



IPFM

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

核分裂性物質に関する国際パネル

原子力計画における プルトニウム分離

世界の民生用再処理の現状、問題点と今後の展望

第10章 核変換 (トランスミューテーション)

第11章 経済性

核分裂性物質に関する国際パネル

原子力計画における プルトニウム分離

世界の民生用再処理の現状、問題点と今後の展望

第10章 核変換（トランスミューテーション）

第11章 経済性

翻訳 田窪雅文（ウェブサイト核情報主宰／IPFM メンバー）

編集協力 真下俊樹

© This version of the report has been revised on 1 September 2015 correcting the endnote numbering and updating a few web links.

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、世界の既存のプルトニウム分離（再処理）施設を示している。詳細は本報告書の図1.5を参照

第10章 核変換（トランスミューテーション）

今日再処理と高速中性子炉の正当化のために使われている主要な議論の一つは、使用済み燃料の中の長寿命の超ウラン元素を核分裂させれば長期的危険性を減らすことになるというものである。プルトニウムの同位体やその他のウランより重い超ウラン放射性同位体（ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム）の一部は数千年から数百万年の半減期を持っている（表10.1参照）。いかなる処分場であっても、放射性核種が漏れ出して地表の水を汚染することがないようにこのような長期間にわたって保証することはできないから、超ウラン元素を核分裂させてもっと短い半減期の核種に変えた方がいいとの主張がなされる。この主張は、普通、超ウラン元素の入った使用済み燃料と入っていないものの経口摂取毒性を示すグラフを使って説明される（図10.1参照）（これらの元素は元素のアクチニウムと化学的に似ているためアクチニドとも呼ばれる）。

超ウラン同位体	燃焼度 53 MW-days/kgLEU での質量% ¹⁷⁸	半減期（年）	崩壊して変化するのは
プルトニウム 238 (Pu-238)	2.4	87.7	ウラン 234
プルトニウム 239 (Pu-239)	45.7	24,000	ウラン 235
プルトニウム 240 (Pu-240)	21.9	6,500	ウラン 236
プルトニウム 241 (Pu-241)	5.3	14.4	アメリシウム 241
プルトニウム 242 (Pu-242)	7.0	380,000	ウラン 238
全プルトニウム	82		
アメリシウム 241 (Am-241)	8.9	432	ネプツニウム 237
アメリシウム 243 (Am-242)	1.8	7400	ネプツニウム 239
(プルトニウムとアメリシウム)	93		
ネプツニウム 237 (Np-237)	6.6	2.14 million	プロトアクチニウム 233
キュリウム 243 (Cm-243)	0.0051	28.5	プルトニウム 239
キュリウム 244 (Cm-244)	0.37	18.1	プルトニウム 240
キュリウム 245 (Cm-245)	0.039	8500	プルトニウム 241
合計	100		

表 10.1. 使用済み低濃縮軽水炉用燃料における長寿命超ウラン元素同位体の構成（燃焼度 53MWt 日/kgU、20 年冷却）。超ウラン元素の総質量は、使用済み燃料に元々含まれていたウランの質量の 1.3%。

超ウラン元素の核変換というのは、これらの物質を核分裂させて（大体は）もっと短い寿命の核分裂生成物に変えるというものである。図10.1は、これにより100年から10万年にかけての時期に経口摂取毒性を相当に減らせることを示している。しかし、下に見るように、必ずしも、これにより深地下処分場の危険性を相当に減らせるというわけではない。

これまでのところ、使用済み燃料から大規模な形で分離・使用されている唯一の超ウラン元素はプルトニウムである。使用済み低濃縮ウラン燃料のほとんどを再処理しているフランスでは、プルトニウムはウランと混ぜて、「ウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）」燃料にしている。MOX は、フランスの電気出力 90 万キロワットの軽水炉 24 基で使われ、それぞれの燃料の 30%を提供している。これはフランスの発電用原子炉で使われる燃料の 10%に相当する。

現在、再処理の過程で使用済み燃料を溶解した際にそこから他の超ウラン元素——ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム——を分離している国はなく、使用済み燃料の再処理を実施している国々では、これらの物質は高レベル再処理廃棄物固化体の形で核分裂生成物とともに処

