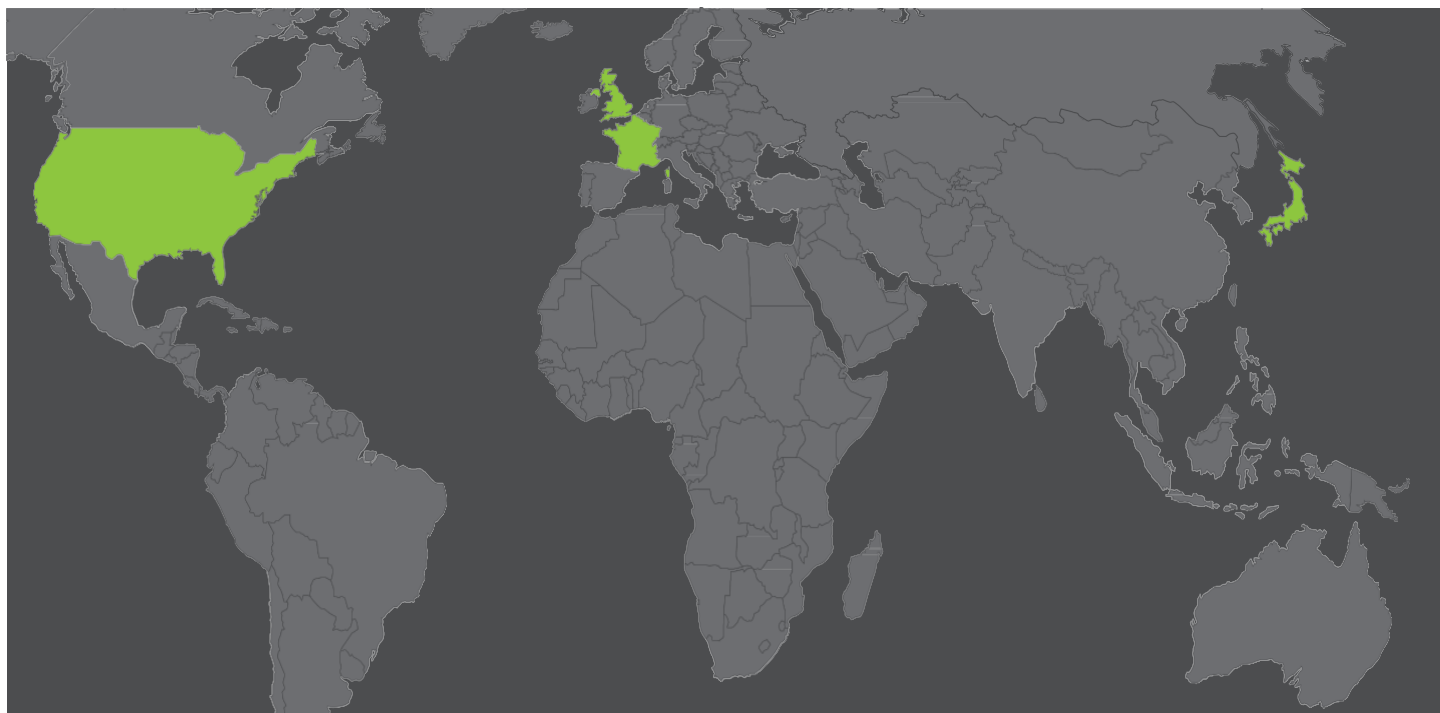




IPFM
INTERNATIONAL PANEL
ON FISSILE MATERIALS
核分裂性物質に
関する国際パネル

MOX利用に代わる道

分離済みプルトニウムの直接処分オプション

フランク・フォンヒッペル、ゴードン・マッケロン

2015年4月

研究報告 No. 13

核分裂性物質に関する国際パネル(IPFM)

MOX利用に代わる道

分離済みプルトニウムの直接処分のオプション

フランク・フォンヒッペル、ゴードン・マッケロン

翻訳 田窪雅文（ウェブサイト核情報主宰／IPFM メンバー takubomasa@ybb.ne.jp）

編集協力 真下俊樹

©2015 International Panel on Fissile Materials

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Noncommercial License To view a copy of this license, visit www.creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0

表紙：地図は、本報告書で扱った大量のプルトニウム保有国を示している。

目次

IPFM について	1
要約	2
序論	4
フランスと日本	12
英国	17
米国	23
直接処分オプション	34
国際的透明性	40
結論	41
文末注	43
著者紹介	54

表

表1 世界の分離済みプルトニウム量：2013年末	5
--------------------------	---

図

図 1 世界の分離済みプルトニウム量の増大と世界の運用態勢の核兵器の核弾頭数の増大と減少：1945-2013	4
図 2 米国の原子力発電会社が1965～2013年に支払った平均ウラン価格（恒常ドル）	7
図 3 フランスの民生用未照射プルトニウムの増加	13
図 4 日本の未照射プルトニウム量の増加	15
図 5 英国の分離済み民生用プルトニウムの増加	17
図 6 英国セラフィールドの製品・残留物保管施設	18
図 7 米国エネルギー省サバンナ・リバー・サイトのプルトニウム貯蔵容器（K エリア物質貯蔵施設）	23
図 8 建設中の米国「MOX 燃料製造施設（MFFF）」（2014年10月25日）	26
図 9 米国エネルギー省の「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」	28
図 10 前セラフィールド MOX 燃料製造プラントのグローブ・ボックス・ライン	29
図 11 固定化されたプルトニウム処分のためのディープ・ボアホールの概略図	39

IPFM について

「核分裂性物質に関する国際パネル(IPFM)」は、2006年に設立された独立のグループで、核兵器国及び非核兵器国を含む18カ国の軍備管理・核不拡散問題の専門家で構成される。

IPFM の使命は、高濃縮ウランとプルトニウムの保管体制の強化、保管場所の整理・統合、そして蓄積量の低減を実現するために实际的で達成可能な政策イニシアティブを策定する際に課題となる技術的問題を分析することにある。これらの核分裂性物質は、核兵器の主要構成材料であり、その適切な管理は、核軍縮・核拡散防止のため、そして、核兵器がテロリストの手に渡らぬように保証するためには不可欠な要素である。

軍事用及び民生用の核分裂性物質はともに対処しなければならない。核兵器国は、未だに、核兵器及び海軍用燃料として核兵器何万発分の核分裂性物質を保有している。民生用の側では、同様の数の核兵器を作るのに十分な量のプルトニウムが使用済み燃料から分離されてしまっている。高濃縮ウランは、百ヶ所以上の場所で民生用原子炉の燃料として使われている。この目的のために使われている量は、合計すると、何百発もの広島型原爆——テロリスト・グループの能力に入りうる設計——を作るのに十分なものである。

IPFM は、プリンストン大学のアレクサンダー・グラザー及びジア・ミアンと長崎大学の鈴木達治郎が共同議長を務める。29人のメンバーは、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、イラン、日本、韓国、メキシコ、オランダ、ノルウェー、パキスタン、ロシア、南アフリカ、スウェーデン、英国、米国の核問題専門家である。メンバーの略歴は、IPFM のウェブサイト www.fissilematerials.org で見ることができる。

IPFM の研究・報告書は、国際機関、各国政府、非政府機関等と共有される。報告書は IPFM のウェブサイト及びブログ www.fissilematerials.org/blog から入手することができる。

プリンストン大学の科学・世界安全保障プログラムが IPFM の事務・研究サポートを提供している。

IPFM は、ジョン・D・アンド・キャサリン・T・マッカーサー財団（シカゴ）及びカーネギー・コーポレーション（ニューヨーク）からプリンストン大学に提供された助成金によって支えられている。

要約

冷戦がもたらした一つの危険な遺産は、約220トンの兵器級プルトニウムである。そのうちの95%を米ロ両国が所有している。米ロは、冷戦の終焉以来、その核兵器保有量を大幅に減らしており、このプルトニウムの多くが余剰となっている。

1994年、米国エネルギー省は、同省が保有する兵器級プルトニウムの約半分に当たる38トンを超えて余剰と宣言した。この量は後に、非兵器級プルトニウムを含め約50トンに増加した。同じ年、米国科学アカデミーの組織したハイレベル委員会は、貯蔵中の分離済みプルトニウムを「今そこにある危機 a clear and present danger」と呼んだ。盗難の可能性があるためである。そして、このプルトニウムの処分を遅らせることがないように呼びかけた。

2000年、米ロはそれぞれ、余剰プルトニウム34トンを超えて処分することで合意した。主として、軽水炉のウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料として使うとの計画である。ロシアがこの取り組みに参加するよう促すため、米国は、ロシア側のコストのほとんどを支払うことを申し出た。処分は、2007年末までに始まるはずだった。

しかし、軽水炉 MOX 燃料計画の予定は遅れ、見積もりコストは上昇した。米国は、ロシアの計画に対する資金提供の約束を増大させ続けることはできないと判断し、2010年、兵器用プルトニウムをプルトニウム増殖実証炉の燃料として使いたいというロシア側の希望を受け入れることにした。残念ながらロシアは、同実証炉で照射された燃料からプルトニウムを分離してリサイクルする計画である。したがって、ロシアにおけるプルトニウム盗難の危険は減らない。

米国の軽水炉 MOX 計画の見積もりコストは急速に上がり続けた。現時点で10倍以上となっている。2013年、オバマ政権は、これは「負担しきれないかもしれない」として、費用がもっと少なくてすむ代替方法を探求することを決めた。

これと並行して、民生用分離済みプルトニウムの余剰問題がフランス、日本、ロシア、英国で生じている。これら国々は、すべて、1960年代から70年代にかけて使用済み燃料の「再処理」（プルトニウム分離）計画を開始した。元々は、消費した以上のプルトニウムを生み出せる新型原子炉「増殖炉」の初期装荷燃料を提供するのが目的だった。民生用プルトニウムは「兵器級」ではないが、核兵器用に使うことはできる。したがって、軍事用余剰プルトニウムと同じく「今そこにある危機」である。

2013年末現在、民生用分離済みプルトニウムの量は260トンに達している。長崎型原爆3万発以上に当たる量である。しかし、増殖炉の商業化は、不確かな将来の彼方に遠ざかっている。

このため、フランスのコジェマ社（現アレバ社）は、1987年から自社と外国の再処理顧客の分離済み民生用プルトニウムを使って MOX 燃料を製造している。プルトニウムを発生元の軽水炉に戻して使うためである。英国もその顧客のために MOX 燃料製造工場を建てたが、2011年にこれを放棄している。修正不能の設計上の欠陥のためである。日本も MOX 燃料製造工場の建設を進めているが、その完成は大幅に遅れている。

使用済み燃料からプルトニウムを分離する際の膨大なコストを除外しても、プルトニウムを MOX 燃料にするコストだけで、低濃縮ウラン燃料の価格より高くなる。米国の場

合は20倍ほどである。したがって、MOX 燃料の使用というのは廃棄物処分計画とみなさなければならない。となると、別の方法を使うことにより、もっと安いコストで同等の結果を得ることができないかと考えるのは当然のことである。

また、プルトニウムを MOX 燃料にして原子炉で照射しても、プルトニウムの消滅には繋がらないという点を理解することが重要である。プルトニウムの一部は核分裂を起こすが、軽水炉で使った使用済み MOX 燃料に含まれるプルトニウムその他の超ウラン元素の量は、未使用の MOX 燃料内の量の66%に達する。リサイクルを繰り返してプルトニウムをさらに減らすというのは現実的ではない。なぜなら、プルトニウムの同位体組成が変わり、軽水炉内での核分裂が難しくなっていくからである。

米国では、エネルギー省の「プルトニウム処分作業グループ」（以下、「作業グループ」）が2014年に、最も低コストのオプションはニューメキシコの「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIIP）」での処分だとの結論を下している。WIIP は、ニューメキシコ州の地下650メートルの岩塩層に作られた処分場で、すでに、プルトニウムで汚染された核兵器計画関連の廃棄物の埋設が進められている。WIIP のミッションを拡大して米国の余剰プルトニウムのすべてを扱えるようにすることが政治的に可能か否かは定かではない。

米国のプルトニウム処分計画は、元々は、セカンド・トラックを持っていた。サウスカロライナ州サバンナ・リバー・サイトにエネルギー省の施設でガラス固化されつつある高レベル放射性廃棄物の中にプルトニウムを埋め込むというものである。「処分作業グループ」はこのオプションを使うにはもう遅すぎると考えている。しかし、全部ではないとしても、少なくとも、相当量の米国の余剰プルトニウムにとっては遅すぎることはないかもしれない。エネルギー省が一部の放射性廃棄物のために開発中のもう一つのオプションは、地下数キロメートルに掘ったボアホール（超深孔）を使うものである。また、使用済み燃料を入れて地下深くの処分場に定置する容器に、一部の固定化したプルトニウムを入れるという手もあるかもしれない。これらの戦略は、実施される「時間窓」によって二つあるいはそれ以上を組み合わせることになるかもしれない。

MOX に代わるプルトニウム処分方法についての議論を最もオープンに行っているのは米国だが、フランスと日本の MOX 計画も将来も極めて不確かである。日本の MOX 計画は地元で安全性に対する懸念のために、福島事故以前の段階で約10年遅れていた。フランスの MOX 計画は、コスト削減を望む国営電力会社 EDF と、フランスのプルトニウム・リサイクル施設群を運営するアレバ社との間の闘いの焦点となっている。また、MOX 燃料を照射するためにフランスが使っている原子炉はだんだん古くなっている上、アレバが抱える使用不能の MOX 燃料の量は増え続けている。

どのプルトニウム処分方法を採用するにせよ、「検証下での核軍縮」の将来にとって、核兵器国におけるプルトニウム処分を——非核兵器国でやっているように——「国際原子力機関（IAEA）」が検証することが肝要である。

序論

世界の分離済みプルトニウムの量は、冷戦の始まり以来ずっと増え続けている。冷戦の終焉と共に、米、ロ、英、仏、中の各国は兵器用プルトニウムの生産を中止し、米ロ両国は核兵器の量を大幅に削減し、両国の兵器級プルトニウムの総量の40%を余剰と宣言した（図1）。

1960年代から70年代にかけて、民生用目的のために使用済み燃料からプルトニウムを大規模な形で分離することがフランス、ロシア、英国で始まった¹。図1は世界の民生用プルトニウムの量が過去20年にわたって増え続けていることを示している。民生用再処理計画を持つ国々が1997年にプルトニウムの分離と使用のバランスを達成することが必要だと合意したにもかかわらずである²。

したがって、世界には大量の余剰プルトニウムがある。民生用プルトニウムが核兵器に使用可能であることからすると³、この余剰プルトニウムの総量——核弾頭約10万発分⁴——は世界の安全保障にとって大きな課題である。

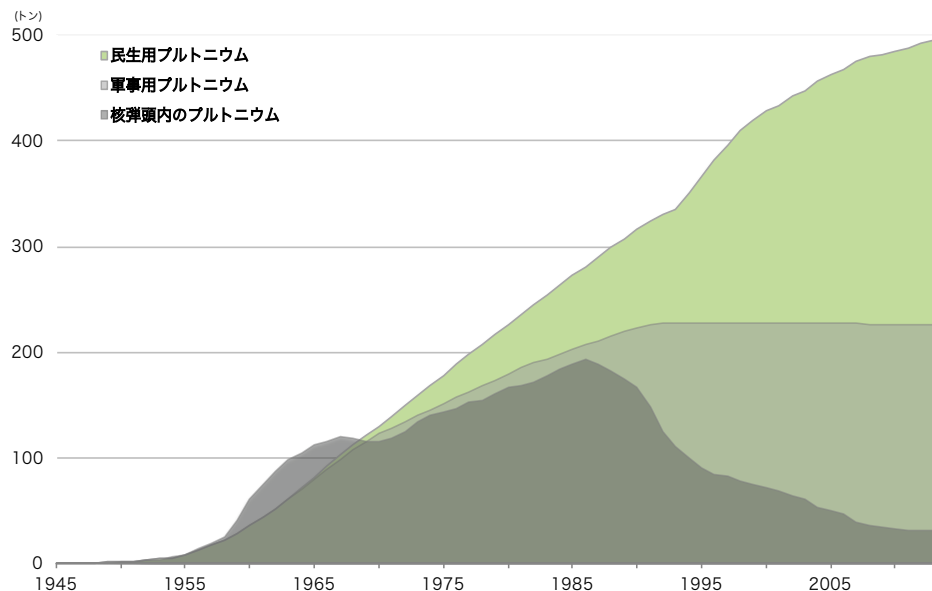


図1 世界の分離済みプルトニウム量の増大と世界の運用態勢の核兵器の核弾頭数の増大と減少：1945-2013

軍事用プルトニウムの量は米ロ両国の余剰プルトニウム処分プログラムが遅れているため横這い状態にある。民生用プルトニウムの方は増え続けている。使用済み燃料からプルトニウムを分離する速度が新しい燃料でのプルトニウムの使用の速度を大きく上回っているためである。運用状態の核弾頭の推定規模を同じスケールにするために、それぞれの核弾頭には平均して3kgのプルトニウムが入っている想定。これだと、1960年代の米国のプルトニウム量に関しては過大推定となるようである。出典：Military plutonium: IPFM, *Global Fissile Material Report 2010*, *Balancing the Books: Production and Stocks and Global Fissile Material Report 2013*. Civilian plutonium: David Albright, Frans Berkhout and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996* (Oxford University Press, 1997) through 1996 and *Global Fissile Material Report 2013*, Appendix 1.3 thereafter. Nuclear warheads: Hans Kristensen and Robert Norris, "Global nuclear weapons inventories, 1945 – 2013" *Bulletin of the Atomic Scientists* Vol. 69, No. 5 (2013) pp. 75 – 81

これまでのところ、余剰軍用プルトニウム・民生用分離済みプルトニウムを持つ国はすべて、このプルトニウムを原子炉の燃料に使っているか、これから使うことを計画している。本報告書は、これらの計画の歴史を振り返り、燃料としての使用に代わる直接処分のオプションを検討する。表1 は世界の分離済みプルトニウムの量を国別に示したもので、4つの範疇に分けている。1) 核兵器中あるいは核兵器用予備、2)余剰と宣言された核兵器用、3)民生用、4)その他（起源あるいは目的について追加的説明を要するもの）。

国	未照射プルトニウムの量（単位：トン）			
	核兵器または予備	核兵器目的に余剰と宣言 ⁵	民生用	その他 ⁶
米国	38.3	43.4	—	6.6
ロシア	88*	34	50	~6
英国	3.2	0.3	99.6	4.1
フランス	6*	0	60.2	—
中国	1.8*	0	0.014	—
インド	0.54*	0	~0.5	~4.7
イスラエル、パキスタン、北朝鮮	1.0*	0	0	—
日本	0	0	47.1	—
その他の非核保有国	0	0	5 ⁷	—
合計	138.8	77.7	262.4	21.4

表1 世界の分離済みプルトニウム量：2013 年末

出典：Global Fissile Material Report 2013 (*印) and national declarations to the IAEA in annual INFCIRC/549 updates.