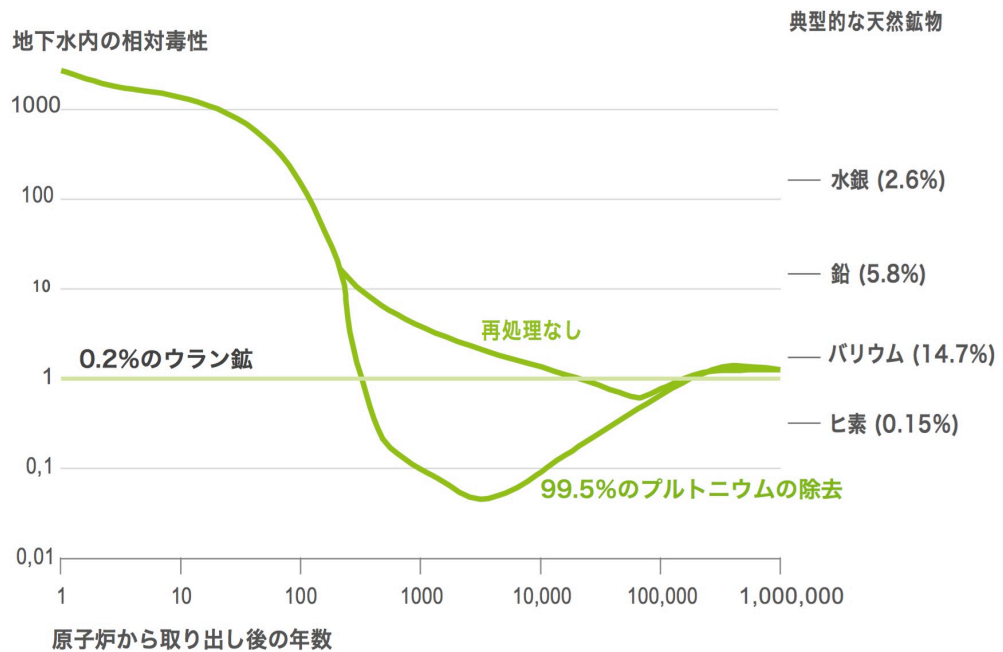


図 10.1 処分場に置かれた使用済み燃料の経口摂取毒性に関する釣り合いのとれた見方

上のグラフは、使用済み燃料が処分場の岩石と完全に均質に混ざりあった仮想状態を想定し、その場合の経口摂取毒性を時間の関数として示している。使用済み燃料と比較されているのは、1) 放射性廃棄物（使用済み燃料を再処理して 99.5%のプルトニウムを除去したもの）と処分場の岩石が均質に混ざった場合、2)さまざまな鉱物の毒性、3) 低品位（0.2%）のウラン鉱である。【カナダの研究なので】対象となっている燃料は天然ウランを使った重水炉（CANDU 炉）用のものである。均質に混ざったとして、使用済み燃料中のウランが処分場岩石全体に占める割合（含有率）は重量にして 0.2%と想定されている（これは、スウェーデン型の使用済み低濃縮ウラン処分場の場合に使用済み燃料のウランが岩石全体に占める含有率に等しい）。毒性のレベルは、当該物質を飲料水で認められた限度まで希釈するのに必要な水の量に比例する。10 万年付近の使用済み燃料の毒性の増加は、ウラン 238 の崩壊生成物であるトリウム 230（半減期 7 万 5000 年）が増えてくることによるものだろう。このグラフから、プルトニウムの 99.5%を除去すれば、埋設後数千年の時点で毒性が 20 分の 1 ほどに下がることがわかる。軽水炉の使用済み燃料の場合、他の超ウラン元素も除去したとすると、毒性は約 100 分の 1 に下がる⁴⁷⁹。

分されている。これは再処理の元々の目的を反映している。元々の目的とは、最初は核兵器用にプルトニウムを分離すること、次は、プルトニウム増殖炉の初期装荷燃料用のプルトニウムを提供するということだった。

フランスでやっているようにプルトニウムを軽水炉で 1 回だけリサイクルした場合、使用済み燃料の中に含まれるプルトニウムの量は約 40%減る⁴⁸⁰。プルトニウムを軽水炉で複数回再利用するというのは商業規模では試みられていない。これは、プルトニウムを再利用すると、軽水炉で支配的な遅い中性子では核分裂しないプルトニウム同位体の割合が増えていくからである。また、遅速中性子炉では、核分裂を起こさないまま中性子捕獲が続く確率が相当程度あり、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウム、キュリウムを複数回利用すると、キュリウム 244 の含有率が高くなる。キュリウム 244 は自発核分裂を高頻度で起こす。燃料工場では、その際に生じる貫通力の強い中性子が大きな危険要因となり、長期の間隔を開けながら、厳重な遮蔽の下での遠隔操作による作業を行うことが必要となる。