1970年代に大規模な民生用プルトニウム分離が始められた元々の目的は、液体ナトリウム冷却プルトニウム増殖炉に初期装荷燃料を提供することだった。増殖炉を商業化する計画は、フランス、ドイツ、日本、英国、米国で1980年代から90年代にかけて公にあるいは実質的に放棄され、インド及びロシアで何十年も遅れている。現在、ロシアは、軍用余剰プルトニウム34トン、それに、民生用分離済みプルトニウム50トンを2つの原型増殖炉で使う計画である。1980年代から運転されている BN-600と新しい BN-800（電気出力約80万キロワット）である⁸。インドは、分離済み原子炉級プルトニウムのほとんどすべて（表1で「その他」となっているもの）を電気出力50万キロワットの原型高速増殖炉で使うことにしている。

増殖炉の商業化計画の放棄・頓挫を受けても、フランスと日本は軽水炉の使用済み燃料からのプルトニウム分離を止めず、分離されたプルトニウムを同じ軽水炉の補助燃料とするウラン・プルトニウム「混合酸化物（MOX）」燃料の製造に使うことを決めた。しかし、1976年以来、フランスは自国の軽水炉使用済み燃料から分離したプルトニウムの3分の2ほどしか使えていない。その結果、フランスには大量の民生用分離済みプルトニウムが溜まり、現在も増え続けている。日本は、国内外で分離したプルトニウムの約5%しか使えていない。

1994年に増殖炉計画が放棄されて以来、プルトニウム処分計画を持ってこなかった英国は、今になってやっと、その膨大な量の——世界最大——民生用分離済みプルトニウムの

処分方法を検討している。英国はまた、日本のその他の国のために分離した20トン以上のプルトニウムの処分をしてもいいと申し出ている。

元々の計画は、各国のプルトニウム MOX 燃料にして送り返すはずだった。しかし、セラフィールドの MOX 工場は技術的失敗に終わり、2011年に閉鎖されてしまった。

2010年、米国は、ロシアとの「プルトニウム管理・処分協定」において、同協定の対象となる34トンの兵器級プルトニウムのすべてを MOX 燃料として処分すると約束した⁹。2014年末の時点で米国エネルギー省が MOX 燃料工場の建設に注ぎ込んだ額はすでに約50億ドルに達している——当初見積もりの4倍——が、工場の進捗率は半分ほどである。

その上、完成後の年間運転コスト推定は約7億ドル／年に高騰した¹⁰。このため、オバマ政権は、2010年、MOX によるプルトニウム処分の道は「負担しきれないかもしれない」として、プルトニウム処分の代替オプションの検討を開始した¹¹。これらのオプションについては後で見る。

この序論の残りの部分では、薄れゆく民生用プルトニウム分離の正当化の議論について検討し、プルトニウムの起源が民生用であれ軍事用であれ、プルトニウム処分に関する国家政策を定める際の根本とするべき基本原則のいくつかについて述べる。序論に続く各章では、フランス、日本、英国、米国のプルトニウム処分計画の現状、プルトニウム直接地下処分の各種のアプローチ、そして、IAEA が非核兵器国のプルトニウム処分計画だけでなく、核兵器国のものについてもモニタリングを実施する必要について論じる。

薄れゆく民生用プルトニウム分離の正当化の議論

IPFM は、増殖炉計画の歴史、世界の使用済み燃料管理計画、仏・日・英の再処理計画、そして、米 G・W・ブッシュ政権の再処理計画について報告書を出してきた。また、2015年中に再処理に関する世界の状況について新しい報告書を出すことになっている。これらの報告書については IPFM のウェブサイト www.fissilematerials.org をご覧いただきたい。以下は、概観である。

使用済み発電用原子炉燃料からプルトニウムを分離することを正当化する主要な議論としては次の3つのものが順番に出されてきた。

1. 増殖炉用の初期装荷燃料を提供する
2. 軽水炉用のために補助的燃料として MOX 燃料を提供する
3. 使用済み燃料の管理

プルトニウム増殖炉

民生用プルトニウムの分離は、元々、高品位のウラン鉱床は希少で、ウラン利用効率のずっと高い原子炉が近々必要になるとの考えを出発点として取り組まれた。液体ナトリウム冷却高速中性子プルトニウム増殖炉は、ウラン利用効率がずっと高くなるはずだった。なぜなら、最終的な燃料は、天然に存在するウランのなかで連鎖反応を起こす唯一の同位体であるウラン235（天然ウランの0.7%）ではなく、ウラン238（99.3%）だからである。増殖炉は、原子炉で生み出されたプルトニウム（連鎖反応維持能力を持つ）

を燃料にして運転されるが、その間、ウラン238の核変換によって、消費した以上のプルトニウムを生み出す¹²。

1975年には、2000年までに200 GWe（電気出力2億キロワット）の増殖炉発電容量の建設を進めなければならないと予測されていた。そのほとんどが1990年代に建設されるということだった。平均して、毎年、1000MWe（＝1 Gwe＝電気出力100万キロワット）の増殖炉を20基建設することになる¹³。電気出力100万キロワットの増殖炉の運転を始めるには約9トンのプルトニウムが必要となる。これで、最初の炉心と、その炉心の半分の初回取り替え用が賄える。その後は、炉心と、それを取り囲むウランの「ブランケット」の再処理によって追加的プルトニウムが提供できるようになる¹⁴。通常の軽水炉の使用済み燃料は約1%のプルトニウムを含んでいる。新しく建設される増殖炉の発電容量に合わせて運転開始用のプルトニウムを提供するには、毎年、約1万8000トンの軽水炉の使用済み燃料を再処理することが必要になる。これは、電気出力100万キロワットの軽水炉900基——現在の世界の原子力発電容量の2倍——から出てくる使用済み燃料の量に相当する。

しかし、増殖炉は商業化されなかった。経済性が低いからである。液体ナトリウム冷却炉の資本コストは、常に、軽水冷却炉の資本コストより高いものになっており、しかもその差は相当大きい。原子炉の全体的コストにとって最も重要なのは資本コストである。ナトリウムは空気や水と接触すると燃えるから、ナトリウム冷却炉は事故を起こしやすく、維持が難しい。このため、炉の稼働率が下がり、このことが発電電力（キロワット時）当たりのコストをさらに上げることになる。使用済み燃料の再処理とプルトニウムを含む燃料の製造もやはり非常に高くつく。これらの追加的コストを相殺するには、ウラン価格が大幅に上がらなければならない。

過去50年間、天然ウランの価格は、恒常ドルで見ると、需給の短期的不均衡によって上下しているが、上昇傾向にはない（図2）。また、100ドル/kgでは、ウランのコストは、電気料金にして0.2セント/kWhにしかない。新しい軽水炉の電力コストの2%ほどである¹⁵。

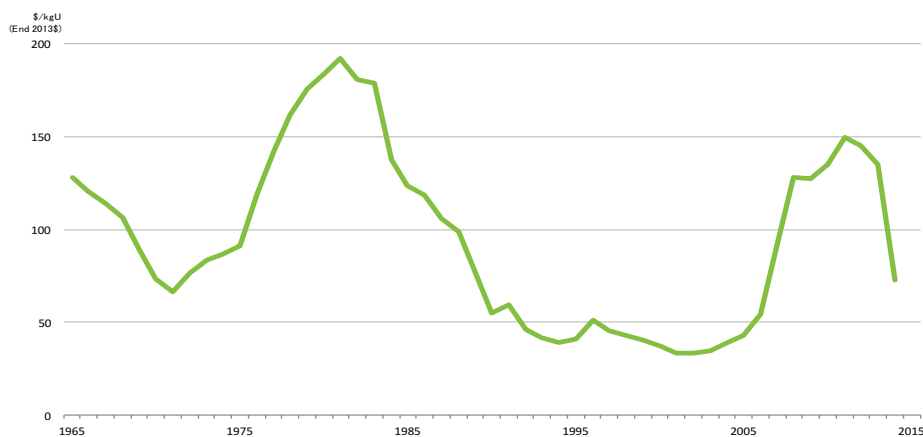


図 2 米国の原子力発電会社が 1965～2013 年に支払った平均ウラン価格（恒常ドル）

2014 年として示されている価格はスポット・マーケットの価格。出典：For 1965 and 1968 – 1971, *Statistical Abstract of the United States 1975*, Table 905; for 1975 and 1980, *Statistical Abstract of the United States 1991*, Table 981; for 1981 – 1993 from the U.S. Energy Information Agency's (US EIA's) *Annual Energy Review* (2012), Table 9.3; 1994 – 2012 from US EIA *Uranium Marketing Annual Report* (2012); and, for 2014 spot price, *Nuclear Intelligence Weekly*, 4 July 2014. GDP inflators from U.S. Bureau of Economic Analysis.

IAEA と OECD の「原子力機関（NEA）」とが共同で出している『ウラン2014』によると、

「発電用原子炉における現在のウランの消費率を使うと、既知資源ベースで原子炉用供給150年分以上を賄うに十分である。さらに、在来型ウラン資源全体を活用すれば、300年分を優に超えることになるだろう。」¹⁶

この「資源ベース」は、価格が上がれば急速に増えると予測される¹⁷。

1980年代から90年代にかけて、米国、ドイツ、英国、フランスの各国はすべて、増殖炉を商業化する取り組みを放棄した¹⁸。ロシアとインドは継続した。ロシアは、2014年に新しい電気出力80万キロワットの原型増殖炉の臨界を達成した¹⁹。インドは、電気出力50万キロワットの原型炉の臨界を2015年に達成したいと考えている²⁰。

中国は、小型の電気出力2万キロワットの実験高速中性子炉（CEFR）を持っている。この炉は、2011年に短期間だけ送電線に接続され、全出力にして1時間分の電力を発電しただけで、その後は、運転されていなかった。3年後に3日間だけ運転された²¹。中国の増殖炉計画の将来は、現在、極めて不確かな状況にある。

軽水炉用 MOX 燃料としての使用：プルトニウムを MOX 燃料として軽水炉で使用するによって節約される低濃縮ウラン燃料の割合はごくわずか——約8分の1——だが、MOX 燃料は低濃縮ウランと比べずっと高くつくことが判明している。だが、フランスと日本の再処理に関する章で詳細を述べるように、両国では、再処理計画をキャンセルすることが政治的に難しいと感じられている。

使用済み燃料の管理：再処理推進派は、再処理をすれば、地下深部の処分場に入れなければならない放射性廃棄物の量と寿命が劇的に低減すると主張する。この主張の最も単純化したバージョンは、使用済み軽水炉燃料の質量の約95%を占める酸化ウランを分離すればこれを地下深部に処分する必要がなくなるというものである。

この主張は、少なくとも3つの理由から、誤解を招くものだということができる。

1. 再処理で出てくる放射性廃棄物の質量は、処分のためにガラス内に閉じ込めると数倍に増える。さらに、再処理と MOX 燃料製造の過程で、深地下処分を必要とする新しい放射性廃棄物の「流れ」が生まれる。これらの事実を考慮すると、再処理と軽水炉用 MOX 燃料でのプルトニウムの使用は深地下処分を必要とする放射性廃棄物の量を大幅に減らしはしない²²。
2. 処分場の体積あるいは面積を決めるのは放射性廃棄物の量ではない。スウェーデンの処分場設計——フィンランドやその他の処分場を真剣に計画しているほとんどの国々で採用された方式——においては、使用済み燃料あるいは再処理廃棄物の固化体を入れたキャニスター（容器）は、ベントナイト粘土で囲まれている。水の流れを止める能力を維持するには、ベントナイト粘土は水の沸点以下の温度に保たなければ

ばならない。このことが、キャニスターに入れることのできる発熱廃棄物の量を制限し、キャニスター間にスペースを設けることを必要とする。互いのベントナイト・オーバーパック（緩衝材）の温度を上げすぎないようにするためである。フィンランドの処分場のために行われた計算によると、使用済み燃料1トン当たり100平方メートルの面積が必要との結果が出ている。体積だけを考えた場合よりもずっと大きな面積である²³。放射性廃棄物の生み出す崩壊熱の総量が処分場の面積を決めるのである。再処理廃棄物の熱と、プルトニウムのリサイクルの結果生じる使用済み MOX 燃料の熱とを合わせると、再処理がない場合に直接処分される元の使用済み低濃縮ウラン燃料の熱と同じ程度である²⁴。

3. 使用済み燃料が再処理のために切断されると、中にある放射性ガスの一部が大気中に放出される。クリプトン85（半減期11年）と炭素14（半減期5700年）が主なものである。「原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）」は、1997年までに再処理により大気中に放出された炭素14は、向こう1万年の間に5万8000人シーベルトの追加的被曝を世界の人口にもたらすと推定した²⁵。これは、同じ期間に予測される自然及び医療放射線による被曝線量と比べるとわずかな増加でしかないが、その尺度でいうと、再処理によって低減できると主張されている処分場からの漏洩による線量も同じく取るに足らないものとなる。

再処理推進派が利点として主張する放射性廃棄物の寿命（つまりは毒性）の劇的な低減に関して言うと、これは、プルトニウムを MOX 燃料に入れて軽水炉内を1回通しただけでは達成できない。だが、軽水炉の MOX 燃料としてプルトニウムの使用を繰り返すのは、次第に難しくなる。MOX 燃料の中で増えていく長寿命のプルトニウム同位体の一部と、プルトニウムから生じるもっと重い超ウラン元素は、軽水炉の遅い中性子では効率的に分裂させることができないからである。

このことは、高コストの高速中性子炉を正当化する新たな議論となるが²⁶スウェーデンの使用済み燃料処分場からの漏れについてのシミュレーションの結果、プルトニウムやその他の長寿命超ウラン元素は地下に埋めた使用済み燃料の長期的毒性の支配的な部分ではないことが判明している。これは、超ウラン元素は深い所の地下水の中では比較的溶けにくく、地表まで移動しないためである。その結果、地表の住民の被曝線量において中心的な役割を果たさないのである²⁷。

フランスの「原子力安全局（ASN）」は、2013年、フランスの処分場に関して同じような結論に達している。

「マイナー・アクチニド〔プルトニウム以外の超ウラン元素〕の核変換（トランスミューテーション）は、深地層処分の放射能面での影響を大きく変えることはない。なぜなら、影響は主として核分裂生成物及び放射化生成物によるものだからである・・・従って、ASN はアクチニド〔プルトニウムその他の超ウラン元素〕の核変換によって得られると予測される安全性、放射線防護及び廃棄物管理面での利点はわずかだと考える。」²⁸

日本の経済産業省の放射性廃棄物管理問題に関する中心的アドバイザーも同じ結論を述べている。

「資源活用〔つまりは使用済み燃料内のウラン及びプルトニウムからエネルギーをさらに取り出すこと〕が目的でないなら再処理せず〔使用済み燃料を〕直接処分した方がいい」²⁹

プルトニウム処分の基本

分離済みプルトニウムは、軍事用のものであれ、民生用のものであれ、核兵器に使うことができる。このためにこそ、使用済み燃料の再処理が論争を呼んでいるのである——とりわけ、1974年にインドが「平和目的」の再処理計画を核兵器計画の基礎として使うことができることを示して以来、そうである³⁰。近年は、国家による核拡散の懸念の他に、非国家グループによる核テロの可能性に関する懸念が加わっている。非国家グループにとってプルトニウムを使って核爆弾を作るのは簡単ではないが不可能でもない³¹。また、都市地域で飛散させれば、数キログラムの酸化プルトニウム（民生用分離済みプルトニウムが貯蔵される化学形態）で集団パニックを起こし、被曝した集団の生涯を通してみると数百人の死をもたらすことができる³²。

分離済みプルトニウムはセキュリティー（保安措置）の確かな形で貯蔵する必要があるのはこのためである。プルトニウム処分オプションに関する1994年の米国「科学アカデミー（NAS）」の報告書は、「貯蔵核兵器基準」を提唱している。分離済みプルトニウムの貯蔵・処理過程における保安体制は、核兵器用のものと同じ程度に堅固なものでなければならないという考え方である³³。

この報告書を出した NAS の研究グループは、また、処分された後のプルトニウムは、使用済みプルトニウムの中のプルトニウムと同じ程度にアクセスの難しい状態にすること、つまり「使用済み燃料基準」を勧告した³⁴。使用済み燃料の中のプルトニウムは、濃度が低い（重量にして1%程度）うえ、核分裂生成物と混ざっている。この核分裂生成物のために、使用済み燃料から1メートルの距離で1シーベルト/時以上のガンマ線レベルが約100年にわたって維持される³⁵。使用済み MOX 燃料としての処分はこの使用済み燃料基準を満たす。しかし、元々プルトニウムを取り出した際の再処理の結果生じた廃棄物と余剰プルトニウムを混ぜても基準を満たせる。また、プルトニウムを〔何らかの母材の中に〕固定化（immobilize）した後、数キロメートルの深さのボアホール（超深孔）に入れても基準を満たせるかもしれない。

米口のプルトニウム処分プログラムには、両国のプログラムが互いに関連づけられているために、さらに2つの条件が付いている。

1. 計画がもう一方の国にとって受け入れられるものであること。2000年、ロシアは、米国のプログラムについて、プルトニウムのほとんどを照射によって兵器級から非兵器級の同位体組成に変えるもの以外は受け入れないと表明した——非兵器級プルトニウムでも核兵器に使うことができるにもかかわらず³⁶。この件に関するロシアの姿勢のために、米国は協定の対象になっている34トンのプルトニウムの内、少なくとも25トンについては処分方法として MOX を採用せざるを得なくなった。
2. 両国はまた、他方の国のプルトニウム処分を検証する権利を持つという点で合意した。両国の間の核兵器制限・削減のための合意は、伝統的に検証されてきたためである。両国はまた、両国のプルトニウム削減協定は、非核兵器国の核物質を監視している IAEA によって検証が実施されれば、核軍縮に向けたステップとして、より真剣に受け取られるだろうという点でも合意した。このため、両国のプルトニウム処分協定は次のような約束をしている。

「各当事者は、他方当事者との協力の下に、早期に国際原子力機関（IAEA）と協議を始め、同機関が各当事者の処分プログラムに関して検証措置を実

施できるよう適切な協定を同機関と締結するのに必要な他のすべてのステップを講じるものとする。」³⁷

2014年末時点で、米ロ両国は、それぞれのプルトニウム処分をいかにして検証するかについて、照射済みプルトニウムを含有する使用済み燃料をどれだけの期間、保障措置下に置くかと言う点も含め、IAEA と合意に達していない。

プルトニウムの分離と再利用を無期限にわたって続けるというロシアの計画は、「プルトニウム管理・処分協定」を交渉した目的の1つ——非国家グループによる分離済みプルトニウムの盗取のリスクを減らすというもの——を台無しにする³⁸。

フランスと日本

増殖炉計画の実質的無期限延長にも関わらず、フランスと日本の政府は、使用済み燃料の再処理のコミットメントを維持し続け、その結果生じた分離済みプルトニウムを軽水炉の MOX 燃料として処分することを決めた。

フランスでは、使用済み低濃縮ウラン燃料の再処理と回収されたプルトニウムの MOX 燃料としての使用は、比較的上手く行っている——経済的にはないにしても技術的には。分離済みプルトニウムの MOX としての処分は、フランスの欧州再処理顧客国であるベルギー、ドイツ、スイスに関しても比較的上手く行っている。これらの国々は再処理契約の更新をしなかったが、2013年末の時点で、アレバ社が自国のために分離したすべてのプルトニウムを処分することにほぼ成功している³⁹。

日本では、プルトニウムの使用はこれまでのところ、大体、失敗に終わっている。2.2兆円⁴⁰の費用を掛けた国内施設、六ヶ所再処理工場の建設は20年近く遅れている。現在の竣工予定は2016年3月である⁴¹。しかし、日本はすでに約50トンの分離済みプルトニウムを保有している。一部は、国内で分離されたものである。1977年から2006年まで運転されたパイロット規模の東海再処理工場⁴²で分離されたもの、それに、2006–08年の六ヶ所再処理工場における「ホット試験」で分離されたものである。しかし、ほとんどは、ヨーロッパで分離されている。英国のセラフィールド施設群における2683トンの使用済み軽水炉燃料と1510トンのガス冷却炉燃料の再処理、そして、フランスのラアグにある UP3再処理施設群における2945トンの軽水炉燃料の再処理の結果である⁴³。

英仏両国にあるプルトニウムは、MOX 燃料の形で1999年から日本に返還されることになっていた。しかし、英国の MOX 実証工場は品質管理計測データ捏造のスクランダル⁴⁴のあと閉鎖され、セラフィールド MOX 工場は、平均して設計生産量の1%しか生産できないまま2011年に放棄された。1999年から2014年の間にフランスは、日本に4.4トンのプルトニウムを含む MOX 燃料を送ったが、日本は1.9トンしか照射できていない。これは、地域レベルにおける安全性に関する住民の不安のためにもたらされた遅延のため、そして、2011年以後は、福島事故のためにすべての原発の運転停止のためである。

以下、仏日両国の MOX 計画の不確かな将来について検討する。

フランス

フランスは、MOX 燃料計画を比較的順調に進めていて、軽水炉の使用済み燃料から毎年約10トンのプルトニウムを分離し、そのほとんどを、一群の軽水炉で MOX 燃料として使っている。しかし、供給が使用を上回ってきた。フランスが公表を始めた1996年以来、未照射の民生用プルトニウムの量は平均して年間1.5トンの割合で増加しており、2013年末の段階でその蓄積量は60トンに達している（図3）。この増加には色々理由があるが、1つには、使用不能の MOX 燃料が溜まってきているという問題がある（この状況についての具体的な情報は、「直接処分オプション」の章を参照）。

フランスの MOX 燃料計画のコストは、それにより節約できた低濃縮ウラン燃料の価値を大きく上回る。フランスの国営電力会社「仏電力公社 (EDF)」は、アレバ社に対し、コストを下げるよう働きかけ続けている。最近、フランス国民議会の調査委員会が、仏

会計検査院による MOX 燃料計画のコスト・ベニフィット分析を実施するよう勧告している⁴⁴。

フランスの MOX 計画の将来の不確かさのもう一つの要因は、MOX 燃料使用の許可を得ている24基の電気出力90万キロワットの原子炉がもうすぐ退役となるかもしれないということから来ている。2028年までに、フランスの電気出力90万キロワットの原子炉34基すべてが運転年数40年間を超えることになる⁴⁵。

EDF は、これらの原子炉の寿命を50年、あるいは、60年にさえ延長したいと考えている。仏「原子力安全機関 (ASN)」の長官は、10年あるいは20年の追加運転期間の許可は決まったことではないと警告している⁴⁶。また、フランスの下院は、福島事故の後、原子力に対するフランスの依存度を2025年までに現在の75%から50%に削減することを評決（第一読会）している⁴⁷。古いものから順に閉鎖していくとすると、これは、電気出力90万キロワットの原子炉のほとんどの閉鎖を意味する。

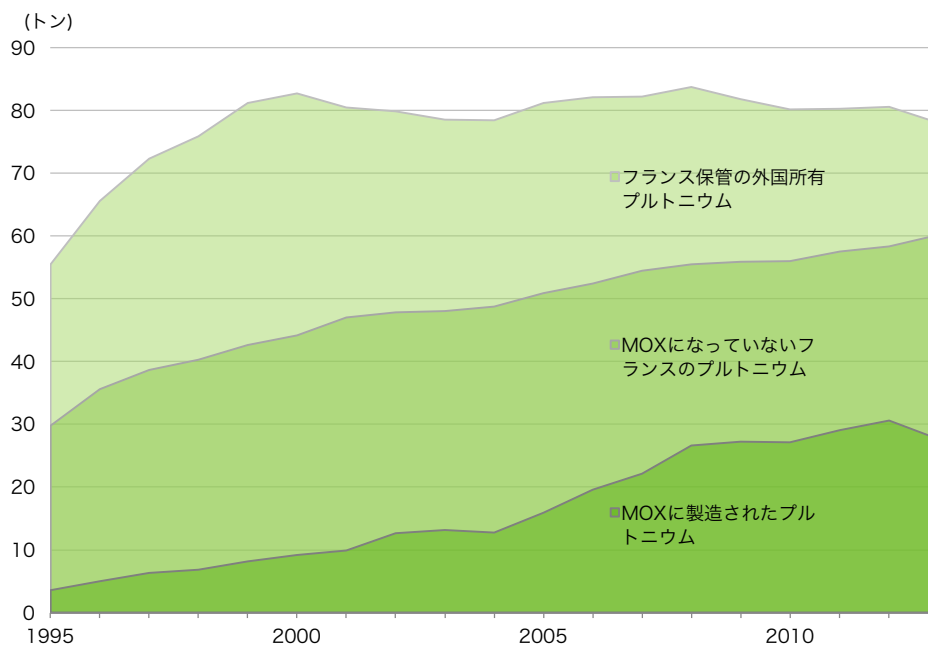


図 3 フランスの民生用未照射プルトニウムの増加

使用不能の製造済み MOX 燃料の増加による。MOX 燃料に製造されていないフランスのプルトニウムの量は約 30 トンのレベルに留まったままになっている。フランスのプルトニウム量の増大は、外国の顧客がフランスで所有するプルトニウム量の減少によって相殺されてきた。残っている外国保有分のほとんどすべてが日本のものである。出典: IAEA, *Communication Received from France Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium*, INFCIRC / 549 / Add5 / 18, 2014 and previous annual reports.

フランスのもっと新しい出力130万キロワットの原子炉は、MOX 使用ができるように変えることはできるが、これは、長期にわたる再許可プロセスと、場合によっては高くつく炉の変更を伴うことになる。EDF は、コスト面から言って、プルトニウム分離と使用の段階的中止の方を望むだろう。EDF は、2013年に、ASN に対し、フランスの出力90万キロワットの原子炉を寿命40年で停止するとするなら、再処理は2019年に中止しなければならないとするシナリオを提示している。MOX 使用を許可された最後の出力90万キロワットの原子炉が閉鎖される前にフランスのすべての分離済みプルトニウムを

MOX 燃料として使い切ってしまうことを確実にするためである⁴⁸。EDF が一基を除き運転中の原子炉のすべてを保有している英国⁴⁹では電力会社が「英国核廃止措置機関 (NDA)」との再処理契約の更新を拒否した。外国の注文がないという現状から言って、このことは、現在の再処理契約が履行された段階（2020年頃）で英国の再処理計画に終焉をもたらすことになる。

日本

日本の MOX 燃料技術開発の歴史は50年前に遡る⁵⁰。2014年3月31日までに、日本は、7 トンのプルトニウムを含有する MOX 燃料を一連の研究開発施設で製造してきた。主として、運転停止となっている2基の実験的高速増殖炉と、廃炉となっている重水実験炉ふげんのためのものである⁵¹。このプルトニウムの内1.6トンが未照射の MOX 燃料の中に残っている⁵²。将来に関して言うと、日本の商業化計画は実質的に無期限に延期されているために、日本はフランスの例に倣い、分離済みプルトニウムを軽水炉用の MOX 燃料の形で使う計画である。

これまでのところ、軽水炉用 MOX 燃料を得る上で日本の唯一の大規模な供給源となっているのは、フランスのメロックス工場であるが、日本は六ヶ所再処理工場に隣接して MOX 燃料製造工場を建設中である。再処理工場と同じく、この MOX 工場も何度もの計画の遅延に見舞われており、2014年末の時点では、2017年10月完成予定となっている⁵³。

フランスで製造した MOX 燃料の日本における使用は、県レベル及び国民一般の間での安全性に関する懸念や抵抗に直面してきた。MOX 使用に対する反対が最初の段階で強まったのは、1999年にヨーロッパから日本への第1回の MOX 燃料輸送の英国部分に関し品質管理文書の捏造があったことが判明したためだった。この結果、この MOX 燃料は2002年に英国に返還されることとなった⁵⁴。問題の燃料はセラフィールド MOX 実証施設で作られたものだった。同施設は2001年に閉鎖されている。同年、商業規模のセラフィールド MOX 工場が完成した。その設計製造能力は年間120トンだが、設計の欠陥のため、工場はその後10年の間にヨーロッパの原子炉用にわずか14トンの MOX 燃料を製造しただけだった。この工場も、2011年に放棄されることとなった⁵⁵。予測できる将来、MOX 燃料が英国で作られることは期待できない。

フランスは、日本に4.4トンのプルトニウムを含む MOX 燃料を輸送してきたが、立地県知事による MOX 燃料を装荷の許可は得られないことが多かった。その結果、日本の MOX 利用計画は10年以上遅れている。

1997年、日本の電力会社は2010年までに MOX 燃料を16-18基の原子炉で使用すると約束した⁵⁶。電気事業連合会が発表した炉ごとの計画によると、これは、毎年、約9トンのプルトニウムを含有する MOX 燃料を原子炉に装荷することを意味した⁵⁷。2011年3月の福島事故までに、電力会社は、フランスで分離された MOX 燃料に入れられたプルトニウムわずか1.9トンを4基の原子炉に装荷することに成功しただけという状態だった⁵⁸。日本が保有する未照射プルトニウムの量は約50トンに達しており、六ヶ所再処理工場が運転開始となるとさらに増える（図4）。

2015年2月末現在、日本の発電用原子炉はすべて運転停止のままで、新設の原子力規制委員会、そして、その次には立地県・自治体の再稼働許可を待っている。2014年4月にロイターが行った専門家のアンケートの結論は、事故後の日本に残っている48基のうち、

「再稼働が展望できるのは全体の3分の1に届かない14基で、3割強の17基は不確実性を払しょくできず、残り17基は再稼働が困難とみられる」と言うものだった⁵⁹。それにもかかわらず、2015年2月半ば現在、電気事業連合会のホームページ（英文）は、「日本の電力会社は、遅くとも2015年度までに16～18基の原子炉で MOX 燃料を使用することを目指している」と謳い続けている⁶⁰。日本の2015年度は2015年4月1日から2016年3月31日までである。[日本語のページは次のようにある。現在の計画は、2015年までに16～18基の原子炉でのプルサーマル導入を目指しています（2009年公表）。]

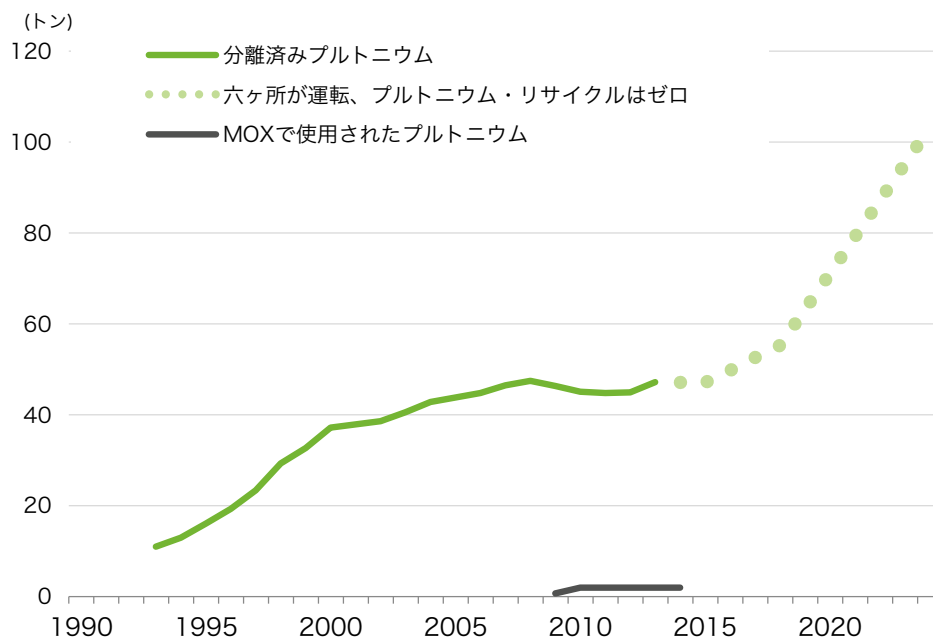


図 4 日本の未照射プルトニウム量の増加

点線：六ヶ所再処理工場が2016年春に運転を開始したとした場合の増大予測。最初の3年間は設計能力の3分の1で運転、その後は設計能力（年間8トン）で運転し、日本のMOX使用計画が遅れ続けると想定。下の線：日本におけるプルトニウムの軽水炉用MOXとしての累積使用量。出典：Past growth of Japan's stockpile of separated plutonium from its annual declarations to the IAEA under the Plutonium Management Guidelines. Quantities of plutonium loaded in MOX into Japan's LWRs from Japan Atomic Energy Commission, "The Current Situation of Plutonium Management in Japan" (in Japanese) 16 September 2014

2013年末現在、日本は、六ヶ所再処理工場で分離済みプルトニウム3.6トンを保有しており、このプルトニウムは、六ヶ所のMOX燃料工場が完成するのを待っている。にもかかわらず、日本原燃——これら2つの工場を建設していて、将来これらを運転することになる——の計画は、六ヶ所再処理工場の安全性に関する許可が得られ次第、その運転を開始するというものである。2014年末の時点では、これは、2016年3月になるとされている⁶¹。また、フランスと英国にそれぞれ16.3トンと20トンの日本のプルトニウムがあり、契約に従ってMOX燃料として日本返還されるのを待っている⁶²。

2011年にセラフィールドMOX工場の廃棄を決めて以来、英国はMOX製造契約を履行する能力を持っていない。日本のプルトニウムについては、その所有を引き受け、英国の所有分と一緒に処分してもよりと申し出ている。ただし、このような取り決めに商業的に魅力的なものとするのに必要なだけの支払いをする用意が日本にあればという条件

付きである。2014年末の時点では、日本はこの申し出を受諾していない。自国のプルトニウムを他国が受け取るに当たって日本が支払いをするという考え方は、日本の分離済みプルトニウムが資源だという日本政府の立場と矛盾する。

日本は、現在以上に分離済みプルトニウムを増やしても短期的にはこれを使用できないという状況にあるため、再処理工場の運転を開始する理由として挙げられているのは、ほぼ満杯になっている容量3000トンの六ヶ所再処理工場の受け入れプールに空きを作って、全国の原子力発電所からさらに使用済み燃料を送り込めるようにするというものである⁶³。六ヶ所再処理工場の立地する青森県は、また、六ヶ所再処理工場の運転開始まで同県のむつ市で建設の終わっている容量3000トンのむつ使用済み燃料乾式貯蔵施設の使用を許可しないと述べている。六ヶ所再処理工場の完成予定が2014年10月から2016年3月に延期されたのを受けて、むつの貯蔵施設の竣工も2015年3月から2016年10月に延期された⁶⁴。

英国

英国は、民生用分離済みプルトニウムの長期的管理戦略を検討しているところである。その量は、同国での再処理が終わる頃には約140トンに達する見込みである。これには、20トン以上の外国所有のものが含まれる。ほとんどが日本のものである（図5）⁶⁵。英国は、「受け入れられる商業的取り決めの締結ができれば」この「所有」を英国に移しても良いと申し出ている⁶⁶。

英国は、その増殖炉計画が1994年に崩壊して以来、自国の分離済みプルトニウムについて計画がなかった。外国のプルトニウムの管理計画は MOX 燃料にして元の国に返還するというものだったが、この計画は2011年に実施不能となった。外国のプルトニウムを扱う目的で建てられたセラフィールド MOX 工場が、10年の間に設計生産量のわずか1%の生産を行っただけで放棄されたのである⁶⁷。いずれにしても、この工場は、英国自身の分離済みプルトニウムの処分には使いようがなかった。なぜなら、英国には軽水炉が1基しかなく、これを保有する「仏電力公社（EDF）」は MOX 燃料の使用には関心がないと明確にしていたからである。従って、現在の英国の分離済みプルトニウムの実質の方針は、セラフィールド再処理サイトにおけるセキュリティの確かな態勢での貯蔵というものである（図6）。

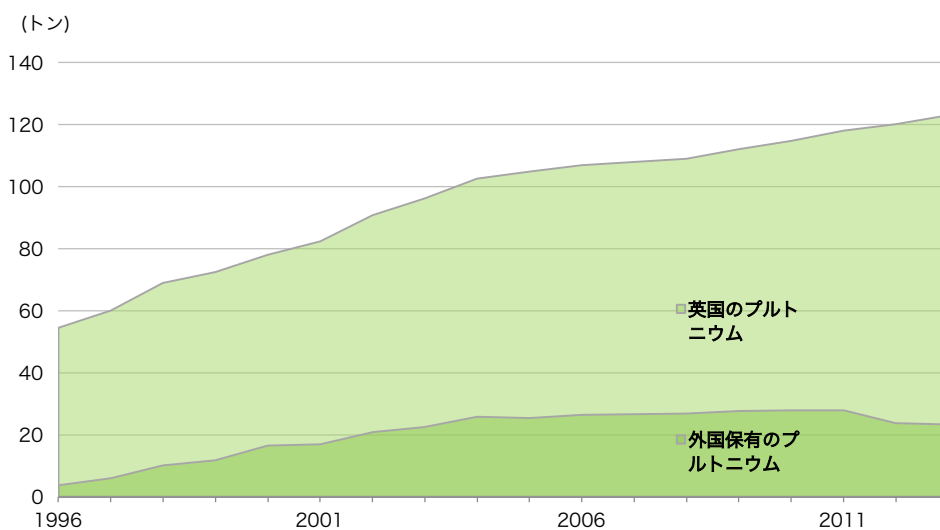


図 5 英国の分離済み民生用プルトニウムの増加

英国がこれらの数字を IAEA による発表のために報告し始めて以来のもの。出典：IAEA, *Communication Received from the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium*, INFCIRC / 549 /Add8 / 17, 15 August 2014 and previous annual reports.

将来の使用のための貯蔵

増殖炉開発計画の終焉以来のプルトニウム処分オプションに関する英国の考え方の発展の歴史は長く紆余曲折に富んでいる。2005年までは「英国核燃料公社（BNFL）」がこ

の問題に責任を負っていた。1998年時点での計画は、英国の分離済みプルトニウムを、「熱〔低速中性子〕炉または高速〔中性子〕炉における将来の使用のために」貯蔵しておくというものだった⁶⁸。この受け身的な考え方に対する最初の挑戦は、同じ年に、英国王立協会の委託した研究から来た。この研究は、恐らくは、米国の余剰核兵器プルトニウム問題に関する米国科学アカデミーの1994年の研究に刺激されて行われたものだろう⁶⁹。英国王立協会の1998年の研究報告は、英国の民生用プルトニウムの対処方法について作成中の戦略が存在しないことは「憂慮すべきこと disturbing」⁷⁰だと明言し、政府に対し、MOX 及び固定化・埋設の両方を検討するよう求めた。

翌年、BNFL は「ステークホルダー対話」の中に「プルトニウム作業グループ」を設立した。「BNFL の分離済みプルトニウムの管理・削減について方針を作成・提言するため」である⁷¹。2002年に出された「作業グループ」の報告書は、MOX 燃料を英国の2基の新型ガス冷却炉 (AGR) と英国に1基だけある軽水炉 (仏所有のサイズウェル B 炉) で使うことができるのではないかと提案した。また、様々な固定化オプションについて真剣な作業を始めるよう求めた。これらのオプションの中には、2001年に完成していたセラフィールド MOX 工場において、外国の再処理顧客のために MOX 燃料を製造する商業的契約が終了した後、「低仕様 (low-spec) MOX」を作るというものもあった⁷²。「低仕様 MOX」は、たとえば缶に封入しただけの燃料ペレットで、これを実際の燃料に求められるのよりは緩やかな仕様に従って作り、深地層処分場に直接処分するというものである。同じ頃、二人の独立アナリストが主要な処分オプションに関して英国で初めての費用予測を出した。その結論は、低仕様 MOX・直接処分が一番安上がりだということだった⁷³。



図 6 英国セラフィールドの製品・残留物保管施設

2011 年運用開始。臨界事故を防ぐため、プルトニウムの入った缶が、それぞれ別のロッカーに収められている。出典：Sellafield

MOX の選好

2005年、「英国核廃止措置機関 (NDA)」が BNFL にとって代わった。NDA は、コン

サルタントのグループ（そのほとんどが元 BNFL スタッフ）に、将来のウラン及びプルトニウムの管理の「マクロ経済」に関する研究を委託するというかたちでプルトニウム処分の責任に対処し始めた。3つのオプションに関して費用が見積もられた。無期限貯蔵、廃棄物としての処分、高速増殖炉の燃料としての使用である。コンサルタントらは、他者による検討を可能にする根拠を示すことなく、最後のオプションが利益をもたらすと論じた⁷⁴。

2007年、王立協会はこの問題を再度取り上げた。新しい報告書は、現行の契約以上のいかなるプルトニウム分離にも反対するものだった。英国のプルトニウムと英国に保管されている外国のプルトニウムの両方に関して、MOX を「最善のオプション」として強く推奨したが、新しい原子炉が建設されなければ、プルトニウムの全量を MOX の形で処分することはできないということを認めていた。このため、報告書は、残りのプルトニウムは MOX ペレットの形で貯蔵することを提案した。テロリストが貯蔵施設に対して攻撃を仕掛けた場合、これだと、プルトニウム粉末が吸入可能な形で飛散する危険を減らすことができ、長期的には、ペレットは深地層処分場が利用可能になった際に直接処分することができる⁷⁵。

2008年、NDA は無期限のプルトニウム貯蔵は受け入れられないと宣言した。また、MOX 燃料が利益をもたらすことができるとする2007年のコンサルタントらの報告書を拒絶した⁷⁶。翌年、NDA は英国の分離済みプルトニウムの管理にとって利用可能な諸方法に関する「信憑性のあるオプション“credible options”」という報告書の結論を発表した。英国の原子炉で MOX を使うという可能性は入っていなかった。なぜなら、これらの原子炉の取得過程にあった「仏電力公社（EDF）」が反対していたからである⁷⁷。

もっとも費用が少なくてすむプルトニウム管理オプションとみなされたのは、無期限の保管と「売却」——実際には、プルトニウムを受け取ってくれる別の国（恐らくはフランス）に支払いをする——だった。検討された他のオプションには、セメントあるいは溶融ガラスにプルトニウムを混ぜる、「熱間等方圧加圧法（HIP）」によりセラミックあるいはガラス内に固定化する、既存のセラフィールド MOX 工場あるいは新しい施設を使って低仕様の MOX ペレットを作る、カナダ重水炉や欧州軽水炉用に MOX 燃料を作る、などがあった。しかし、公表された報告書ではコストのデータはすべて消されていた。わずかに、それぞれのオプションの相対的成本を表した要約のグラフが示されていただけだった⁷⁸。

NDA は、「信憑性のあるオプション」報告書の改訂版を2010年に出した際、将来の英国内の軽水炉で MOX を使うオプションを復活させた⁷⁹。NDA はまた、MOX オプションについて助言を得るため「カナダ原子力公社（AECL）」及びアレバ社と「低額」の契約をしていたことを明らかにした⁸⁰。アレバ社は英国のプルトニウムは除染をした後最高99.8%まで MOX として処分できると助言したと NDA は報告した⁸¹。そして、英国の軽水炉での MOX 燃料使用は「ほとんど問題点がない」と結論づけ、問題点を何も挙げなかった⁸²。

別の道の検討

英国政府の政策としての最初の反応は、「エネルギー・気候変動省（DECC）」の2011年の「協議文書」（草案）の形で出てきた。草案は、英国におけるものであれ、外国におけるものであれ、MOX 使用を支持する「暫定政策見解」を提示した。その主たる根拠としては、MOX は「実証済みの成熟した技術」であり、他のすべての処分技術は成