高速中性子を 1000 年間運転

ナトリウム冷却炉の提唱者らは、これらの炉で連鎖反応をもたらす高速中性子の場合、超ウラ

核分裂/吸収

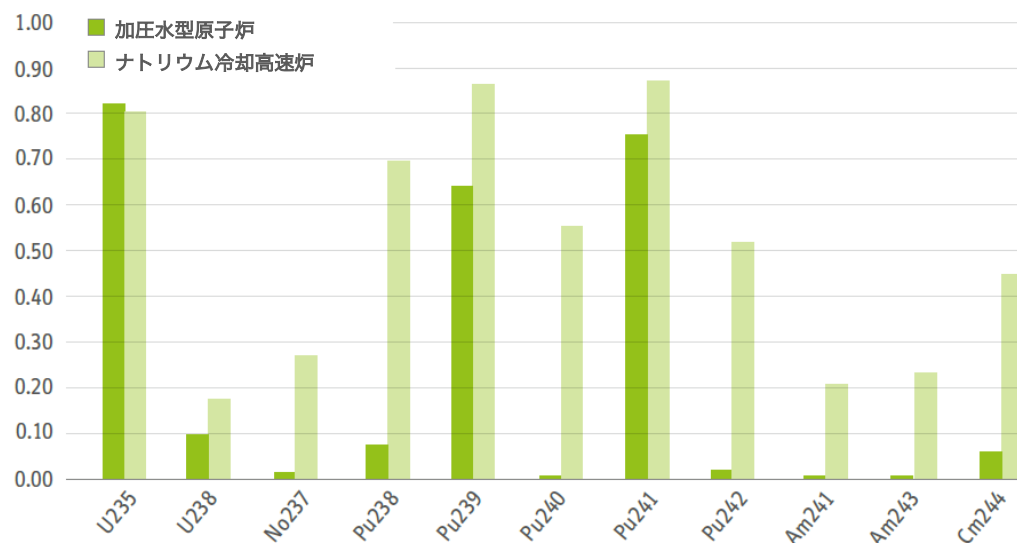


図 10. 2 遅速中性子と高速中性子の核分裂確率

上のグラフは水冷却加圧水型炉の炉心における遅速中性子と、ナトリウム冷却高速炉炉心における高速中性子が、ウラン、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウム、キュリウムの同位体を核分裂させる確率を示している。核分裂を生じない中性子吸収の繰り返しで、ウラン 238 からキュリウム 244 などの重い同位体を最終的に生み出す。出典：「Le Projet ASTRID,」 Société Française d’Energie Nucléaire, SFEN/GR21, 2013, p. 6.

ン同位体によって吸収されて核分裂を起こさない確率が、水冷却炉で連鎖反応をもたらす遅い中性子の場合よりもずっと低いことを指摘する（図10.2）。これは、キュリウム244の蓄積を劇的に減らす。キュリウム244は、ウラン238から始まる核分裂を伴わない6回の中性子吸収の結果生じるものである。

実際の核変換のためには、使用済み低濃縮ウラン燃料から超ウラン元素を分離し、これを高速中性子炉の燃料として何度もリサイクルすることが必要である。図10.1に示されているような低減を達成するには何世紀も、あるいはそれ以上かかる。これにより地層処分場に送られる超ウラン元素の割合は非常に小さくなるかもしれないが、地上では膨大な量が高速炉の炉心とその燃料サイクルの中を動き回ることになる。米国科学アカデミー（NAS）⁴⁸²が1996年に発刊した報告書『核廃棄物：群分離と核変換の技術』によると、超ウラン元素が軽水炉群で生み出されるペースに合わせてこれを高速中性子炉群で核分裂させるシステムによって長期にわたって一定の発電量を保つという「コンスタント発電量」シナリオにおいて、各サイクルで超ウラン元素の99.9%が抽出されると想定したとしても、100年後の超ウラン元素の地上と地下を合わせた総存在量の低減率は85%にしかならず、99%の低減率を達成するには何千年もかかる⁴⁸²。つまり、地上で流通する超ウラン元素の量が、使用済み燃料を再処理しないで直接処分した場合に地層処分場に送られる量の100分の1になるには何千年もかかるということである。原