熟度が MOX より低いことが挙げられていた⁸³。EDF は英国における MOX 使用に関して公の形で反対を表明していたが、英国政府は他の外国の電力会社に対し、英国内に軽水炉を建設するよう働きかけていた。DECC は、40%を MOX 燃料とする2基の大型の軽水炉があれば英国の分離済みプルトニウムの全量を60年で照射することができると指摘した⁸⁴。

固定に関しては、使用済み MOX 燃料は、中に入っている核分裂生成物が出すガンマ線のために、未照射の固定化されたプルトニウムより「内在的な」セキュリティのレベルが高いと指摘した。従って地層処分施設が利用可能となるまでは固定化のための工場を建設するのは「賢明ではない」と DECC は論じた。固定化されたもののためにセキュリティの確実な新しい貯蔵施設を作らなければならないからだという。この議論は、英国政府による固定化に関する真剣な検討の可能性を排除するものである。なぜなら、プルトニウム処分に関して政府の望むタイムスケールは25年（つまり2036頃）であるのに対し、最短でも2040年代より前に英国で処分場が利用になる現実的可能性はないからである。

2011年末頃、DECC は、2011年始めの協議に対する応えを出し、MOX 優先の立場を再確認した。そして、タイムラインを示した。規制当局に要件とされる「正当化」——つまり、利点の方がコストより大きくなるとの証拠——は2014年末までに完了させることができるかもしれない、そしてその後、MOX 燃料製造工場の建設を2019年までに開始することができるというものだった⁸⁵。DECC は、2012年と13年に矢継ぎ早に文書を出して、その結論や開発関係者等へのガイダンスを提示した⁸⁶。

2013年に起きた新たな事態によって政策決定プロセスが遅れた。2014年1月、NDA はこれらの事態について報告書を作成した⁸⁷。

1. 英国における新世代軽水炉の第一陣の建設開始の遅れ（アレバ社が建設し EDF が運転することになる電気出力165万キロワットの「欧州加圧型炉（EPR）」2基）。これらの原子炉の発電する電力について英国が提示している高い価格保証について「欧州委員会（EC）」が妥当性を検討していた。2014年10月に EC がこの価格保証を承認した結果⁸⁸、当初は、他のメーカー・電力会社の連合も軽水炉の建設計画確定に向けて動くことになるのではと予測されたが、2015年初頭、オーストリア政府による発表が状況を変えた。EC が「国家補助」を承認したことについて「欧州司法裁判所（ECJ）」に訴えるというのである。ECJ がこの件を審議することになれば（そうなりそうだが）、少なくともさらに2年の計画遅延がもたらされるだろう⁸⁹。このプロジェクトが生き延びたとしても、NDA が後続軽水炉を運転する電力会社と MOX 燃料の使用について交渉できるようになるまでにはさらに何年かかかるだろう⁹⁰。
2. 英国のプルトニウムについてさらに分析を行った結果、除染をして MOX 燃料にすることが費用効果からいって適切なのは85–90%だけだとの結論に達した。従って14–21トンは固定化しなければならないかもしれない⁹¹。
3. キャンドゥ・エナジー社と GE 日立は英国のプルトニウムを照射する他のオプションを提示しており、NDA は、両社に対してこれらのアイデアを提案としてまとめるよう奨励していた⁹²。キャンドゥ・エナジー社は、出力70万キロワットの CANDU-6 重水炉2基の建設を提案し、GE 日立は、出力31.1万キロワットの PRISM ナトリウム冷却高速炉2基の建設を提案した⁹³。GE 日立は、英国のプルトニウムすべてを、軽

水炉用 MOX に適さない10-15%も含め、PRISM 用の金属ウラン・プルトニウム・ジルコニウム合金燃料にすることができると主張した⁹⁴。

キャンドゥー・エナジー社はと GE 日立は、ともに、自社の原子炉をセラフィールド再処理施設に隣接して建設することを提案した。どちらも、自社の原子炉用にプルトニウム・ウラン燃料を製造するのは、軽水炉用に MOX 燃料を製造するのより安くつくと言った主張した。とすると、英国政府が軽水炉用 MOX 燃料製造工場の建設に支払うはずだった資金の一部を自社の原子炉の建設資金に充てることが可能となる。また、アレバ社の電気出力165万キロワットの軽水炉1基の資本コスト（建設中の利子は別）が80億ポンド（キロワット当たり7760ドル）という膨大な額に達すると想定されること⁹⁵——そのために英国政府が同炉で発電される電力に高額な価格保証を提供することになった——が、多額の建設費を伴う重水炉とナトリウム冷却炉にまたとない機会を提供した。

NDA が CANDU-6の提案を信憑性のあるものとみなしたのは、世界中で11基が運転されていること⁹⁶、MOX 燃料製造過程が軽水炉用 MOX に使われているものに似ていること、そして、株式投資者がいそぐだということによるようである。これに対し PRISM は「紙に書いた原子炉」、つまり、建設されたことがなく、液体ナトリウム冷却高速中性子システムは、問題のある過去があり、英国が原型高速炉を1994年に放棄して以来英国の安全規制システムが対処していない多くの安全性問題を抱えている。

また、照射済み PRISM 燃料は、処分の点で NDA が「ユニークな問題」と認めるものを伴う⁹⁷。燃料の「肉」の部分から燃料被覆に熱を伝えるため、燃料棒にナトリウムが入っている。このことが使用済み燃料を「自然発火性」とする。つまり、水と接触すると自然発火する。従って、地下処分用としては受け入れられないことになる。米国は、PRISM の設計の元になっている「増殖実験炉（EBR）」II（電気出力2万キロワット。1963－94年）の「ナトリウム・ボンド」型使用済み燃料について、まさにそういう結論を下している。そして、2006年に、約0.6トンのプルトニウムを含む3トンの EBR II 使用済み燃料を好ましい廃棄物形態にするための計画を開始した。2006年時点でのこの計画の費用見積もりは約2億ドル、プルトニウム1トン当たり3億3000万ドルだった⁹⁸。

英国の再処理計画の結果生じてしまった「遺産プルトニウム」を処分するための高コスト・プログラムが、その処分体の更なる再処理を必要とするとしたら皮肉なことである。NDA は、英国のプルトニウム処分契約の獲得を巡ってキャンドゥー・エナジー社及び GE 日立とアレバ社を競わせることによってコストを下げるという手を考えた方が良いかもしれない⁹⁹。

一方、英国「国立核研究所（NNL）」はセラフィールド再処理施設でプルトニウム固定化プロセスを設立しつつある。汚染された酸化プルトニウムを比較的溶けにくい結晶の中に固定化してガラス母材の中に埋め込むためのものである。粉末をこの固体複合物とするために使われるプロセスは「熱間等方圧加圧法（HIP）」と呼ばれるもので、8－9時間にわたって高圧（1000気圧）と高温（摂氏1200－1300度）を粉末に同時に加える

¹⁰⁰。

このプロセスによって製造される円柱状の物質には、1体当たり10重量%、約2kg のプルトニウムが入っている¹⁰¹。最初は、0.1トンのプルトニウムだけをこの方法で固定化することになっているが、英国が MOX を採用することにし、合計140トンの分離済みプルトニウムの内14－21トンは MOX 燃料にするには不純物が多すぎるとなった場合、このプロセスが拡大されるかもしれない。だが、英国の公共政策決定が新保守主義的環境のなかにあることと、固定化オプションを提唱する商業的技術ベンダー（売り手）がな

いことが相俟って、現在、英国の分離済みプルトニウムのすべてをこのプロセスで処分することが真剣に検討されないという結果をもたらしている。

米国

1994年、冷戦時代の核兵器の大幅な削減の結果、米国は核兵器用の兵器級プルトニウム85トンの内、38.2トンを余剰と宣言した¹⁰²。米国はまた、非兵器級プルトニウム7.5トンも余剰と宣言した。これは、ニューヨーク州のウエスト・バレーで短期間だけ運転した商業用再処理工場（1966－72年）で分離されたプルトニウムと、米国が増殖炉及び商業用再処理計画を1983年に放棄する前に外国から入手したプルトニウムである¹⁰³。

余剰の兵器級プルトニウムの一部は、核兵器製造から生じた汚染廃棄物の中に希釈された形で入っている。2013年末の時点で、この状態のプルトニウム4.5トンが、ニューメキシコ州の地下深くにあるエネルギー省の処分場、「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」で処分されていた¹⁰⁴。しかし、2007年にさらに9トンの兵器級プルトニウムが余剰と宣言され、この減少分を「相殺」して余りあるものとなった。従って、米国は、合計約50トンの余剰プルトニウムを持っている。

エネルギー省は、核兵器の「ピット（芯）」の形にあるものを除き、すべての余剰プルトニウムをサバンナ・リバー・サイトの K エリア物質貯蔵施設に集中することを決めている（図7）¹⁰⁵。余剰プルトニウムの入った核兵器「ピット」の方は1万個以上がテキサス州アマリロにあるエネルギー省のパンテックス核弾頭組立・解体工場のバンカーに貯蔵されていて、このプルトニウムを取り出す施設が出来るのを待っている。



図 7 米国エネルギー省サバンナ・リバー・サイトのプルトニウム貯蔵容器（K エリア物質貯蔵施設）

米国の余剰プルトニウム約13トンを貯蔵。各容器は、およそ高さ0.9メートル、直径0.5メートル。最大4.4キログラムのプルトニウムが入っている。容器は、中に入っている小さな缶を守っているだけでなく、近くの中身同士が核分裂連鎖反応を起こさないような大きさになっている。106 出典：H. Allen Gunter, Senior Technical Advisor and Assistant Manager, Nuclear Material Stabilization Project, Savannah River Operations Office, briefing to the Citizens Advisory Board Nuclear Materials Committee, 28 April 2009.

1997年、エネルギー省は、2つのプルトニウム処分路線を並行して追求することを決めた¹⁰⁷。

1. 軽水炉用の MOX 燃料にする

2. エネルギー省のサバンナ・リバー及びハンフォードのサイトでガラス固化されつつある再処理廃棄物の中に固定化する

MOX だけでなく固定化も追求する1つの理由は、余剰と宣言されつつあるプルトニウムの一部は核弾頭のピットからのものではなく、他の物質によって汚染されており、MOX 燃料として使用できる形にするためにこれを除去するには費用がかかりすぎるためだった。さらに

「固定化と MOX 燃料製造の両方を追求することは・・・どちらか一方だけのアプローチを実施することに伴う不確実性に対する重要な保険を提供する」¹⁰⁸。

このため、エネルギー省は、2000年に MOX 燃料製造施設とプルトニウム固定化工場の両方をサバンナ・リバー・サイトに建設することを決めた。計画は、合計50トンの内、最大33トンのプルトニウムを MOX 燃料にし、不純物に汚染された少なくとも17トンのプルトニウムは固定化するというものだった¹⁰⁹。

同年、ロシアと米国は、「プルトニウム管理・処分協定」を締結し、それぞれ、34トンの余剰兵器級プルトニウムを処分することに合意した。ロシア側は協定の対象となる34トンの米国の余剰プルトニウムのたとえ一部でも固定化することに反対し、原子炉の中で照射することだけが兵器級プルトニウムの同位体組成を非兵器級に変えることができると主張した。妥協策として、34トンのプルトニウムの内、少なくとも25.6トンを MOX 方法で処分するということになった¹¹⁰。エネルギー省は、条約の対象となっていないプルトニウムは固定化方法で処分することを計画していたようである。

エネルギー省が選択した固定化アプローチ——「キャン・イン・キャンニスター」（容器内に缶）と呼ばれる——では、プルトニウムを酸化物にし、これを重量にして10%の濃度でセラミックの「アイスホッケー用」「パック」のような形状にした上で、スチール製の缶（直径6cm、高さ25cm）の中に重ねる。缶1個当たり約1キログラムのプルトニウムが入る。28個の缶を高さ3メートルの容器（キャンニスター）内に設けられた枠に設置し、容器内の隙間に高レベル廃棄物の混ざった溶融ガラスを入れる¹¹¹。こうしてできた廃棄体は、他の高レベル廃棄物のキャンニスターと共に、サバンナ・リバー・サイトで貯蔵され、放射性廃棄物処分場が利用できるようになるまで待つ。それぞれのキャンニスターには28キログラムのプルトニウムが入るから、50トンのプルトニウムを処分するにはガラス固化廃棄物のキャンニスターが約1800体必要になる。

高レベル廃棄物のガラス固化体の中にプルトニウムを埋め込む目的は、キャンニスターの周りに「自己防護」用ガンマ線バリアーを作って、「米国科学アカデミー（NAS）」の「使用済み燃料基準」を満たすことにある。この放射線のほとんどすべては半減期30年の核分裂生成物セシウム137の崩壊に関連したものである。

MOX に集中する決定

2002年、ブッシュ政権は、プルトニウム処分の単一路線を採用した方が安くつくとの考

えに達した。そして、ロシアが「プルトニウム管理・処分協定（PMDA）」の対象となっている米国の34トン MOX 燃料の形で処分するよう主張している状況に鑑み、すべてのプルトニウムをこの方式で処分することを決めた。エネルギー省は議会に対し、MOX 燃料製造工場を建設し処分期間全体にわたって運転するのに必要なネット・コストは21.5億ドル（2012年ドルで28億ドル）になると伝えた¹¹²。

ロシアとの協定の対象である34トンの余剰の核兵器用プルトニウムを処分するプログラムは、エネルギー省内の「国家核安全保障局（NNSA）」の責任である。協定対象外のプルトニウムの処分は、エネルギー省の「環境管理部（OEM）」の責任である。ブッシュ政権の決定は、協定対象外の余剰プルトニウム17トンについて明確な処分方法が定められていないという状況を生み出した。

2007年、ブッシュ政権は、残る17トンの内4トンは MOX として処分することができるだろうと発表した。2トンはサバンナリバーの放射性廃棄物がガラス固化される前に廃棄物タンクに入れて混ぜ、7トンは、サバンナ・リバー・サイトの高レベル廃棄物と共に「キャン・イン・キャニスター」方式で処分するために非放射性のガラスと混ぜたガラス固化体の形で固定化する。この費用は8億ドルと見積もられた¹¹³。アイダホ国立研究所の「ゼロ出力物理炉（ZPPR）」で使われた金属燃料版の4トンについては、「将来の計画使用」のためとして余剰扱いを撤回した（この決定は、2012年にまた覆されることになる）¹¹⁴。

この決定の部分的根拠とされたらしい研究は、13トンは「キャン・イン・キャニスター」方式によって、2011年から6年間で処分できるとの結論を下していた。ガラス固化したプルトニウムの缶はピット以外のプルトニウムが保管されているサバンナ・リバー・サイトの K エリア施設で製造するとのアイデアだった¹¹⁵。

MOX が「負担しきれなく」なる

2013年頃には、サバンナ・リバー・サイトで建設中の「MOX 燃料製造施設（MFFF）」の予定及びコストが制御不能状態にあることが明らかになっていた。このため、オバマ政権は、この年、2014会計年度の予算を提案した際、「現在のプルトニウム処分のアプローチは、コストの増大と財政的圧力のために、負担しきれないかもしれない」と発表した¹¹⁸。

主契約者であるショー・アレバ（現在は CB&I-AREVA）MOX サービスズ社のコスト見積もりは高騰を続けていた。コスト上昇の一部は、「湿式精製エリア（Aqueous Polishing Area）」を入れるために MFFF の大きさを倍以上にしなければならなくなったことから来ていた。「湿式精製」は、MOX 製品の質を下げる不純物をプルトニウムの溶解及び化学的処理によって除去した後、また酸化物に戻す過程を伴う。コスト上昇の他の要因としては、工場の MOX 製造部分を米国の安全・セキュリティー規制に合わせて再設計する必要が生じたこと、業者がエネルギー省の核品質保証基準を満たせなかったこと、給料を過小に見積もる一方核部門の資格を持つ人員の生産性を過大評価していたこと、そして、米国南西部の原発建設プロジェクトへの移動のために離職率が上がったことなどが挙げられる¹¹⁹。

2013年には、主契約社は MFFF 及びこれに付随した「廃棄物固化棟（WSB）」の建設コストを83億ドル、そして、MFFF 及び WSB の15年間の運転費を年間6.4億ドル、34トンのプルトニウムの処分費用総額180億ドルと見積もっていた¹²⁰。これは、恒常ドル

で計算して、2002年の見積もりの6倍の上昇である。2015年、エネルギー省のために「陸軍工兵隊（ACE）」が行った再計算では、この総費用見積もりはさらに40%上昇して250億ドルとなった¹²¹。このコスト見積もりには、使命が終わった後、プルトニウムに汚染されたMFFF及びWSBを解体するための廃止措置コストは含まれていなかった。また、核兵器「ピット」からプルトニウムを抽出するコスト、プルトニウムに汚染された廃棄物を処分するためのコスト、MFFF 及び WSB のセキュリティのためのコストも含まれていなかった。

エネルギー省の数々の核兵器関連プログラムが膨大なコストの超過問題を抱えており、議会は、すべての裁量支出に厳しい予算制限を課していた。このため、オバマ政権は、一部完成している MOX 工場（図8）を次のような状態に置くことを提案した。

「安全性とセキュリティを保ちながらより迅速に費用効率の高い形で問題解決を達成することのできる別のプルトニウム処分技術について〔政権が検討する間〕 コールド・スタンバイの状態に」¹²²



図 8 建設中の米国「MOX 燃料製造施設（MFFF）」（2014 年 10 月 25 日）

エネルギー省のサウスカロライナ州サバンナ・リバー・サイト。出典：High Flyer, Savannah River Site Watch

MFFF が建設中のサウスカロライナ州及びサバンナ・リバーを隔てた対岸のジョージア州（MOX 工場の建設にかかわっている1585人を含むサイト労働者の相当部分が住む）¹²³の連邦議員らは反撃に出た。そして、2014会計年度及び2015会計年度の間建設を継続するための予算として、それぞれ、3億4300万ドル、3億4500万ドルを確保することに成功した。2015年1月、新しく上院の過半数を共和党が占めるようになった状況下で、オバマ政権は議会の動きを待つのではなく、議会への予算案の中でさらに3億4600万ドルを2016会計年度の予算に盛り込んだ¹²⁴。この割合では、同じ予算案の中でオバマ政権が示したコスト見積もりからいって、工場完成までに後20年かかることになる。

議会の歳出委員会の主要メンバーの一部は、問題を理解しているようで、2015会計年度歳出予算法において、エネルギー省内のプルトニウム処分プロジェクトを管理している「国家核安全保障局（NNSA）」は次のような指示を与えられた。

「上下両院の歳出委員会に、本法の施行〔2014年12月16日〕から120日以内に、MOX 施設の建設を完了して運転するオプションと、当該物質を薄めて処分場で処分するオプションの両方のライフサイクル・コスト（独立に検証されたもの）を提出すること。」¹²⁵

上下両院の軍事委員会は、2015会計年度国防予算権限法の中にもっと詳細な報告要件を

入れた¹²⁶。

一方、エネルギー省は、何らかの形でサバンナ・リバー・サイトからプルトニウムを除去し始めるようにとの圧力を受けている。サウスカロライナ州選出の議員らが法律の中に組み込んだ合意によると、MOX 燃料製造施設が2014年までに運転開始とならない場合は、少なくとも1トンのプルトニウムを2016年までにサバンナ・リバー・サイトから運び出し、2002年4月15日以降に持ち込まれたプルトニウムすべてを2022年までに運び出さなければならないことになっていた。これらの要件を満たさない場合に関連した罰金は議会による歳出を必要とする。2016年の期限は、以前の2011年1月という期限を改正により変更したものだった¹²⁷。

2014年4月、オバマ政権の「プルトニウム処分作業グループ」は、MOX に変わる方法について暫定的評価を発表した¹²⁸。検討された代替案は以下の通りである。

1. 希釈化とエネルギー省の深地下の超ウラン「廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)」での処分。
2. 再処理廃棄物のガラス固化体の中にプルトニウムを埋め込む「キャン・イン・キャニスター」アプローチ
3. 最大5キロメートルの深さのボアホール（超深坑）での処分
4. 1基または2基の新しい液体ナトリウム冷却高速中性子炉での照射——英国でも議論されているオプションの1つ（上記参照）

また、MOX に代わる諸方法についての独立の研究がなされている¹²⁹。

「作業グループ」は、「ダウブレンディング」（希釈）と WIPP（図9）での処分が最も低額のオプションとの結論を下した。約30億ドルである¹³⁰。

廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)

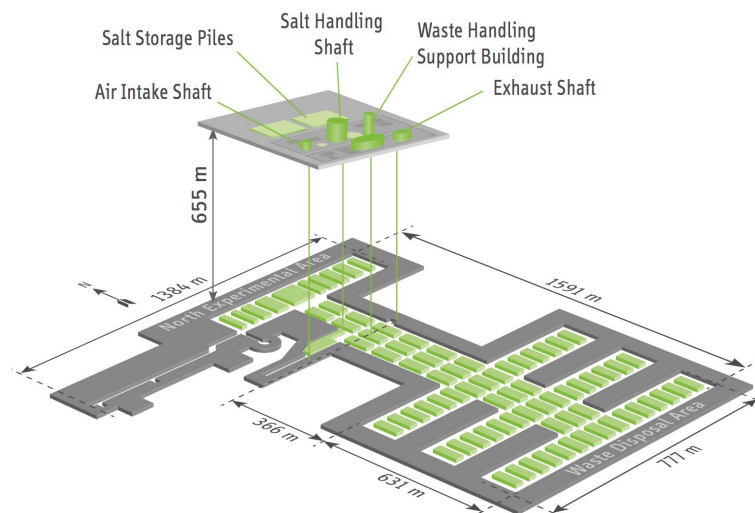


図 9 米国エネルギー省の「廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)」

ニューメキシコ州カールズバッド近郊。核兵器研究開発及び製造から生じたプルトニウム汚染物質が処分されつつある。出典：Improving Operations and Long-Term Safety of the Waste Isolation Pilot Plant (National Academy Press, 2001), Figure 1.2.

エネルギー省は、すでにこの処分アプローチを小規模な形で進めている。2011年、同省はダウブレンディングと「パイプ・オーバーパック容器」での処分を許可した。サバンナ・リバー・サイトで貯蔵されているプルトニウム酸化物粉末0.685トン进行長さ15センチのパイプに入れ、これを容量200リットルのドラム缶の中心部に設置するというものである^{131, 132}。プルトニウム酸化物は、重量で10%未満の濃度にするために機密の「保障措置終焉」物質と混ぜられる。この物質からプルトニウムを化学的に分離するのは難しいとされている。

プルトニウムの粒子は吸入されると極めて高い発がん性を持つため¹³³「DOE-3013」基準貯蔵容器からプルトニウム酸化物粉末を取り出してパイプ内で希釈材と混ぜる作業は、グローブ・ボックス内で行われる。グローブ・ボックスの中の気圧は外部より低く保たれていて、「漏れ」が生じた場合空気は内部に向かうようになっている。内部の空気は、高性能フィルターを通して排出される（図10）。



図 10 前セラフィールド MOX 燃料製造プラントのグローブ・ボックス・ライン

出典：UK Nuclear Decommissioning Authority.

この手始めの作業では、ドラム缶1本当たりのプルトニウムの量は175グラム以下に制限された¹³⁴。処分コストはプルトニウム1キログラム当たり約10万ドルと見積もられた¹³⁵。エネルギー省の「プルトニウム処分作業グループ」は、200リットルのドラム缶の中でパイプを固定する木製のディスクを追加すれば、ドラム缶・パイプは「臨界制御オーバーパック」容器とみなすことができ¹³⁶、中に入れるプルトニウムの量はドラム缶1本当たり核分裂性同位体（プルトニウム239）380グラム相当に増やすことができるとの結論に達した¹³⁷。これだと、処分コストをプルトニウム1キログラム当たり6万8000～8万8000ドルに削減することができる¹³⁸。MOX による処分の現在の推定コストの約10分の1である。

仕事を完遂するにはサバンナ・リバー・サイトのプルトニウム貯蔵施設にグローブ・ボ

ックスのライン2本を追加で設置し、サバンナ・リバー・サイトと WIPP で200人のスタッフを追加で雇用する必要があると「作業グループ」は見積もった。それぞれのグローブ・ボックス・ラインはシフト当たり1本のドラム缶の詰め込み作業を行う。ドラム缶1本当たり、平均340グラムのプルトニウムが入り、ブレンディングとパッケージングのプロセスが24時間態勢で行われるとすると、これによりグローブ・ボックス・ライン当たり年間0.4トンとなる。3本のグローブ・ボックス・ラインで年間1.2トンである。この年間処理量は、同じような処理能力がニューメキシコ州ロスアラモス国立研究所のプルトニウム処理施設に導入されれば倍にすることができる¹³⁹。

ドラム缶1本当たり340グラムだと、エネルギー省の50トンの余剰プルトニウムすべてを処分するのに約15万本のドラム缶が必要となる。理論的には、WIPP（図9）で計画されているそれぞれ7「部屋」からなる「パネル」のうちの1つに約9万本のドラム缶が収容できる。実際には、これまでにすでに閉鎖された6つのパネルのそれぞれに入れられた廃棄物の量は平均してドラム缶7万5000本分である¹⁴⁰。エネルギー省の他のサイトからのプルトニウムで汚染された廃棄物のために必要な容量から言って、「作業グループ」の2014年の報告書は、WIPP の法的な容量制限を増やさない限り、WIPP にはブレンドダウンしたプルトニウム13トンしか収容できないとの結論を下している¹⁴¹。「憂慮する科学者同盟（UCS）の上級科学者エドウィン・ライマンは他の廃棄物のためにとって置かれているスペースは完全に使用される予定にはなっておらず、利用可能なスペースで200リットルのドラム缶10万本以上を収容できると論じている。WIPP の処分部屋パネルの一部は、満杯になる以前に壁で閉じられてしまっており、許可された量の廃棄物を収容するには、元々計画されていた以上の数のパネルを建設しなければならないだろう¹⁴²。

「作業グループ」とライマンはともに、ドラム缶当たりのプルトニウムの量を増やすためのオプションを提案している。ドラム缶当たりのプルトニウムの量が1kg 以上に増えれば、米国政府の規制によってセキュリティー及び保障措置の態勢をもっとずっと厳格なものにしなければならない¹⁴³。もっと封入量が小さい場合でも、政府から独立の評価が行われた場合、セキュリティーの強化が提唱されるかもしれない。ドラム缶内のプルトニウムを入れたパイプは0.6メートル強の長さで、直径約15センチメートルである。要員の厳格な監視がなければ、相当数のパイプを取り出して、処分場から運び去ることができるかもしれない。長崎原爆に入っていた6キログラムと同量入手するには、それぞれ340グラムのプルトニウムの入ったパイプ20本も足りない。もしまだであれば、処分場のアクセス坑道にプルトニウムの自発核分裂によって放出される中性子を探知するための計測機器を設置すべきである¹⁴⁴。

エネルギー省の現在の復旧計画によると、爆発したドラム缶と似たような内容物を持つ容器の入った WIPP 内の「部屋」は壁で仕切られ、同様の内容物を持つ容器でまだ地上にあるものについては、その内容物を安定化させてから埋設することになっている。施設は2016年初頭には運転再開が期待されているが、サバンナ・リバー・サイトからの輸送は2018年までは再開されないと見られている¹⁴⁶。

WIPP の将来は、苦勞してやっと得られたニューメキシコ州の信頼をエネルギー省が回復できるかどうかにかかっている。

1978～2004年、エネルギー省は、ニューメキシコ州健康・環境省に資金を提供し、「環境評価グループ」が WIPP の安全性について政府から独立したアドバイスを提供できるようにした¹⁴⁷。エネルギー省はこのグループの再設置のために資金を提供するのが賢明といえるだろう。

「作業グループ」の報告書は、WIPP の目的を拡大して米国の余剰プルトニウムすべての処分を含むようにする許可が得られないとなれば、この目的のために新しい処分場を設立するという可能性を挙げている。WIPP は1980年代に7億ドル（2013年ドルで14.7億ドル）のコストで建設されたが、現在のコストは「今日の設計・建設・運転基準のために相当高くなるだろう。」¹⁴⁸ そうだとしても、MOX オプションと比べればずっと低コストとなるだろう。

キャン・イン・キャニスター

「キャン・イン・キャニスター」式固定化オプションに関しては、「作業グループ」は、以前のエネルギー省の分析と同じく、米国の余剰プルトニウム34トンの固定化は「サバンナ・リバー・サイト（SRS）」ではもはや可能性がなくなったと述べている。

「なぜなら、SRS の HLW [高レベル廃棄物] の半分近くはすでに処理されており、34トンの余剰プルトニウムを処分するのに十分な高レベル廃棄物はないからである。さらに DWPF [サバンナ・リバーの軍事廃棄物処理（ガラス固化）施設] は2032年までに作業を終えることになっている。これは、新しい固定化施設を設計・建設する前のこととなるだろう。」¹⁴⁹

このため「作業グループ」は、「キャン・イン・キャニスター」の道が追求される場合には固定化プラントはハンフォード・サイトに建設しなければならないだろうと論じた——同地では巨大な「廃棄物処理・固定化プラント」が、高レベル廃棄物ガラス固化ユニットも含め、建設中である。これだと、MOX オプションと同じぐらいのコストを伴うものとなるとの結論だった。なぜなら、ハンフォードには、もう、プルトニウム管理やセキュリティのインフラがないからである。サバンナ・リバーの場合には、このようなインフラが、K エリアのプルトニウム貯蔵施設やプルトニウム容器の状況評価・詰め替え等のための関連能力を含め、維持されている¹⁵⁰。

ほとんど同じ表現が2年前にも使われていた。その時のガラス固化の完了予測時期は6年早かった¹⁵¹。実際は、プルトニウムの入った高レベル廃棄物の容器の周りにガンマ線の防護を提供するセシウム137は、サバンナ・リバー・サイトではほとんどまったくガラス固化されていない。なぜなら、高レベル廃棄物タンクの塩類からセシウム137を分離するプロセスが失敗し、新しい施設「塩廃棄物処理施設」を建設する費用が出てきたが、その完成が何年も遅れ、コストが高騰しているという状態にあるからである。2014年末の時点では、施設は2018年12月から2021年1月の間の何処かで運転開始となるだろうと予測されている¹⁵²。一方、極少量のセシウム137を含むタンクの底のスラッジのガラス固化は行われている。2013会計年度末の時点で、サバンナ・リバーの高レベル廃棄物タンクでは、7300万キュリーのセシウム137が液体及び芒硝（ソールト・ケーキ）の層の中に存在している¹⁵³。

エネルギー省が「キャン・イン・キャニスター」方式のために採用している「自己防衛」基準は、キャニスター充填後30年の時点で、キャニスターからの1メートルの距離で少なくとも1シーベルト/時の線量である¹⁵⁴。これには、キャニスター当たりセシウム137が1万1000キュリー（約125グラム）必要である¹⁵⁵。缶当たり平均0.6キログラムのプルトニウム、キャニスター当たり28個の缶とすると¹⁵⁶、50トンのプルトニウムを収容するには、約3000体のキャニスターが必要なり、そこには合計3300万キュリーのセシウム137の入ったガラス固化体が入ることになる。2014年末の時点で、エネルギー省は、サバンナ・リバー・サイトで1996年以来、キャニスター約4000体に高レベル廃棄物を充

填していた。そして、後4600体の充填を行う計画だった¹⁵⁷。平均して、年間200体という計画で、これで行くと2037年までに作業が終わることになる。だが、近年は年間125体程度の充填に終わっている¹⁵⁸。

「キャン・イン・キャニスター」式固定化を2020年に、プルトニウム処理量年間2トンの割合で——2004年の設計研究で想定したように——始めることができれば¹⁵⁹、2037年までに34トンを固定化することができる。サバンナ・リバー・サイトでの高レベル廃棄物のガラス固化が終了した後は、エネルギー省は非放射性のガラスで固定化したプルトニウムの缶をハンフォード・サイトに送り、同地で製造される予定の高レベル廃棄物のガラス固化体を入れるキャニスター内に入れることができるだろう。輸送されてきた缶を受け入れ、キャニスターに入れるためのセキュリティの確かな建物が必要となるが、プルトニウムに関連した他のインフラはいらない。

2015会計年度の国防歳出権限法において、ワシントン州選出の連邦議会議員は、エネルギー省がハンフォード・サイトでの除染の約束をすべて遵守しない限り、同州へのプルトニウムの搬入を考慮することすら禁じる条項を入れた¹⁶⁰。ワシントン州は現在、エネルギー省に対して訴訟を起こしている。合意された約束とタイムラインを同省が遵守していないためである。

ディープ・ボアホール（超深孔）

2014年9月、エネルギー省のディープ・ボアホール処分評価プロジェクトは、ディープ・ボアホール処分に適した場所に関する暫定的評価について報告し、エネルギー省の110のサイトの中で「サバンナ・リバー・サイト（SRS）」が適性スコアで3番目に位置するとした。基準となったのは、面積、都市地域からの距離、地表から2キロメートル以内の深さにおける結晶質基盤岩の存在、平坦性、地熱流束の低さ、火山活動の低さなどである。

欠点の中には基盤岩の複雑性と地震の危険性があった。興味深いことに、このスクリーニングで最も高得点を得たのはパンテックスだった。このアマリロ近郊の核弾頭組立・分解及びプルトニウム・ピット貯蔵施設の場合、基盤岩が浅いところにあった。しかし、パンテックス・サイトは、付近の石油掘削の密度の高さのために SRS と比べて不利な条件にあった¹⁶³。

ボアホール評価プロジェクトの報告書は、ボアホール処分に適した小さなパッケージにすでに入っている、あるいは入れられる予定のエネルギー省の放射性廃棄物についての暫定的議論も含んでいた。提案されたアプローチでは、ステンレス・スチールのキャニスター内に入れた浸水を遅らせる粘土その他の物質を入れ、その中に廃棄物パッケージを埋め込むというものだった。キャニスターの肉厚はボアホールの深さでの高い静水圧に耐えられるものとする¹⁶⁴。

液体ナトリウム冷却炉

電気出力31.1万キロワットの高速中性子炉2基及び関連の燃料製造施設を建設・運転するのは、MOX 燃料製造施設を完成させ運転するのよりも高くつくとされた。さらに、GE 日立による英国政府に対する同様の提案に関連してすでに見たとおり、「ナトリウム・ボンド」型の使用済み燃料の処理にはさらに何十億ドルもがかかり得る。

米国の経験からの教訓

米国の惨憺たる経験は、相当部分は自ら招いたものである。エネルギー省内の「国家核安全保障局（NNSA）」は、第二次世界大戦時の驚異的な米国マンハッタン・プロジェクトの継承組織なのだが、大きなプロジェクトの運営に問題を抱えており、このようなプロジェクトではコストが当初見積もりの何倍にもなりスケジュールは遅れ続けるというのがパターンとなっている¹⁶⁶。英国の「核廃止措置機関（NDA）」もプロジェクトの管理運営に関し同じような問題を抱えている¹⁶⁷。

「作業グループ」は、あり得る限り最も単純な直接処分戦略に焦点を合わせた。プルトニウムを「希釈化（ダウンプレンディング）」し、これをドラム缶内に収め、既存の運転中の廃棄物・プルトニウム処分場で処分するというものである。残念ながら、この処分場での事故のため、この道は少なくとも数年間は閉ざされてしまった。

「希釈化」したプルトニウムの他の終着地は他に見いだすことができるだろうか。米国の石油・ガス・地熱産業が開発した掘削技術を発展させたディープ・ボアホール（超深孔）が1つの可能性であるように見える。

他のオプション——たとえば「キャン・イン・キャニスター」式処分や使用済み燃料・高レベル廃棄物ガラス固化体とともに地層処分するためのパッケージングなど——は、粉末混合物ではなく固形混合物を必要とするだろう。固形混合物は、ガラス固化、加圧成形と焼結、あるいは、「熱間等方圧加圧法（HIP）」によって製造することができるだろう。これらのプロセスは、単なる「希釈化（ダウンプレンディング）」よりは厳しいものが要求されるが、その厳しさは MOX 燃料の製造のそれには遠く及ばない。

上述の歴史のもう一つの教訓は、「全部の卵を一つの籠に入れるな」ということのようなものである。まさにこれが1つの理由となって、米国のプルトニウム処分プログラムは、もともと、2つの路線を並行して追求することになっていたのである。MOX、そして、高レベル廃棄物との直接処分である。前進するに当たって、少なくとも2つのオプションを維持しておくべきである——維持に伴うコストが、この問題の何十億ドルという規模と対比して重大なレベルに達するものでない限り、そして、重大なレベルに達するまでは。実際、いくつかオプションにおける対処可能なプルトニウムの量の限度や開発要件などを考えると、最適な戦略は2つあるいはそれ以上の処分方式をそれぞれが利用可能になるに従い、組み合わせることであるかもしれない。

もしそうであるとする、エネルギー省は、最終処分の諸オプションについて明確にする取り組みを進める一方、サバンナ・リバーやロスアラモスの既存の施設において様々な固定化形態を製造するうえでの潜在的処理能力やコストについてオープンで検証可能な形での比較をすべきである。

最後に付け加えておくと、急ぐ必要はない。米国の余剰プルトニウムは現在、比較的セキュリティの確実な状態で、エネルギー省のサバンナ・リバー・サイトとパンテック核弾頭組立・分解サイトにある核兵器「ピット」貯蔵バンカーとに貯蔵されている。

ロシアとの交渉

直接処分のオプションを復活させるには、米国にその兵器級プルトニウムを照射することを要求するロシアを説得して要求を取り下げさせるか、ロシアの要求を無視するかが

必要となる。理想的には、2010年にロシアが軽水炉ではなく増殖炉でそのプルトニウムを照射することを決めた際に米国がこれを受け入れたように、ロシアが米国の希望を受け入れることである。

いずれにしても、プルトニウムを照射した後、またプルトニウムを分離するというロシアの計画は、「プルトニウム管理・処分協定（PMDA）」の実施によりロシアで得られるはずのセキュリティ上の利点を基本的になくしてしまった。実際、プルトニウムを再度分離してまた使うというロシアの計画は、協定の対象となる34トンのプルトニウムのうち25トンが高いセキュリティの「マヤク核分裂性物質貯蔵施設」（米国の財政支援によって建設された）に、そして、残りの9トンにジェレズノゴルスクの地下プルトニウム貯蔵施設に置いたままにしておくよりも、盗難のリスクを高めてしまう¹⁶⁸。従って、米国が直接処分に移行することを受け入れるよりも PMDA を放棄するというありそうにない選択をロシアがたとえたとしても、米国側には失うものはほとんどない。PMDA は、行政協定だから、両国の行政部門同士で再交渉したり、終了させたりすることが可能である。

直接処分オプション

直接処分が選ばれた場合に埋設されることになるプルトニウムの量は、使用済み MOX 燃料として埋められる場合のプルトニウムの量と比べ大して大きくならないということを理解することが重要である。炉内での照射は、MOX 燃料の中のプルトニウムその他の長寿命の超ウラン元素の量を3割程度減らすだけである。これは、1つには、プルトニウムの偶数の同位体 (Pu-238、Pu-240、Pu-242) は「非核分裂性」であることによる。これらは、高速中性子炉や核爆発によって核分裂させることはできるが、軽水炉の連鎖反応を維持する低速中性子で核分裂させられる確率は低い。MOX 燃料における核分裂で支配的な役割を果たすプルトニウム239でさえ、低速中性子を吸収した後核分裂しない確率は4分の1に達する。プルトニウム240になってしまうのである¹⁶⁹。MOX 燃料の中で核分裂する10個のプルトニウム原子に対し、6個の新しいプルトニウムが、燃料の重金属質量の90%を構成するウラン238による中性子の吸収によって生み出される¹⁷⁰。

ある国がプルトニウムの分離と使用に関心を持っている場合、その使用済み MOX 燃料は最高品位「鉍」となりそうなものである。なぜなら、使用済み MOX 燃料の中のプルトニウムの割合は、使用済み低濃縮ウラン燃料の場合の約6倍に達するからである。しかし、使用済み MOX 燃料の中のプルトニウムの燃料としての価値は軽水炉にとっては下がってしまっている。サイクルごとに、非核分裂性のプルトニウムの同位体の割合が増えていくからである。たとえば、未使用の MOX 燃料の中の非核分裂性プルトニウムの割合が35%だとすると、照射後には54%となる¹⁷¹。フランスでさえ、使用済み MOX 燃料の中のプルトニウムを実証規模以上では分離していない。実際、フランスの使用済み MOX 燃料は、ラアーグの巨大な使用済み燃料貯蔵プールに四半世紀にわたって溜まり続けている。高速中性子炉の商業化の可能性を待っているのである。2005年、フランスの放射性廃棄物の処分に責任を持つ組織、仏「放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)」は、使用済み MOX 燃料を地下処分場で処分するシナリオを検討し始めた¹⁷²。

中間貯蔵

米国と英国の章で見たとおり、分離済みプルトニウムを固定化した後、地下深くに掘った処分坑道あるいは「部屋」、または、ディープ・ボアホール（超深孔）で直接処分する様々なオプションが検討されている。しかし、地下の最終目的地が利用可能になるまでは、場合によって何十年も¹⁷³——プルトニウムを処理して「処分体」にしてからか、その前の状態でかは別として——中間貯蔵が必要となる。