⁴⁸² NAS の研究の「コンスタント発電量シナリオ」では、軽水炉と高速炉を合わせた原子力の総発電容量は 70.3GWe と想定。ヤッカ・マウンテン処分場に送られることになっている 6 万 2000 トンの軽水炉使用済み燃料を再処理して得られる 612 トンの超ウラン元素（TRU）を総発電容量 30.4GWe（3040 万 kW）の第 1 世代高速炉（増殖率 0.65）の運転開始及び取替燃料に使う。その後、総発電容量 39.9GWe の新しい軽水炉が、第 2 世代以後の高速炉用の TRU を提供するために運転を始めるという流れである。一方、軽水炉の運転を止めて高速炉で TRU を減らす「低下発電量シナリオ」では、最初の 30 年間は、総発電容量 30.4GWe の高速炉が運転されると想定。6 万 2000 トンの軽水炉使用済み燃料から得られる TRU をすべてをこの第 1 世代の高速炉で使う。第 1 世代の高速炉の使用済み燃料から得られる TRU を総発電容量 15.1GWe の第 2 世代の高速炉で使う。第 3 世代高速炉は総発電容量 7.5GWe となる。という具合で、最終的には高速炉 1 基だけが使われることになる。

子力発電の段階的廃止を決め、「遺産」として残っている超ウラン元素の除去のために多数の高速炉を使った場合はもっと速くなるが、それでも99.5%を除去するには少なくとも150～200年はかかる⁴⁸³。

核変換に対する関心の広がり

しかし、ほとんど先進原子力先進国の政府は、使用済み燃料の有害性を許容可能なレベルにまで下げるには超ウラン元素の分離と核変換が必要だとの主張を受け入れている。そして、この正当化の議論は、今では高速中性子炉の開発継続に対する支持を維持するのに極めて重要なものとなっている。

- 2006年、フランスの議会はその環境法典に新しい項目を追加し、次のような任務を「原子力庁（CEA）」に与えた——使用済み燃料に含まれる長寿命の放射性同位体の分離・核変換の工業的展望について検討し、2020年までにパイロット・プラントを建設すること⁴⁸⁴。これを受けて、CEAは、600MWe（電気出力60万キロワット）のナトリウム冷却高速中性子炉ASTRIDを建設することを提案した⁴⁸⁵。このプロジェクトは多額の費用を必要とするだろうが、フランス経済は現在、苦境に立たされている。計画を進めるか否かについての最終的決定は、2019年にずれ込んでいる⁴⁸⁶。
- ベルギーは、欧州委員会の財政的支援を得て50–100MWt（熱出力5万～10万キロワット）未臨界鉛・ビスマス冷却高速中性子炉（MYRRHA）を建設することを提案した⁴⁸⁷。原子炉駆動の役割を果たすのは、陽子のビームによって発生させられた破碎中性子となる。この炉は汎用研究施設となるが、表明されている主要な使命は、「長寿命の放射性廃棄物の核変換のための『加速器駆動システム（ADS）』の物理と技術を実証すること」である。提唱者らは、フランスで計画されているASTRIDのような高速炉は使用済み燃料の中のプルトニウムを核分裂させることができるが、加速器駆動システムでは、プルトニウム以外の「マイナー」な超ウラン元素を核分裂させるのに使うことができるのだと主張する⁴⁸⁸。
- 日本では、経済産業省が軽水炉と高速中性子炉でのプルトニウムのリサイクルは、高レベル廃棄物の毒性が元の天然ウランのレベルまで下がるのに必要な期間を10万年から、それぞれ、8000年、300年に短縮すると主張している⁴⁸⁹。
- ロシアは未だに高速炉のプルトニウム増殖の使命を強調しているが、それでも、そこに「マイナー・アクチニドのリサイクルと核分裂生成物の管理のための最善の方法」を見いだすという目的を追加している⁴⁹¹。
- エネルギー省の再処理及び増殖炉の商業化計画が議会によって1980年代にキャンセルされた米国においてさえ、同省は次のように述べている。「最終的戦略は、完全なリサイクル・アプローチであり、広範な再処理によって、使用済み燃料から一部の元素を取り出し、その一部を高速炉で再利用し、場合によってはその他の部分を核変換して最終的廃棄物の量と毒性を最小化するというものである」⁴⁹²。