「処分体」の製造のためにはプルトニウムの希釈化が必要であるということは、希釈化によって高度なセキュリティー態勢の貯蔵スペースの増加が必要となるのを避けるために、処分場が利用できるようになるまで作業を始めない理由となると考える向きもあるかもしれない。しかし、図6及び7が示すように、純粋なプルトニウム酸化物は、コンパクトな形で貯蔵することはできない。臨界——近くのプルトニウムの缶同士で核分裂の連鎖反応が起きること——を防ぐ必要のためである。

下に可能なプルトニウム「処分形態」についての概観と、これらを地下に定置するための戦略を示す。

処分形態

1. 後でプルトニウムを再度取り出すことが困難となるような希釈体とプルトニウム酸化物との機械的攪拌
2. 非放射性ガラスあるいはセラミック内への固定化
3. セラミック固定化の特殊な形態としての「低仕様」あるいは「貯蔵用」MOX

機械的攪拌：後でプルトニウムを再度取り出すことが困難となるような希釈体とプルトニウム酸化物との機械的攪拌は、米国で小規模なものが追求されている。プルトニウムに汚染された廃棄物のための既存の深地下処分場を利用するものである¹⁷⁴。上述のとおり、米国エネルギー省「プルトニウム処分作業グループ」は、これを米国のプルトニウムすべての処分のための最も低費用のオプションとしている。ただし、「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」に入れることのできる廃棄物の量に関して議会の定めた制限が若干拡大できることが前提となる。WIPP 内で廃棄物の入ったドラム缶の1つが2014年2月に爆発したことがエネルギー省とニューメキシコ州の関係を傷つけており、WIPP の目的を拡大して、プルトニウムの含有率のずっと高い形態で当初計画よりも大きな量のプルトニウムを収容するようにすることが政治的に受け入れ可能であるかどうかについては今後の進展を俟たなければならない¹⁷⁵。

固定化：米国のプログラムでは、2つのプルトニウム固定化形態が開発された。セラミックあるいはガラスに混ぜるものである。

セラミック：プルトニウムを入れたセラミックは高圧と高温を伴うプロセスで作られる。米国のプルトニウム処分プログラムが開発したアプローチは、MOX 燃料ペレットを作るのに使われるものと似ている。ただし、MOX 燃料ペレットが約1立方センチメートルの大きさであるのと比べ、固定化形態はこの約100倍となる¹⁷⁶。

二酸化プルトニウムを二酸化ウランと混ぜ、この混合物を挽いて細かな粉末にする（粒子の大きさ約1ミクロン）。有機粘結剤や場合によっては臨界制御用の中性子吸収材など他の物質も混ぜる。混合物を顆粒化し140～350気圧の圧力下で望む形状にプレス加工する。得られた「グリーン」パックは、加熱して、約1350℃で数時間維持し、融合させて一塊の固形物にする¹⁷⁷。エネルギー省のために行われたある研究では、年間5トンのプルトニウムの固定化を24時間体制で実施するのに必要な労働力は約300人と推定された¹⁷⁸。

セラミックまたは結晶体とガラスの混合物を作るもう一つのアプローチは、「熱間等方圧加圧法（HIP）」と呼ばれる方法で圧力と熱を同時に加えるものである。「オーストラリア原子力科学技術機構（ANSTO）」は、プルトニウムを含む様々な放射性核種を低浸出性の材料内に「隔離」するために合成岩石「シンロック」を開発している¹⁷⁹。英国「国立核研究所（NNL）」は、ANSTO と共同でセラフィールド再処理サイトに不純物に汚染されたプルトニウム酸化物をガラス内に固定する装置を設置している。ガラスの中に溶解度の低い結晶を形成させその中にプルトニウムを隔離するものである。粉末に高圧（1000気圧）と高温（1200～1300℃）を同時に加えこれを8～9時間維持する。

この混合物の中のプルトニウム含有率は平均して、最高10重量%、NNL が開発している5リットルの体積の最終的廃棄物形態当たり2キログラムである。英国の最初の試みでは、固定化の対象となる廃棄物のプルトニウム含有率が、母材形成物質と混ぜる前の段階で平均20%だったため、5リットルの廃棄物形態には0.3～0.5キログラムしか含まれ

ないと予測されている¹⁸⁰。

ガラス固化：ガラス固化アプローチでは、ガラス溶融炉内でプルトニウム酸化物を中性子吸収材及びガラス粉末（「フリット」）と混ぜる。次に溶融混合物を容器に入れて冷やし、固める¹⁸¹。これは、プレス加工及び焼結よりもコストが低く、再処理廃棄物の固化のために数カ国で大規模に使われている。米国のプログラムの中で特殊なランタンホウケイ酸ガラスが開発され、1立方センチメートル当たり最高0.5グラム、つまり、2リットルの缶に1キログラムを入れることができる。この濃度でプルトニウムを完全に溶け込ませるには、1450～1500℃の高温が必要である¹⁸²。温度が低いと、HIP プロセスの場合のように、プルトニウム含有率の大きな結晶が形成される。HIP プロセスの場合と同じく、結晶は比較的溶けにくいいため、この不均質な形態も容認できる。

貯蔵用 MOX：1990年代に一部の非政府系アナリストが検討したプルトニウム固定化アプローチの1つに、直接処分用として低品質の MOX を作るというのがある——場合によっては MOX ペレットを缶に入れただけというの也被含される。

貯蔵用 MOX を作るだけのために MOX 工場を建設するコストは非常に高いものとなるだろう。しかし、既存の MOX 燃料製造工場、たとえばセラフィールド MOX 工場のような所が、役目がなくなってしまう場合は、それを貯蔵用 MOX の製造に活用することを検討しても良いだろう。その場合、投入資本は、「サンクコスト」となり、運転コストは寸法差についての基準（寸法公差）が緩やかになるため下がるだろう。

実際、西ヨーロッパの燃料メーカーが製造した何十トンものプルトニウムを含む MOX が実質的に貯蔵用 MOX となっている。燃料として使えないからである。アレバ社は説明を拒否しているが¹⁸³、フランスにおいて MOX として製造されて未照射のままのプルトニウムの量が1995年の3.6トンから2011–13年の約30トンへと増えている主たる理由はこのためのものである（図3）。

フランスで貯蔵されている使用不能の MOX 燃料には次のようなものが含まれる。

1. 失敗に終わったフランスのスーパーフェニックス増殖炉用に製造された未照射の MOX 燃料1炉心分。約6トンのプルトニウムが入っている¹⁸⁴。
2. ドイツでまったく運転されなかった SNR300増殖炉のために製造されたもう一つの未照射炉心。1.6トンのプルトニウムが入っている¹⁸⁵。おそらくは、アレバ社に対する支払い、それに、同量のプルトニウムを含むドイツの軽水炉用 MOX 燃料と引き替えにフランスに送られたのだろう¹⁸⁶。
3. 低仕様 MOX にされたスクラップのプルトニウム。量は不明。アレバのカダラッシュ¹⁸⁷、ベルギーのデッセル¹⁸⁸、ドイツのハナウ¹⁸⁹の MOX 製造工場が閉鎖になった際に、プルトニウムを輸送可能な形態にする方法として作られたものと、アレバ社のメロックス燃料製造工場¹⁹⁰で継続されている運転の際の出てきたスクラップを低仕様の MOX に製造したもの。

スーパーフェニックスの炉心はまだジュネーブに近いローヌ川沿いの当該原子炉サイトにあるが、それ以外の使用不能の MOX 燃料はラアーグにあるフランスの再処理工場の使用済み燃料プールの1つに置かれている。

この未照射 MOX のうち、どれだけがまた溶かされて軽水炉用 MOX 製造に使われるのかは分からない。現在、フランスのラアーグ再処理工場は、MOX 粉末やペレットを処

理する許可を得ているが、燃料棒や燃料集合体の扱いについては許可がない。最終的には、この使用不能の MOX 燃料の一部またはすべてがフランスの将来の高レベル放射性廃棄物処分場で直接処分されることになるかもしれない。

米国エネルギー省のサバンナ・リバー・サイトで貯蔵されている米国の余剰プルトニウムには、閉鎖された液体ナトリウム冷却「高速中性子実験施設 (FFTF)」用に製造された使用不能の MOX 燃料に入った0.7トンのプルトニウムが含まれる¹⁹¹。日本には、高速炉計画や発電用原子炉の再稼働の状況によっては使用不能となってしまうかもしれない未照射 MOX 燃料がある。

地下の最終目的地

プルトニウムを固定化した後、廃棄体パッケージにすると、地下深くに掘削した「部屋」あるいは処分坑道、ディープ・ボアホール（超深孔）などに定置することができる。

掘削した処分場：使用済み MOX 燃料は恐らくは、処分場が利用可能になった時点で、キャスクに入れた形で使用済み低濃縮ウラン燃料と共に処分されることになるだろう。未照射の MOX と固定化されたプルトニウムは、適切な形態で使用済み燃料と共に処分することができる。このように混在させておくと、短期的には、処分場の閉鎖まで、使用済み燃料から来るガンマ線が MOX の盗取に対するある程度の防護の働きをする。長期的には、プルトニウムの含有率の高い物質と使用済み燃料とを混在させることは、何千年も経って水がキャスクに浸透し、中身が溶け出して来た場合に、臨界の危険性を減らす役割を果たす。

高レベル廃棄物のガラス固化体も、地下に掘削された処分場に入れられると見られている。ガラスの中に固定化されたプルトニウムも一緒に入れられるだろう（均質な形で高レベルガラス廃棄物に混ぜ込まれたものも、非放射性のガラスと混ぜて缶に入れられた後、高レベル廃棄物ガラス固化体に埋め込まれたものも）。放射線のバリアによって守られていないプルトニウムは、処分場の閉鎖まで、あるいは少なくとも処分場内のこのようなプルトニウムを含む「部屋」を埋め戻し材や工学的障壁などによって遮断するまでは、特別なセキュリティの手はずが必要となる。

ディープ・ボアホール：3～5キロメートルの深さのボアホールというオプションは、固定化されたプルトニウムにとって特に興味深い¹⁹³。この深さは、掘削した処分場の場合の最大10倍になる。これによってプルトニウムを再度取り出すのが難しくなる。また、プルトニウムが溶けて、汚染された水に含まれて地表にまた運ばれてくる可能性は、少なくとも次の3つの要因によって低下する。

1. このような深さでは上にある岩による巨大な圧力ため亀裂が閉じられ、水の動きが非常に遅くなる。
2. 周りの岩との反応によって酸素が枯渇してしまっている深部の古い地下水の中ではプルトニウムは溶けにくい
3. このような深さの水は、通常、中に塩類が溶解しており、密度が高いため、地表近くの地下水層の軽い淡水の所まで上がって行って混ざり合うことになりにくい¹⁹⁴。

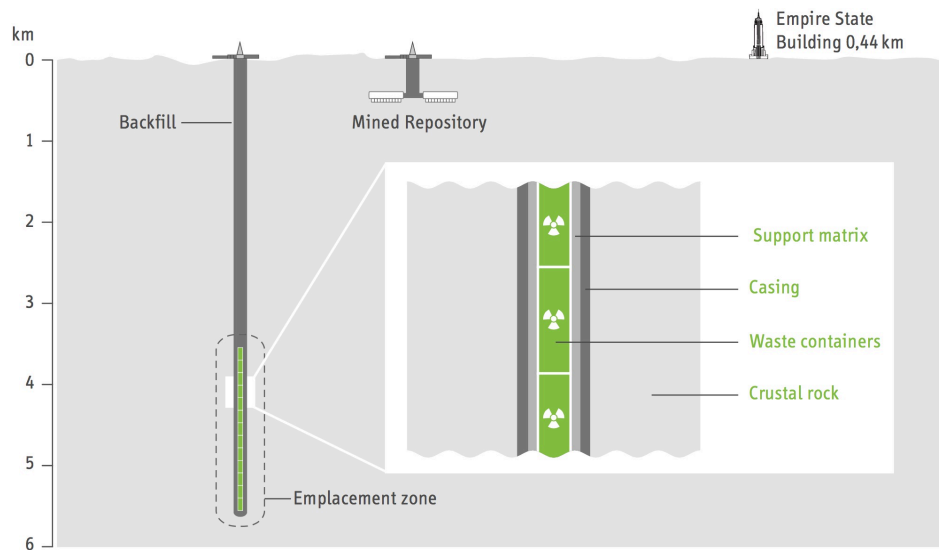


図 11 固定化されたプルトニウム処分のためのディープ・ボアホールの概略図

この例では、ボアホールの深さは約 5 キロメートル。下の半分は、基盤地殻岩石に完全に囲まれており、ここに固定化されたプルトニウムが入る。ボアホールは、埋め戻され、ボアホールの周りの岩に切り込んで施す何重ものシール（密封材）でブロックされる。ボアホールの頂部は、もっと多孔性の岩の部分を通過するが、埋め戻され、さらにシール(密封材)が施される。セメント、粘度、アスファルトなどが使われうる。比較のために示してある通り、典型的な地層処分場は約 0.5 キロメートルの深さに作られる。20 世紀の最も高い高層ビルの高さに匹敵する。

出典： Harold Feiveson, Alexander Glaser, Zia Mian and Frank von Hippel, *Unmaking the Bomb* (MIT Press, 2014) Figure 9.3.

放射性廃棄物をディープ・ボアホールで処分する可能性に関する相当量の分析的作業が米国その他で実施されてきている¹⁹⁵。非放射性物質を定置する実証プロジェクトが米国エネルギー省のサンディア国立研究所を調整役として準備されつつある¹⁹⁶。サンディアの研究者らはプルトニウムのボアホール処分を議論していないが、使用済み燃料を深さ 5 キロメートルのボアホールに処分する可能性については議論している。使用済み燃料の入った堅固な容器を円筒空洞の底部 2 キロメートルほどに入れる。円筒の直径は、約 16 センチメートル、容積は約 40 立方メートルである¹⁹⁷。

ボアホールの中で臨界に達しないようにするために 50 トンの兵器級プルトニウム酸化物を劣化ウラン酸化物で希釈して平均 3 % の含有率にする場合¹⁹⁸、50 トンのプルトニウムの処分にかかわる「重金属」——混合物の中のウランとプルトニウム——の量は 1700 トンとなる、

混合物を加圧してセラミックにし、燃料ペレットと同じ重金属密度（1 立方センチメートル当たり 9.6 グラム）を得るとすると、必要な体積は 177 立方メートルに過ぎず、5 本のボアホールに収容できる。しかし、1700 トンの重金属を加圧してセラミックにするのは、大きな費用がかかる。このようなセラミックの製造物の大きさは燃料ペレットより大きく、要求される品質のレベルはずっと緩やかではあるが。

もう一方の極端な形としては、重金属酸化物は粉末としておくこともできる。実際、プルトニウムの取扱いを最低限にするために、サバンナ・リバーで貯蔵しているプルトニウム酸化物の缶についてはそのままウラン酸化物を入れたキャニスターの中に詰め込むこともできる。しかし、粉末内の重金属の密度は 1 立方センチメートル当たり 1.4 グラムにしかならない。セラミックの 7 分の 1 程度である¹⁹⁹。

中間的な戦略は、ウラン酸化物の粉末をプルトニウム酸化物の入った缶の周りに1立方センチメートル当たり約4グラムの密度まで詰め込むというものである²⁰⁰。これだと、ボアホール1本当たり約4トンのプルトニウムを定置することができ、50トンのプルトニウムを収容するのに必要なボアホールは13本となる。5キロメートルの深さのボアホールを1本作り、プルトニウムを入れ、密封するのにかかるコストは4000万ドルと見積もられている²⁰¹。

プルトニウムを中に埋め込むことのできる低浸出性のセラミックに関する論文は大量にある²⁰²。しかし、特別に設計した低浸出性の廃棄物形態というのは必要ないかもしれない。熱膨張と収縮、あるいは、核分裂生成物のガスによって亀裂を生じたペレットの入った使用済み燃料の中にあるもっと大量のプルトニウムが地層処分場には入れられることになるからである。

1つの根本的な問題は、ボアホールの立地の方が掘削して作る地層処分場の立地より政治的に実現しやすいか、言い換えると、ディープ・ボアホールの深さの程度と幅の狭さとのために、人々にとってその安全性が直感的に明白と感ぜられるかどうかである。

米国エネルギー省の「プルトニウム処分作業グループ」はそうではないと想定した²⁰³。この想定は、候補地で「フォーカス・グループ」を対象にテストすることができる。

公衆による受け入れに関する1つの潜在的な問題は、近年、地層処分場における放射性廃棄物処分の「可逆性」が強調されているということであるかもしれない²⁰⁴。たとえば、

*フランスの2006年「放射性物質・廃棄物の持続可能な管理に関する法律」は、次のように定めている。「用心のため、許可は、処分プロセスの可逆性を保証しなければならない期間を規定するものとする。どんな場合でも、その最低限期間は100年未満であってはならない」²⁰⁵。

*カナダの「核廃棄物管理機関（NWMO）」は、2005年に、使用済み燃料処分場のパフォーマンスに関する地下でのモニタリングは、アクセス坑道や立て坑が最終的に閉鎖されるまで、240年継続することを勧告している²⁰⁶。

国際的透明性

非核兵器国では、プルトニウムの埋設は、使用済み燃料の中に入っているものも含め、処分場の埋め戻しが行われるまでプルトニウムの転用が行われていないことを検証するため IAEA によるモニタリングが実施される。IAEA はまた、処分場を永久的に監視する責任を負うだろう。処分場に再度入るようなことになった場合、中のプルトニウムが保障措置下に置かれた活動から転用されるようなことがないようにするためである。

「核不拡散条約 (NPT)」の加盟国である5つの核兵器国は、同条約の6条において「核軍縮 [に関する] 条約について、誠実に交渉を行うこと」を約束しており、これが成功すれば、5カ国は非核兵器国となる。IAEA がこれらの国々の余剰プルトニウムのモニタリングを行えば、将来における5カ国の非核兵器国の地位の検証に役立ち、短期的には大幅削減協定についての信頼を高める。

核兵器国において大量のプルトニウムを埋設する最初のプログラムは、プルトニウムに汚染された廃棄物をまとめて「廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)」に埋設するという米国のプログラムかもしれない。2013年末の時点で、米国は IAEA に対し、WIPP で4.5トンプルトニウムが処分されたと報告している²⁰⁷。

WIPP を地下処分場の透明性に関する実証サイトとする可能性についてエネルギー省のサンディア国立研究所の専門家等による検討がなされたことはあるが²⁰⁸、WIPP に埋設されている廃棄物に入っているプルトニウムの量について IAEA が実際に検証したことはない。これは1つには、財政難に悩まされている IAEA が核兵器国における検証という事業に取り組みたがらないためである。

米ロの2000年「プルトニウム管理・処分協定」には、両国がそれぞれのプルトニウム処分に関するモニタリングの取り決めについて IAEA と交渉するとの約束が盛り込まれている。2014年末の時点で、これらの交渉は終結していない。

結論

米国サウスカロライナ州にあるエネルギー省のサバンナ・リバー・サイトで建設中の MOX 工場の大幅な予算超過のため、オバマ政権は、2013年に MOX によるプルトニウム処分は「負担しきれないかもしれない」との結論を下した。この結果、プルトニウムを廃棄物として直接処分する可能性についての政策的関心が米国において再燃することになった。

外国の分離済みプルトニウムを MOX 燃料にする英国での試みは技術的問題に直面し、セラフィールド MOX 工場は放棄された。このため、英国は、少なくとも形式的には、プルトニウムの直接処分の道を検討した。

日本とフランスは、未だに、MOX のみに焦点を合わせている。そして、それぞれの政府の方針が使用済み燃料を再処理するというものである限り、この状況は続くだろう。しかし、日本の計画は大幅に遅れており、フランスは近いうちに、同国の MOX 燃料を照射してきた原子炉の退役という問題に直面するかもしれない。

1990年代末、米国は「キャン・イン・キャニスター」というオプションを相当詳しく検討した。プルトニウムを固定化し、元々そこからプルトニウムを分離して取り出した高レベル再処理廃棄物の一部の中に埋め込むというものである。これは、使用済み燃料の中にあるプルトニウムの場合のように、プルトニウムの周りに放射線のバリアを作り出す1つの方法である。使用済み燃料は放射線のバリアがあるために、厚い放射線遮蔽物の後ろから遠隔操作で化学的・物理的作業を行うことによって以外は、中に含まれるプルトニウムにアクセスすることはできない。「キャン・イン・キャニスター」アプローチは、既存の廃棄物形態の量の大きさと比べた場合、増加分はごくわずかだという点で MOX と同じメリットを持つ。既存の廃棄物形態のために、いずれにせよ、地層処分場を何処かに作らなければならないからである。

このオプションは、米国にとってはとりわけ、現在も興味あるものと言えるかもしれない。米国は再処理廃棄物を向こう数十年にわたって処分することになるからである。

英仏両国では、高レベル廃棄物のガラス固化が再処理と並行して行われており、「キャン・イン・キャニスター」オプションは、再処理が終わるずっと前に計画しない限り不可能かもしれない。