現在の使用済み燃料の発生ペースと歩調を合わせてその超ウラン元素を使用するのに必要な核変換用高速炉の発電容量は相当なものになるだろう。全世界の合計330GWe（電気出力3億3000万キロワット）の発電容量の軽水炉からは、毎年約6700トンの使用済み燃料が取り出される。その中には約74トンの超ウラン元素が入っている⁴⁹³。軽水炉が生み出す速度に合わせて超ウラン元素を核分裂させることにより超ウラン元素の量を増やさないようにするには、110GWe相当の高速中性子炉が必要となる。これは、これまで高速炉によって達成された最高の設備利用率（ロシアのBN-600）を前提としたばあいである⁴⁹⁴。超ウラン元素をMOXの場合のようにウランと混ぜた場合——米国「科学アカデミー（NAS）」の研究は安全性上の理由から、そうす

る必要があるとしている⁴⁹⁵——必要な高速炉発電容量は2.5倍の275GWe となる。超ウラン元素を生み出している軽水炉の発電容量に近い大きさとなる。

従って、超ウラン元素の分離と核変換は、原子力分野の大規模な変容と、これまでその特殊な安全性問題のために反対をもたらしてきたナトリウム冷却炉の大々的な数の建設についての国民の受容を必要とする。

使用済み燃料処分場の危険についての釣り合いのとれた見方

反原発派の人々の多くが使用済み燃料の処分の危険性に焦点を当てているが、使用済み燃料を地下500メートルの所に埋設した方が、燃料が原子炉内にあるときより危険だと主張するのは難しい。炉内にある燃料は、短期間の冷却材喪失が起きただけでメルトダウンと福島規模の放射能の大気中への放出をもたらす可能性がある。また、冷却プールに置かれている使用済み燃料より危険だと主張するのも難しい。プールで冷却材がなくなれば、閉じ込め機能のない状態で使用済み燃料火災が発生し、ずっと大量の放出が起きうる⁴⁹⁷。

図1に示されている使用済み燃料からの経口摂取の危険性は、地下深く埋設された使用済み燃料がその500メートルほど上方にある地表に住む集団に対してもたらす危険性について測る上で適切な指標ではない。ここで欠けているのは、可能性のある被曝の仕組みについての分析である。いずれにせよ、図1で示されているとおり、地球の地殻にはすでに、鉛、ヒ素、水銀——それにもちろんウラン——など多くの毒性物質が入っている。

使用済み燃料について考える場合、天然のウランとその放射性崩壊生成物が最も適切な比較対象となるだろう。なぜなら、使用済み燃料の長期的危険性を支配するのもこれらだからである。また、地殻内のウラン、トリウム、それとこれらの物質の放射性崩壊生成物の危険性についてはすでに詳しく知られている。地表付近の岩や建設用材料の中の天然ウランやトリウムは、経口摂取及び体外被曝、それにラドン（ウラン238の崩壊生成物）の吸入により、ヒトに年間平均約2ミリシーベルトの被曝をもたらしていると推定されている⁵⁰⁰。これによって生じる生涯ガン罹病リスクの増加は約1.5%と推定される。つまり、ウランとトリウムがなかった場合のヒトの生涯ガン罹病リスクが40%だとすると、これら二つの物資の存在がそのリスクを約41.5%にまで増大させる⁵⁰¹。

自然の過程がウランやトリウムを分布させたように地球の地殻に無差別的に放射性廃棄物を混ぜるのは無責任だろう。だが、このような形で比較をすると、危険性の性質や規模についてある程度の釣り合いのとれた見方が出来るようになる。地表から500メートルあるいはそれ以上の深さの地下水の流れから使用済み燃料を守るべく設計された処分場に使用済み燃料を置けば、ヒトに対するリスクは相当程度減らすことができるだろう。

超ウラン元素の地表への移動の確率

地殻における天然ウランと同様、ヒトに危害をもたらすには、使用済み燃料処分場の放射性核種あるいはその崩壊生成物は、ヒトが住む地表に運ばなければならない⁵⁰²。自然の移動性を決める最も重要な要素は、地下深部の地下水における廃棄物内のさまざまな化学種の溶解度である。低水量の花崗岩あるいは玄武岩に設けられた深地下処分場の場合、水中の酸素は岩との化学的反応によって使い尽くされており、超ウラン元素はこの地下水には比較的溶けにくい⁵⁰³。そのため、超ウラン元素はその場の使用済み燃料の毒性において支配的なものであったとしても、水によって地表に運ばれる一群の放射性核種の毒性を支配するものとはならない。スウェーデンで計画されている処分場（深地下の花崗岩の中）について行われた計算では、一般に水による移動に起因する被曝の約10%をネプツニウム237がもたらし、プルトニウムがもたらすのは1%以下という結果となった。これに対し、ウランの崩壊生成物であるラジウム226は、

埋設された使用済み燃料による被曝線量の60%を占めるが、その線量は岩の中の天然ウランからの線量と比べると取るに足らないものとなる⁵⁰⁴。また、フランスで計画されている処分場（分厚い粘土層の中）に関する計算では、超ウラン元素はほとんど移動しないという結論がでている⁵⁰⁵。

処分場の容積の低減という利点の欠如

アレバ社——フランスのラアグ再処理工場を運転し、中国と米国に同じような再処理工場を売ろうとしている政府所有の会社⁵⁰⁷——は、再処理は「廃棄物の体積を5分の1に削減」すると主張している⁵⁰⁸。日本の経済産業省も似たような主張をしている⁵⁰⁹。比較されているのは、使用済み低濃縮ウラン燃料1トンの体積と、その使用済み燃料の再処理で生じる高レベル廃棄物の体積とである。しかし、この比較から抜けているのは、再処理とプルトニウムのリサイクルで生じる長寿命の中レベル及び低レベルの廃棄物で、これも深地下処分場に埋設しなければならない。フランスのケースに関して行われた詳細な計算は、不確実性を伴うものの、再処理とMOX燃料製造過程で生じる放射性廃棄物で深地下処分を必要とするものすべてを含めると、再処理廃棄物と使用済みMOX燃料のために掘削される地層処分場の容積は、元の使用済み低濃縮ウラン燃料のためのものと同じとなることを示している⁵¹⁰。

さらに、廃棄物の体積の比較は、放射性廃棄物地層処分場の面積が廃棄物の体積ではなくその発熱量によって決まることを無視している⁵¹¹。たとえば、スウェーデンとフランスの処分場の設計では、水の流れに対するバリアーを追加するために、高レベル廃棄物の入ったキャニスター（容器）はベントナイト粘土で囲まれている。この粘土は、水の流れの減速及びイオン吸収の性質をフルに発揮するには100°C未満に保たなければならない⁵¹²。このため、それぞれのキャニスターに入れられる発熱性の廃棄物の量が制限されると同時に、互いの温度を大きく上げることがないようにキャニスター同士の間には一定の間隔を置かなければならない。

1トンの使用済みMOX燃料と、この燃料を作るのに必要なプルトニウムを得るために再処理しなければならない約7トンの使用済み低濃縮ウラン燃料から生じる高レベル廃棄物とを合わせた発熱量は、再処理をしていない使用済み低濃縮ウラン燃料8トンの放射性崩壊熱と比べると、炉からの取り出し後10年～200年の期間では、約1.2倍になる⁵¹³。従って、再処理して分離したプルトニウムをMOX燃料として1回リサイクルするというのは地層処分場の面積の縮小には余り役立たない。

分離と核変換の経済・環境両面のコスト

先に触れたとおり、米国エネルギー省の委託で「米国科学アカデミー（NAS）」が核変換に関する体系的なコスト・ベニフィット研究を行った結果が『核廃棄物：群分離と核変換の技術』として1996年に発行されている。NASの研究グループによると、軽水炉の使用済み燃料6万2000トン（2011年までに米国でたまと同グループが推定した大体の量）⁵¹⁴を再処理し、その中に含まれる超ウラン元素の99.5%を何基ものナトリウム冷却炉で核分裂させるには、150～200年かかり、その費用は5000億ドルに達するという⁵¹⁵。核変換施設運転がもたらす核拡散という「追加的リスク」を強調する報告書の結論は次のようなものだった⁵¹⁶：

「被曝線量の減少はどれをとってみても、核変換の費用と追加的運転リスクを正当化するような大きさのものではない」

フランスの「原子力安全局（ASN）」と「放射線防護・安全研究所（IRSN）」も、同じような結論に達し、「仏原子力庁（CEA）」が核変換用としてナトリウム冷却炉を提唱していること

を批判している⁵¹⁷。同ような批判は、日本の放射性廃棄物処分問題に関するトップレベルのアドバイザー（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）もしている⁵¹⁸。

被曝線量の減少か、増大か？

再処理及び核変換をすると再処理工場における放射性ガスの日常的な放出と、高レベル廃液の処理・貯蔵過程での事故による放射性物質の放出などの結果、被曝線量の純増がもたらされるというのは十分にありうる。