しかし、他のオプションもある。魅力が増していると思われるのは、ディープ・ボアホール(超深孔)処分である。放射線バリアは伴わないが、閉鎖後の地層処分場の場合よりもプルトニウムを取り出すのはずっと難しいだろう。

地下処分場で放射線バリアを設けずにプルトニウムを処分する可能性もある。米国が「廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)」でやっている方法である。このような場合には、処分場の中の処分プルトニウムを含む「部屋」・処分坑道が閉じられるまでは、特別なセキュリティの手はずが必要となるだろう。米国エネルギー省は、ドラム缶当たり1キログラム以下であれば、プルトニウムは十分に希釈されており——とりわけ、プルトニウムの分離が困難な化学物質とプルトニウムが混ざられている場合には——これは必要ないと考えている。しかし、これについては議論が必要だろう。WIPP の場合には、ドラム缶の中心に置かれたプルトニウムを入れたパイプは、わずか12リットルほどの体積しかなく、ドラム缶から取り出させる可能性がある²⁰⁹。

長期的には、処分場が閉鎖され、ガンマ線のほとんどを提供する半減期30年のセシウム137が減衰してしまった後は、中にあるプルトニウムの悪用に対する防御を提供するのは地下処分場の深さと永久的な形の国家・国際組織によるモニタリングとになるだろう。

国によっては、1つのプルトニウム処分方法だけでは不十分かもしれない。MOX 燃料に専心しているフランスも、実質的に「貯蔵用 MOX」の形で所有している20トン以上のプルトニウムを直接処分することになるかもしれない。どの処分オプションも何らかの問題を伴うということを考えれば、米国も、少なくとも二重路線アプローチに戻るべきだろう。WIPP、「キャン・イン・キャニスター」、ディープ・ボアホールは、すべて、様々なタイムラインで追求する価値があると思われる。

MOX は、かつて、コストが容認できるもののように見え、使用済み燃料と共に処分できる廃棄物形態を生み出した。いまでは予測されたよりも高くつき、技術的にも難しいことが判明している。直接処分の様々な方法は、それぞれ、やっかいな問題を伴っているが、すべてを検討すべき時である。

理想的には、余剰プルトニウムの問題を抱えている国々が、直接処分の諸オプションを検討するための共同計画を始めるのがいい。しかし、このような協力の短期的な可能性は、仏・日・ロ各国が再処理にコミットし続け、英国政府が解決策の提言を原子力産業に頼っている限り、限定的なものとなるだろう。MOX プログラムが放棄された場合には、これらすべての国の原子力エスタブリッシュメントは、関連したノーハウや産業的能力を持っており、直接処分に関与する商業的関心を持つだろう。

文末注

1. 軽水（普通の水）で冷却する「軽水炉（LWR）」（発電用原子炉として最も一般的）の使用済み燃料には約1%の割合でプルトニウムが入っている。
2. IAEA, Communication Received from Certain Member States Concerning their Policies Regarding the Management of Plutonium [一部の加盟国から当該国のプルトニウムの管理に関する政策について受領したコミュニケーション], INF/CIRC/549, 16 March 1998.
3. 1970年代から何十年にもわたって、フランスと日本の再処理推進派は、発電用原子炉の使用済み燃料から分離されたプルトニウムは発電用原子炉の燃料よりも照射度のずっと低いウランから分離された「兵器級」プルトニウムと同位体組成が異なるから核兵器には使えないと主張した。いまではこの主張は以前ほど頻繁にはされなくなったが、今日でも聞かれる。1978年に米国の核兵器設計者ロバート・セルデンがフランスと日本の再処理エスタブリッシュメントの指導者らを対象にブリーフィングをして、「原子炉級」プルトニウムも核兵器に使えることを説明した。フランスの再処理推進派の反応は、「あなたがなんと言おうが、我々のプルトニウムは潔白だ」というものだった。1995年にフランスの原子力委員会のある高官は、原子炉級プルトニウムの兵器利用可能性についてフランスの核兵器設計者らが同国の再処理エスタブリッシュメントに対してなんといっているのかと聞かれた際に次のように答えている。「彼らがいうことは違う！」
1993年、元ロスアラモス核兵器設計部門責任者が、プルトニウムの同位体組成がどうであろうと長崎型の設計でも少なくとも TNT 爆薬換算で1000トン（1キロトン）相当の威力を持つことを説明する非機密文書を発表した。J. Carson Mark, “Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium（原子炉級プルトニウムの爆発特性）,” Science & Global Security Vol. 4 (1993) pp.111–128. 1997年には、米国の核兵器研究所の専門家のグループがこの問題について2ページの非機密要約ステートメントを出し、結論としてこう述べた。「原子炉級プルトニウムは、洗練されていない核拡散者であると先進核兵器国であるとかかわらず、核兵器に利用することができる。分離済みプルトニウムの盗取は、それが兵器級であれ原子炉級であれ、深刻な安全保障リスクをもたらす。」(Nonproliferation and arms control assessment of weapons-usable fissile material storage and excess plutonium disposition alternatives [核兵器利用可能核分裂性物質の貯蔵および余剰プルトニウム処分方法に関する核拡散・軍備管理評価] (U.S. Department of Energy, DOE/NN-0007, 1997), pp. 38–39).
このような勧告の結果、IAEA は、非核兵器国におけるプルトニウムの保障措置においてプルトニウムの等級を区別しない。ただし、プルトニウム238の含有率が80%を超えるプルトニウムは除外している（半減期が88年と比較的短いため、プルトニウム238はキログラム当たり0.5キロワットの崩壊熱を出す）。
4. 軍事用プルトニウムでは核弾頭1個当たり3kg、民生用プルトニウムでは保守的に、第一世代（長崎型）核兵器1個当たり、製造過程ロスも含めて8kg という IAEA の想定を使用（IAEA Safeguards Glossary (IAEA 保障措置用語集), 2001 Edition, p. 23)。
5. ロシアと米国に関しては、「防衛目的にもはや必要とされないと指定されたプルトニウムの管理と処分およびこれに関連した協力に関する米国政府とロシア政府の間の協定」（2000年プルトニウム管理・処分協定（2010年議定書による改定版） <http://fissilematerials.org/library/PMDA2010.pdf>）においてそれぞれが余剰と宣言した兵器級プルトニウム34トンがこれに入る。米国は、2005年、さらに9トンの兵器級プルトニウムを余剰と宣言した。IAEA への2014年の宣言において(INFCIRC549/A6/17)米国は、さらに4.5トンを「廃棄物」として処分したと述べている。ニューメキシコ州の地下深くの地層処分場「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」での処分である。英国は、1998年に0.3トン兵器級プルトニウムを余剰と宣言した(Global Fissile Material Report 2010, p. 78)。
6. インドはその増殖炉計画のために分離したプルトニウムは「戦略的」なものであり、IAEA の保障措置の対象ではないと宣言している。これにより、インドは、このプルトニウムあるいは同国の増殖炉によって生み出されたプルトニウムを核兵器目的に使うオプションを維持している。「プルトニウム生産炉に関わる協力に関する米国政府とロシア連邦政府の間の協定」（1997年9月23日）の下で、ロシアは1994年9月以後その生産炉で生産されたプルトニウムを核兵器用に使わないことに同意した（Global Fissile Material Report 2011, endnote 120）。ロシアが余剰と宣言した34トンにはこの約6トンのプルトニウムは含まれていないと推定される（Global Fissile Material Report 2010 (IPFM, 2010) Table 3.5）。1998年戦略防衛レビューにおいて、英国は、セラフィールド再処理工場に保管されている政府所有の原子炉級プルトニウム4.1トンを核兵器目的上、余剰と宣言した。米国が「国家安全保障上の必要にとって余剰」と宣言した政府所有の分離済みプルトニウムのうち、地下深くの「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」で廃棄物として処分されていない49トンには、兵器級ではない6.6トンが含まれる（IAEA, “Communication Received from the United States of America Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium, INF/CIRC/549/Add.6/17, 6 October 2014 and United States Plutonium Balance, 1944–2009 (U.S. Department of Energy, 2012), Table 3)。
7. フランスおよび英国にある外国の分離済みプルトニウムで日本所有でないもの。
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.*, Annex on Quantities, Forms, Locations, and Methods of Disposition.
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. プルトニウムは、ウラン238が中性子を捕獲した後、ウラン239（半減期24分）の放射性崩壊により、ネプツニウム239（半減期2.4日）となり、そして、プルトニウム239（半減期2万4000年）となることにより生み出される。プルトニウムは軽水炉の燃料内で生成し、その一部は分裂するが、軽水炉では、ウラン235への主たる依存から抜け出すのに十分なプルトニウムは作られない。
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, Superphénix case.
15. 53 MWt 日/kg、熱－電気転換効率1/3、低濃縮ウラン1kg 当たり天然ウラン8.5kg（4.4%濃縮ウラン、劣化ウランのテールアッセイ0.23%）と想定。
16. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand* (OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2014) p. 130.
17. 例えば次を参照：Erich A. Schneider and William C. Sailor, “Long-Term Uranium Supply Estimates,” *Nuclear Technology*, Vol. 162 (2008) p. 379.
18. ベルギー、イタリア、オランダは、フランス・ドイツの増殖炉計画に参加した（*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. 2013年末現在、累積量で言って、CEFRの発電量は20MW 時に過ぎない。IAEA, Power Reactor Information System, <http://www.iaea.org/PRIS/>. 2014年12月の運転に関しては、以下を参照
http://www.heneng.net.cn/index.php?mod=news&category_id=9&action=show&article_id=33209&category_id=9（中国語）。
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. 再処理された燃料の出力単位当たりの炭素14の大気中への放出量は、1970年代以来、一桁減少している。
26. ネプツニウム237、プルトニウム240、プルトニウム242、アメリシウム243、キュリウム244の軽水炉内での核分裂の確率は、すべて、プルトニウム239と比べ、一桁から二桁低い（“Le Projet ASTRID,” (Société Française de Energie Nucléaire, SFEN/GR21, 2013) p. 6）。
27. 例えば Figure 13–18を参照。漏れから生じる被ばく線量の貢献度の順で放射性同位体を並べると以下のようになる：ラジウム226（ウラン238の崩壊生成物）、ヨウ素129（超ウラン同位体ネプツニウム237の核分裂生成物）、セレンウム79（核分裂生成物）、鉛210（ウラン238の崩壊生成物）、ニッケル59（鋼鉄合金の放射化生成物）、アクチニウム227（ウラン235の崩壊生成物）、ニオブ94（鋼鉄合金の別の放射化生成物）（*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）。
28. 以下からの翻訳：“Avis no. 2013-AV-0187 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 4 July 2013 sur la transmutation des éléments radioactifs à vie longue” [“Opinion No. 2013-AV-0187 of the Nuclear Safety Authority of July 4, 2013 on transmutation of long-lived radioactive elements”]. 次の結論も参照：ASN, ASNを支援する研究機関 IRSN の結論。“Avis IRSN n° 2012 – 00363, Objet: Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs...Etudes relatives aux perspectives industrielles de séparation et de transmutation des éléments radioactifs à vie longue: Examen du rapport d’étape du CEA, d’octobre 2010, relatif aux évaluations technicoéconomiques des options de séparation-transmutation” [“IRSN review No. 2012-00363 of National management of radioactive materials and waste...Studies on the industrial prospects of separation and transmutation of long-lived radioactive elements: Review of the CEA October 2010 interim report on technical and economic assessments for partitioning and transmutation”].
29. 栃山修・経済産業省地層処分技術ワーキンググループ委員長、次に引用。Osamu Tochiyama, chair of METI’s technical working group on waste disposal and Director of the Radioactive Waste Disposal Safety Research Center at the Nuclear Safety Research Association, quoted in Daisuke Yamada, “As I See It: Gov’t needs to look at options on handling, disposal of radioactive waste,” *Mainichi*, 1 May 2014（日本語版：論点＞核のごみ 最終処分への提言 毎日新聞 2014年05月23日）。
30. 例えば次を参照：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. ロシアと米国は、兵器級プルトニウムについてプルトニウム240のプルトニウム239に対する比率が0.1を超えないものと定義することに合意した (“2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol,” *op. cit.* Article I)。原子炉内における中性子照射はこの比率を高める。中性子がプルトニウム239の一部を核分裂させ、一部をプルトニウム240に変えるからである。小さな相殺作用としては、プルトニウム240が中性子を捕獲しプルトニウム241に変わるというのがある。
37. “2000 Plutonium Management and Disposition Agreement as amended by the 2010 Protocol,” *op. cit.* Article VII.3.
38. また、増殖炉は普通の形状では、炉心を取り巻くウラン「ブランケット」内に兵器級プルトニウムの発生をもたらす (Mortitz Kütt, Frederic Frieß and Matthias Englert, “Plutonium disposition in the BN-800 Fast Reactor: An assessment of plutonium isotopes and breeding,” *Science & Global Security* Vol. 22 (2014) pp. 188–208)。
39. フランス、英国、日本がIAEAに出した報告によると、2013年末現在、英仏両国にある外国の分離済みプルトニウムで日本以外のものはわずか5トンとなった。2012年末の11トン、2011年末の16トンからの低下である。
40. 日本原燃 (JNFL) によるコスト、2012年10月。 <http://www.jnfl.co.jp/jnfl/establishment.html> (日本語)。
41. 日本原燃 (JNFL) のプレスリリース、2014年10月31日 <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/pr141031-1.html> (日本語)。
42. IAEA Nuclear Fuel Cycle Information System (INFCIS)。
43. フランスと英国に送られた使用済み燃料の量は日本の経済産業省の資源エネルギー庁から福島瑞穂議員への回答。2013年1月16日 (http://kakujoho.net/ndata/pu_jp.html)。
44. Rapport fait au nom de la Commission D’enquête relative aux coûts passés, présents et futurs de la filière nucléaire, [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. 送電線網に最初に接続された日付は、IAEA Power Reactor Information System から。
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 matières et déchets 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 (原子力安全局) が間違って ANDRA (放射性廃棄物管理公社) とされている。ANDRA はフランスにおける放射性廃棄物処分の責任を負う。
49. 英国の「原子力廃止措置機関 (NDA)」は2014年には英国の第一世代マグノックス炉の最後の1基、ウィルファ1 (電気出力46万キロワット) を運転し続けたが、2015年に同炉の運転を停止する計画だった (<http://www.magnoxsites.co.uk/site/wylfa/>)。
50. Japan Atomic Energy Agency, “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. 日本原子力委員会『我が国のプルトニウムの管理状況』2013年末。
53. 日本原燃 プレスリリース 2014年4月11日 <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/pr140411-2.html>, および <http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2014/20140411besshi.pdf> (日本語)。
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: £2bn 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. 日本原子力委員会の2000年「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」の資料の部分に記述がある (<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/siryo/houkoku2/p53.pdf>) : 「もんじゅが運転再開した後は〔2014年現在これは起きていない〕、研究開発用に年間数百キログラムのプルトニウム需要が見込まれる。電気事業者は、

- 2010年までにプルサーマルを16～18基の規模まで順次拡大しつつ実施していくことを計画している。プルサーマルには、既に具体化している計画では一基当たり年間約0.3-0.4トンのプルトニウムの利用が見込まれる。全炉心 MOX 燃料装荷の大間原子力発電所では年間約1.1トンの利用が見込まれる。」電気事業連合会の計画の最も初期のものは、Utilization plan for plutonium recovered at Rokkasho Reprocessing Plant (Fiscal years 2005–2006) (<http://www.fepec.or.jp/english/news/plans/index.html>) である [日本語版は『六ヶ所再処理工場回収プルトニウム利用計画』(平成 17、18 年度) http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afiedfile/2008/08/25/20060106_1.pdf]。2006年1月に公表されたこの計画は、2012年度以降 MOX を利用する16–18基の原子炉を挙げている。「利用計画」発表の目的は当時も今も、六ヶ所再処理工場(2006年にホット試験開始)の運転を正当化することにある。当時、六ヶ所村の MOX 製造工場は、2012年度に運転を開始予定で、「年間利用目安量」5.5～6.5トン Puf(核分裂性プルトニウム: プルトニウム239とプルトニウム241)の利用が見込まれた。日本原子力委員会が2013年9月11日に発表した『我が国のプルトニウムの管理状況』によると、全プルトニウム量と核分裂性プルトニウムの量の比は1.5である。電気事業連合会は、この後「プルトニウム利用計画」を2010年9月17日まで、年に1回、場合によっては2回出している。最後の利用計画では、すべての MOX 利用炉での「利用開始」を「2015年度以降」とした(http://www.fepec.or.jp/english/news/plans/1207167_1696.html) [日本語版は http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afiedfile/2010/09/17/plu_keikaku.pdf]
58. 福島第一3号、玄海3号、伊方3号、高浜3号。2014年末現在、2.5トンプルトニウムの入った未使用 MOX 燃料が6つの原子炉に置かれている。玄海3号、浜岡4号、柏崎刈羽3号、高浜3号、高浜4号。Masa Takubo, “MOX Fuel Transportation/Use/Storage,” <http://fissilematerials.org/blog/MOXtransportSummary10June2014.pdf> [日本語版は http://kakujoho.net/ndata/pu_jp.html]
 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 [日本語版: 電気事業連合会、プルサーマル <http://www.fepec.or.jp/nuclear/cycle/pluthermal/index.html>] 導入開始年は、2009年に、1997年のステートメントを MOX 利用計画の遅延という現実に合わせてるために2010年から2015年に変えられていた。2009年の発表は、「遅くとも MOX 燃料加工工場が操業開始する2015年度までに」としている。
(http://www.fepec.or.jp/english/news/conference/_icsFiles/afiedfile/2009/06/29/attachment_1_1.pdf) [日本語版 http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/1198266_1511.html]
 61. Tsuyoshi Nagano and Hiroshi Ishizuka, “Completion of nuclear fuel processing plant postponed for 21st time,” *Asahi Shimbun*, 31 October 2014. [日本語版 長野剛、石塚広志 核燃料再処理工場、完成延期は21回目 審査終了いつ 朝日新聞 2014年10月30日]
 62. 日本原子力委員会、『我が国のプルトニウムの管理状況』(2014年9月26日発表)
 63. “Even if the electric power companies can restart their nuclear reactors, they could be forced to shut them down if the Rokkasho plant cannot accept additional nuclear fuel and their own storage pools become filled,” Tsuyoshi Nagano and Hiroshi Ishizuka, “Completion of nuclear fuel processing plant postponed for 21st time,” *Asahi Shimbun*, 31 October 2014. [日本語版「施設内の使用済み燃料プールは、すでに各地の原発から運ばれた燃料でほぼ満杯。再稼働した原発の使用済み燃料プールが埋まれば、引き取り先が無くして停止を強いられる状況だ」(長野剛、石塚広志 核燃料再処理工場、完成延期は21回目 審査終了いつ 朝日新聞 2014年10月30日)]。実際は、日本の15の原子力発電所のうち、12カ所では使用済み燃料プールが満杯になるまで少なくとも10年間は運転できる, 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. 以下も参照。“Utilities balk at safer storage of spent nuclear fuel to avoid ‘wasted investment,’” *Asahi Shimbun*, 4 January 2015.
 64. 「中間貯蔵操業開始を16年10月に延期へ」デリーー東北 2015年1月10日
 65. T「英国原子力廃止措置機関(NDA)」は2014年1月に次のように推定している。「再処理活動が終わった時点で、英国には約140トンの民生用分離済みプルトニウムが存在することになるだろう」(*Progress on approaches to the management of separated plutonium* (2014), p. 3)。
 66. 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. 2013年末の時点で英国には外国の分離済みプルトニウムが23.4トンあった, IAEA, “Communication Received from the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium,” INF/CIRC/549/Add.8/16, 18 July 2013.
 67. Fiona Harvey, “Sellafield MOX nuclear fuel plant to close,” *The Guardian*, 3 August 2011. 1970年までに、「英国原子力公社(AEA)」はセラフィールドで約3トンの軽水炉用 MOX 燃料を製造した。外国の6つの原子炉で使用するためである。英国原子力公社——後に、1971年に再処理を受け継いだ「英国核燃料公社(BNFL)」——は、また、1988年まで英国ドーレイ高速炉(11MWe)及び原型高速炉(234 MWe)用に約18トンの MOX 燃料(プルトニウム含有率最高33%)を製造した(これらの炉はどちらもスコットランドのドーンレイで運転)。BNFLは、その後、MOX 実証施設をセラフィールドに建設した。同施設は、1990年代初頭に外国の軽水炉用に少量

- の MOX 燃料を製造したが品質保証データの捏造スキャンダルの後閉鎖された (BNFL *View of UK Plutonium Usage*, UK Nuclear Safety Advisory Committee (98) P4, January 1998, p. 2)。
68. BNFL *View of UK Plutonium Usage*, submission to the UK Nuclear Safety Advisory Committee, *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 社は、その助言において、プルトニウム241から生じるアメリシウム241の含有率の MOX 燃料製造上の最大許容レベルは 4 %だと明確に述べている。これは、ブレンディング (混ぜ合わせ) によって達成できる。これだと、アメリシウム問題によって廃棄物として扱わなければならないプルトニウムの割合を2009年に想定された 5 %から0.2%に減らすことができる。これとは別に11.7トンのプルトニウムは MOX 燃料にするには化学的除染が必要になる (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. 報告書には NDA の短い文書 Plutonium Strategy Current Position Paper (2011)が添付されているが、これには NDA のそれまでの各種報告書と比べて新しいものはほとんどなかった。
 84. DECC (2011a) *op. cit.* p. 19. DECC (2011a) *op. cit.* p. 19. MOX 燃料が8.5%のプルトニウムを含んでいるとすると、140トンのプルトニウムで1650トンの MOX 燃料ができる。従って、60年間の平均使用率は年間27.5トンとなる。これが2基の原子炉の燃料の40%を構成すると想定した場合、2基で合計年間70トンの燃料を使うことになる。今日、1,000-MWe (電気出力100万キロワット) の原子炉は、年間約20トンの低濃縮ウラン燃料を使う。1,700 MWe の原子炉2基なら約70トンの燃料を使う。市場に出ている最大出力の原子炉アレバの EPR 炉の出力は 1,650 MWe である (<http://www.aveva.com/EN/global-offer-419/epr-reactor-one-of-the-most-powerful-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; and 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/uk-nuclear-ambitions-dealt-fatal-blow-by-austrian-legal-challenge-say-greens>.
 90. 英国での原発にむけて最も活発な活動をしている2つの原子力デベロッパー——EDF と ホライズン——は両社とも MOX 燃料の使用について公に強く反対している。「原子力廃止措置機関 (NDA) の表現を借りるなら「最終的に MOX をその検討に含める気になるかどうかは不確かなままである」 (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. アルゼンチン、中国、カナダ、韓国、ルーマニアはすべて CANDU6型炉を所有している。

97. NDA (2014) *op. cit.* p. 18.
98. U.S. Department of Energy *Preferred Disposition Plan for Sodium-Bonded Spent Nuclear Fuel*, Report to Congress (March 2006) tables 1 and 3, 燃料は20%の割合でプルトニウムを含有すると想定。この計画の異様に遅い進展具合については次も参照。Department of Energy, *Fiscal Year 2014 Congressional Budget Request*, Vol. 3, p. NE-51. 2012年会計年度に処理された EBR II の使用済み燃料は何とわずか68キログラムだった。2013年と2014年の処理予定量も同程度だった。
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. 最初のものは缶当たり0.3–0.5kg しか含まないだろう。固定化する混合物に20%ほどしかプルトニウムが入っていないからである。英国国立核研究所 (NNL) C. R. Scales (私信 2014年4月11日)。
102. U.S. DOE, *Plutonium: The First 50 Years* (DOE/DP-0137, 1996) Figure 3 and Table 15.
103. 米国は、1996年に14.5トンの政府所有の燃料級および原子炉級プルトニウムを軍事目的に余剰と宣言した (U.S. DOE, *Plutonium: The First 50 Years* (1996), Figure 3)。しかし、そのプルトニウムのうち7トンは使用済み燃料の中に含まれるものだった (*Draft Surplus Plutonium Disposition Supplemental Environmental Impact Statement: Summary* (US DOE, DOE/EIS-0283-S2, 2012) Figure S-7)。その中には、エネルギー省のハンフォード施設の生産炉 (ほとんどが N 炉) の未再処理使用済み燃料に入っている5トンも含まれていた (*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. エネルギー省は MOX 燃料とキャン・イン・キャニスターのルートによるプルトニウム処分に関するコスト研究を外部に委託した。33トンのプルトニウムを MOX にするコストは、20億ドルと計算された (K. A. Williams, *Life Cycle Costs for the Domestic Reactor-Based Plutonium Disposition Option* (Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-1999-257, 1999) Table 1)。50トンのプルトニウムをキャン・イン・キャニスターで固定化するコストは、13億ドルと推定された (*Design-Only Conceptual Design Report: Plutonium Immobilization Plant* Prepared by Bechtel for Lawrence Livermore National Laboratory (Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-131617, Rev. 1, 1999) Table 9.3)。コスト研究は、異なるグループによって行われ、そのため、必ずしも一貫したものではなかった。しかし、プルトニウム固定化のコストが低くなるというのは信ぴょう性がある。なぜなら、固定化では、それぞれ50グラムのプルトニウムを含む荒仕上げプルトニウム「バック」を作る (缶当たり1kg、缶当たり20バックに基づく。上記参照) が、MOX ベレットにはそれぞれ約1グラムのプルトニウムしか入っておらず、燃料棒被覆管にびったり入るようには微細な公差の範囲内で研磨しなければならない。ブッシュ政権はその議会への報告書の中 (Table ES-3) で、低濃縮ウラン燃料の代わりとなる分のクレジット [回収費用] として7億3300万ドルを想定している。当時の低濃縮ウラン燃料の価格にほぼ相当する。米国の原子炉は MOX 燃料を使うためにはその許可の修正が必要となるだろうし、また、MOX 燃料の輸送や敷地内貯蔵に関し、特別のセキュリティ要件が必要となるかもしれない。さらに、低濃縮ウラン燃料は複数の売り手から入手できる商品であるのに対し、MOX 燃料は政府が不確かなスケジュールで製造するものとなる。1999年のオークリッジの研究は、これらの追加コストやリスクを計算に入れて、MOX 燃料は0.5から0.9の割引きで売られることになると推定した (*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). セラミックではなくガラスが選ばれているのは、サバンナリバー・サイトにはガラス固化に関する相当の専門能力があったからである。缶当たりのプルトニウムの平均量は1kg から0.6kg に減らされることになった。プルトニウムの多くの部分が他の物質と混ざられていたからである。これにより、高レベル廃棄物キャニスター当たりのプルトニウムの量が28kg から16kg に減ることになる。計画は、プルトニウム・ガラス固化プラントをサバンナリバー・サイトの高度なセキュリティの K エリアに作るというものだった。ここにはピット [核兵器の芯の部分のプルトニウム] 以外のプルトニウムがエネルギー省の他のサイトから集積されていた。
114. *Plan for Alternative Disposition of Defense Plutonium* op. cit. p. 1. 2012年 ZPPR のプルトニウムの「多く」はまた余剰と宣言された (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. 報告書は、2つのグローブ・ボックス・ラインがプルトニウムのガラス固化に使われると想定している。後の計画では、1つのラインのみが使われると想定された可能性がある。
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. オバマ政権は、非ピット・プルトニウム13トンの問題を2012年に Draft Supplementary Environmental Impact Statement (SEIS) [ドラフト補足環境影響報告書] で再検討した。有望とされたオプションは、できるだけ多くのプルトニウムを精製して MOX として使えるようにすると共に、残りの2トンは薄めて、ニューメキシコ州南東部の地下深くにある岩塩層に設けられた「廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)」で処分するというものだった (DOE, *Draft Surplus Plutonium Disposition SEIS* (2012), p. B-17) 。「補足環境影響報告書」のプロセスは、2013年に停止となった。米国のプルトニウム処分プログラムの主役 (MOX 燃料製造) の方が再度関心の中心となったからである。
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 の建設・運転費は以下から: *Department of Energy FY 2016 Congressional Budget Request*, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration*, pp. 628, 636. それと、関連した廃棄物固化建屋の建設・運転費23億ドル (*Department of Energy FY 2015 Congressional Budget Request*, Vol. 1, *National Nuclear Security Administration*, pp. 542, 564) 。
122. “Department of Energy,” factsheet on fiscal year 2015 budget, 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. 本法の施行日 [2014年12月19日] から30日以内に、長官は、連邦政府の資金による研究・開発センターと、余剰兵器級プルトニウム・オプションに関する長官の分析を評価・検証するための研究を実施する契約を結ぶこととする…本法の施行日の180日以内に、この研究の実施に当たる連邦政府の資金による研究・開発センターは…長官に対し、結果及び勧告を含め、研究に関する報告書を提出するものとする…本法の施行日の180日以内に、長官は、研究に関する報告を議会の両国防委員会に提出するものとする…報告書には以下が含まれるものとする…連邦政府の資金による研究・開発センターの報告書…MOX 施設に代わる方法—そのような代替案のそれぞれのライフ・サイクル・コスト分析を含む—の提示…。このようなライフ・サイクル・コスト分析の中で代替案のすべてに共通する部分の提示…MOX 施設の継続—将来の資金投入状況も含む—に関する検討または、このような円筒に値すると長官がみなした一部の代替案に関する詳細な検討…MOX 施設の代替案が「プルトニウム処分協定」にいかにか適合するか、また、適合しない場合には、適合性を保証するにはどのような手段を講じなければならないかについての説明…MOX 施設に関連したあらゆる活動を終わらせるために長官が取らなければならない措置及び関連したコストの提示…」(National Defense Authorization Act for fiscal year 2015, 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月の締め切りは、元は、2003年会計度国防権限法によって2011年とされていた。
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. 次の文書では85キログラム。“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. 次の文書では500キログラム。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. 2014年12月9日現在、プルトニウム容器27体が処理されているとトム・クレメンツへの e-mail (Rich Olsen, Planning Analyst, DOE-Savannah River)。中に含まれるプルトニウムの量については言及がないが、3013型貯蔵容器に収納が許可されているのは4.4kg。
133. 合計1ミリグラムの兵器級プルトニウムを大きな労働者の集団が吸入した場合、おおよそ、10人のガン死がもたらされると予測される (Steve Fetter and 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, Assistant Manager for Nuclear Material Stabilization Project, Savannah River Operations Office to Edgardo Deleon, Director, Office of Nuclear Material Disposition, 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://pbadupws.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. 廃棄物隔離パイロット・プラント (WIPP)撤去法は、WIPP に入れられる超ウラン元素廃棄物の量を620万立方フィート(17万6000立方メートル)に制限している。2015年2月14日現在、約9万1000立方メートルが入れられている (WIPP to 6.2 million cubic feet (176,000 cubic meters). As of 14 February 2015, about 91,000 cubic meters had been emplaced, *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. 1キログラムの兵器級プルトニウムは、毎秒約5万6000の貫通力の大きな中性子を放出する (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>. “The New Mexico Environmental Evaluation Group (EEG) used to conduct independent technical evaluation of WIPP to ensure protection of the public health, safety, and the environment. DOE ceased funding their organization in 2004 and the web site was taken down.” <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. 未公表のエネルギー省の評価の結果、K エリア施設をプルトニウムガラス固化に使うために必要な安全性面の改良作業には何十億ドルもかかるとの結論に達したと我々は聞かされた。この主張には、独立の立場からの評価が必要である。
151. 「プルトニウム固定化は、HLW [高レベル破棄物] ガラス固化の現在の DWPF [国防廃棄物処理施設] のスケジュールへの影響を避けるには2026年までに完了しなければならないだろう；スケジュールは、適用すべき許可・同意命令の遵守によって決まる…提案されている率と DWPF における HLW 処理のスケジュールから言って、約6トン以上の…余剰プルトニウムのガラス固化を可能にするのに必要な特性を備えた HLW はない。

- このような状況では、残りの約7.1トンのプルトニウムはこの代替案の下では固定化・ガラス固化ができず別の方法で処分する必要がでてくる可能性がある。」(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. セシウム137の崩壊に関連した特徴的な0.66MeV ガンマ線は、実は、セシウム137の崩壊の際に95%の確率で生じる短寿命の準安定放射性同位体のバリウム137によって放出される。
 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. 予定された合計8582体のキャニスターのうち3,912体が充填されている (Rich Olsen, Planning Analyst, DOE-Savannah River, 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) Appendix A. ケンタッキー州マクシー・フラッツの元地表放射性廃棄物処分サイトもサバンナリバー・サイトより上位にランクした。サバンナリバー・サイトは米国原子力委員会の短命に終わったネブラスカ州のナトリウム冷却ハラム原子力発電所と並んで3位タイとなった。
 164. Deep Borehole Disposal Research (2014) op. cit. chapter 3.
 165. エネルギー省は、これらを GE-日立 PRISM 炉と呼ばないよう制約を受けているようだが、すべてのパラメーターが PRISM のものと同一である。
 166. 例えば次を参照：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 £9bn 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. 中性子の場合、2.2km/秒の速度は、エネルギーが $E = 0.0252 \text{ eV} = kT$ (k は、ボルツマン定数) の関係で熱に変わるの、摂氏20度に相当する (*Handbook Of Nuclear Data For Safeguards: Database Extensions, August 2008* (IAEA, INDC[NDS]-0534, 2008) Table A-5)。
 170. 重金属1キログラム当たり50MWt・日の燃焼度の MOX 燃料の場合、未使用の MOX 燃料に8.6%のプルトニウムが入っていると、5年間の冷却期間後の使用済み燃料には、6%のプルトニウムと0.7%の他の超ウラン元素(ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム)が入っている (*MIT Study on the Future of the Nuclear Fuel Cycle* (2011) p. 74)。
 171. 53MWt・日/kg の燃焼度の低濃縮ウラン燃料からが得られたプルトニウムを MOX として使用し53MWt・日/kg の燃焼度にした場合について、姜政敏 (カン・ジョンミン) による計算 (2014年11月18日)。
 172. ANDRA, Architecture et gestion du stockage géologique [Architecture and management of geological storage] (2005), p. 74.
 173. 2013年1月、オバマ政権は、その戦略は「地層処分場の2048年までの利用可能性を促進すること」と発表した (*Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste* (U.S. Department of Energy, 2013))。放射性廃棄物の地層処分場を設けようという計画は、日英両国でも行き詰まっている。
 174. この廃棄物は、「超ウラン」廃棄物と呼ばれることもある。恐らくは、短寿命 (半減期14.4年) のプルトニウム241の崩壊によって生じる少量のアメリシウム241を含んでいるからだろう。

175. WIPP のリスク評価で想定されているプルトニウム量は、12トンである (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. PWR と BWR のペレットの直径は、それぞれ1.04cm と0.82cm である (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 Process 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 Kotting-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 Kotting-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 のラアグ・サイトでのプルトニウム除去・処理活動は完了した。こうして、2003年から2008年の間に、3年分の生産相当量が新しい燃料の製造にリサイクルされた。」 (<http://www.areva.com/EN/operations-1094/the-cadarache-facilityactivities--cleanup-and-disassembly.html>)。これは、*Status and Advances in MOX Fuel Technology* (IAEA, 2003) Table 2に示されているカダラシュの年間40トンという生産率を使い、さらに、プルトニウムの含有率6%と想定すれば、約7トンのプルトニウムとなる。
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. デッセルの貯蔵MOXの所有は、その顧客に移された。顧客らは恐らく、これをラアグに運び、AREVAに対して支払いをし、引き替えにMOX燃料の形で同等量のプルトニウムを得たのだろう。
189. 「当局は古いMOX施設を閉鎖するよう要求した。運転再開の許可もその後与えられなかった。このため、完全に運転可能な生産ラインが停止状態に置かれることになった。さまざまな処理段階にある2.25トンのプルトニウムがそのままに…。最初から輸送に適したプルトニウムの内、これまでのところ、二酸化プルトニウムの粉末と混合酸化物の形態のプルトニウム550kgが英国とフランスに送られている」 (Helmut Rupa et al, “Decommissioning of Four German Fuel Cycle Facilities,” Waste Management 2000 Conference, February 27 – March 2, 2000, Tucson, AZ)。「まだMOX工場にある核燃料は、工場が閉鎖されるまで処理され「貯蔵エレメント」の状態に置かれた。これは、長期保存ができ、そして、どの原子力発電所でも使うことのできないものである。これらの「貯蔵エレメント」は、フランスのラアグにあるAREVA社に処理のために輸送された」 (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. メロックス工場における全プルトニウム処理量の約5%がこのような「subspec (規格外) MOX」となる (Yves Marignac, 私信)。
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. 日本原子力委員会、『我が国のプルトニウムの管理状況』(2013年末現在) (日本語)。
193. 我々が知る限り、プルトニウムのボアホール処分に関する最初の分析は次の文書。Johan Swahn, *The Long-Term Nuclear Explosives Predicament: The Final Disposal of Militarily Usable Fissile Material in Nuclear Waste from Nuclear Power and from the Elimination Of Nuclear Weapons* (Technical Peace Research Group, Institute of Physical Resource Theory, Göteborg, Sweden, 1992.)

194. 米国で提案されているボアホール処分設計要件は、2km の深さより下では、母岩が基盤花崗岩または玄武岩でなければならないというものである (*Deep Borehole Disposal Research, op. cit.* (Sandia, 2014))。このような岩盤は、閉じ込められて加圧された「被圧地下水」の存在を可能にする層を形成しない。
195. See for example 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. サンディアの設計のボアホールでは、ボアホールの底部の2km に重金属253トンの使用済み燃料を収めることができる (Pat Brady *et al*, *Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report* (Sandia National Laboratory, SAND2012-7789, 2012), p. 9)。燃料は円柱状の燃料棒の形態で入れられる。最も稠密な (六角形) の詰め方の場合、キャニスター内の91%の体積は燃料棒で占められる。燃料棒の断面の約73%は、燃料のウラン酸化物からなる「肉」の部分である。残りは、燃料被覆、それに、燃料被覆と肉の間の隙間である。従って、容器の体積の3分の2は燃料ペレットが占める。ペレット内のウランの密度は約9.6グラム/ccである。従って、キャニスター内のウランの平均密度は6.3グラム/ccで、燃料棒の形態の重金属253トンを収容するのに必要な体積は約40立方メートルである。これは、内径16センチメートル (6インチ)、長さ2キロメートルの円柱の容積に等しい。
198. 水と3%濃縮ウランの最適な非均質混合物を水で囲まれた無限大の長さの円柱に入れた場合 (つまり非現実的な極端な場合)、臨界に達する最小直径は約27cm である (*Critical Dimensions of Systems Containing U-235, Pu-239, and U-233* (Los Alamos National Laboratory, LA-10860-MS, 1987), Fig. 24)。同じ割合のプルトニウムを劣化ウランに混ぜた MOX 混合物の場合同様の結果が得られる (*Critical Dimensions of Systems Containing U-235, Pu-239, and U-233* (Los Alamos National Laboratory, LA-10860-MS, 1987), Table 18)。3%というのは、また、使用済み MOX 燃料内の核分裂性プルトニウム (Pu-239 + Pu-241) の平均含有率である (*Plutonium Fuel: An Assessment* (OECD Nuclear Energy Agency, 1989) Table 12B)。
199. 缶は、直径5インチ、高さ10インチで、体積にして3.2リットル、最高4.4kg のプルトニウムが入る (<http://www.lanl.gov/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/04fall/primer.Html>)。
200. Aurica-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. 例えば次を参照: 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. この点は、ヨハン・スワーン (スウェーデン核廃棄物再検討 NGO オフィス事務局長) から指摘を受けた。
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,” INFCIRC/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.

著者紹介

Gordon MacKerron ゴードン・マッケロン

第3章を執筆。2014年まで英国サセックス大学ビジネス・経営・経済学部「科学技術政策研究ユニット（SPRU）」ディレクター及び教授。以前は SPRU 内「エネルギー・グループ」ディレクター。2001年には、英国政府エネルギー再検討チームの副リーダー。英国政府「放射性廃棄物管理委員会（CoRWM）」の創設委員長（2003～2007年）。環境問題について英国政府及び公衆に助言する「英国環境汚染王立委員会」の3年の任期（2010～2013年）を務めた。IPFM メンバー。

Frank von Hippel フランク・フォンヒッペル

プリンストン大学「科学・世界安全保障プログラム（SGS）」シニア研究物理学者及び公共・国際問題名誉教授。核分裂性物質政策問題に40年にわたって関わってきた。IPFM、SGS 及び専門誌『科学と世界安全保障』を共同創設。1983年－90年、ゴルバチョフ大統領の軍縮問題アドバイザー、エフゲニー・ベリホフと共同で、軍拡競争を終わらせるための各種措置を提案。1993－94年、ホワイトハウス「科学・技術政策局」国家安全保障担当次官を務め、米ロ協調核セキュリティ・プログラムの開始に貢献すると共にプルトニウム処分に関わる省庁間グループを指揮。IPFM のメンバー。

著者らは、トム・クレメンツ、ドン・ハンコック、クラウス・ヤンバーク、エドウィン・ライマン、ジア・ミアン、イヴ・マリニャック、マイケル・シュナイダー、鈴木達治朗、田窪雅文他から情報、示唆、論評を得たことについて謝意を表したい。

核分裂性物質に関する国際パネル(IPFM) 発行レポート

www.fissilematerials.org

プリンストン大学

科学と地球安全保障プログラム

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

2015 年 4 月