再処理による放射性ガスの放出

現在行われている再処理では、捕獲の難しい長寿命の放射性ガスが使用済み燃料から放出されるままになっている（最も重要なのは二酸化炭素の形で放出される半減期5700年の炭素14）。これらの気体は、現在及び将来の世代が環境から受ける被曝線量を増大させる。「原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）」は、2000年に、1998年までに行われた民生用再処理による向こう1万年の世界的な集団線量預託を20万人・シーベルトと推定している⁵¹⁹。これは約2万人のガン死をもたらす⁵²⁰。この影響は、処分場からの漏れによる地域的な影響とは違い、世界的なものである。

高レベル廃液が関わる爆発

また、再処理工場から壊滅的な形で環境中に放射能が放出される可能性がある（12章参照）。再処理工場での爆発により、大気中に放射性廃液が飛散する事故が何度か起きている。最も壊滅的なのは1957年に旧ソ連で起きたものである。この事故では、高レベル廃液の貯蔵タンクの冷却システムが故障して廃液が沸騰し、残留物が爆発した。風下地帯の汚染のため、1000平方キロメートルの地域の長期的避難が必要となった⁵²¹。これは、福島第一原子力発電所の事故のために数年間の避難が必要となった地域とほぼ同じ面積である⁵²²。この他、もっと小規模の事故が、ピューレックス（PUREX）法と呼ばれる方式で使われる有機化合物のために何度か起きている。ピューレックス法は、高レベル廃棄物からプルトニウムとウランを分離するために使われる標準的な再処理技術である。これら有機化合物が放射性廃液の高い放射線レベルのために劣化すると、使用済み燃料を溶かすのに使われる硝酸と反応して「レッド・オイル」を発生させる。この物質は、摂氏135度以上に熱せられると爆発する可能性がある⁵²³。

職業被曝

再処理工場やプルトニウム燃料製造工場の労働者らは、使用済み燃料が処分場に直接処分された場合には生じないはずの被曝をする。ただし、再処理と高速中性子炉がウラン採掘及び粗製錬の必要を大幅に減らすことができれば、これらの活動に従事する労働者の被曝線量が減り、再処理による追加的被曝が相殺されることになる⁵²⁴。

しかし、総合的に見て、再処理による被曝線量低減の利点というのは実はマイナスとなる可能性が高い。

プルトニウム「鉱山」

核変換の利点として挙げられる最後のものは、使用済み燃料の処分場が核兵器製造に関心を持つ国家や集団にとって「プルトニウム鉱山」となる危険性の除去である。とりわけ、数世紀経って使用済み燃料の中でプルトニウムと混ざっている短寿命の核分裂生成物のガンマ放射能が

弱まってしまった場合にこの危険性が生じる。だが、これは、将来の社会が核兵器を入手しようとする可能性のある他の方法と比較して考えなければならない⁵²⁵。

さらに、国家が——場合によっては国家以外の集団が——核兵器オプションを簡単に入手する道を現時点で生起させるプルトニウム分離とリサイクルを提唱ながら、同時に、500メートルあるいはそれ以上の深さに埋設したプルトニウムが安全保障上のリスクだと主張するのは辻褄が合わない。

しかし、それにもかかわらず、巨大な力を持つ米国「原子力委員会（AEC）」の委員長を1960年代に務めたグレン・シーボルトは、委員長時代に世界的な「プルトニウム経済」を提唱しておきながら、後に、再処理技術の拡散は核兵器拡散をもたらすとの警告を発する人々の信頼性を落とそうとしてプルトニウム鉱山の議論を使った⁵²⁶：

「使用済み燃料の処分を提唱する人々は…必ずしも核不拡散を巡る議論において高所に立つというわけではない…燃やすこと、つまり照射によって他の物質に変えることだけが答えとなる」

結論

プルトニウム及びその他の超ウラン元素の化学的分離の費用と便益に関する上のような検討結果から言って、先に引用した米国「科学アカデミー（NSA）」の1996年報告書の次の結論に意義を唱えるのは難しい。「被曝線量の減少はどれをとってみても、核変換の費用と追加的運転リスクを正当化するような大きさのものではない」

再処理は、原子力発電を相当に割高にする。そのため、政府が電力会社に再処理を義務付けている少数の国以外では放棄されている。超ウラン元素同位体の多くを核分裂させるのに必要な高速中性子炉を展開することになれば、原子力発電の費用はさらに高くなる。一部の国々が電力会社によってこれらの原子炉を商業化させようと50年にわたって試みて来ているにもかかわらず、商業化された所がないのはこのためである。

使用済み燃料を再処理してプルトニウムを——場合によっては、マイナー超ウラン元素も——分離して高速中性子炉で照射できるようにしようすることが安全保障にとって持つ大きなコストの一つは、その国の政府に核兵器オプションを与えると同時に、テロリストによる核兵器物質入手に対する障壁を低くすることである。

天秤にかけて考えるべき利点の方について言うと、地下深くに埋設された使用済み燃料が地表の環境を放射能で汚染するリスクを下げるうえで核変換がもたらすと予測される利点は小さく、恐らくは、使用済み燃料再処理工場からの日常的及び事故による放射能の放出がもたらす影響の方が大きくなるだろう。

最後に指摘しておかなければならないのは、超ウラン元素からのリスクを100分の1にすると主張されている核変換の利点を現実なものにするには、再処理と高速中性子炉の運転を数百年から数千年続けることにコミットしなければならないという点である。これはいかなる現実的なエネルギー計画の対象期間も遙かに超えるものである。

第11章 経済性

再処理の経済性については、数多くの研究がなされている。全般的なもの特定の国に関するものの両方がある。これらの大半が、再処理によって分離したプルトニウムを新しい燃料にリサイクルするのは使用済みウラン燃料を廃棄物として扱うのより相当高くつくとの結論に達している。

それにもかかわらず、ここでまた経済性について検討するのはなぜか。

1. 二つの燃料サイクルのコストの間には大きな差はないとの結論を下している研究が少数ながらも。とりわけ、「経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA)」が最近発表した研究は影響力が大きく看過できない⁵²⁸。
2. 少数の国においてではあるが、高速中性子炉の開発について関心が今も存在する——これまで技術的にも経済的にも成功していないにもかかわらず。

再処理の経済性について分析するには、核燃料サイクルのバックエンドだけでなくフロントエンドも考慮する必要がある。バックエンドとは、原子炉の中で中性子により照射された燃料が炉から取り出された後の取り扱いに関する諸活動、つまり、使用済み燃料の管理に関わるものである。フロントエンドとは新しい燃料の製造に関連したプロセスである。このフロントエンドを含める必要があるのは、再処理によって回収されたプルトニウム及びウランの利用によって濃縮ウランの節約がある程度は可能となり、再処理のために生じる余分な費用が相殺されるからである。

プルトニウムを（場合によってはウランも）リサイクルすることは、しばしば、燃料サイクルを「閉じる」ことになる」と説明される。一方、使用済み燃料を廃棄物として処分することは、「オープンな」燃料サイクルを意味するとされる。しかし、このような用語の使い方は誤解を招くものである。現在やっているように使用済み燃料の再処理によって回収されたプルトニウムを軽水炉で再利用するのは、再処理をしない「ワンス・スルー」（1回限り使用）燃料サイクルに対し、「トゥワイス・スルー」（2回限り使用）燃料サイクルとでも呼んだ方がいい。なぜなら、プルトニウムを複数回リサイクルするという計画は現実的には世界の何処にもないからである。実際には、使用済みのウラン・プルトニウム「混合酸化物 (MOX)」燃料は、例外なく貯蔵されている⁵²⁹。現在の計画は、使用済み MOX 燃料はそのまま処分場に「直接処分」するか、将来高速炉が相当数建設されるようなことになった場合に備えて高速炉用として非常に長期にわたって貯蔵しておくというものである。また、今日再処理によって回収されたウランはほとんど例外なく貯蔵されている。つまり、プルトニウム（使用済み燃料の質量の約1%を占める）だけが一部の国で、特にフランスで、リサイクルされているということである。他の国々では、特に英国では、再処理の製品は分離済みプルトニウムも含め、すべて貯蔵されている。

使用済み MOX 燃料の貯蔵は長期にわたって必要となるだろう。なぜなら、高速中性子炉は、提唱者らによってでさえ、今世紀後半まで商業化に成功することはないと見られているからである⁵³⁰。高速中性子炉を使ったシステムが完全に機能するようになり、リサイクルの繰り返しという夢が実現したとしても、核分裂生成物はやはり処分を必要とする。従って、いわゆる「閉じた」燃料サイクルは完全に閉じられてはいないのである。言い換えると、燃料チェーンの中のさまざまなステップで生み出される放射性廃棄物はやはり、深地層処分を必要とするのである。

再処理の経済性に関するほとんどの研究は、ワンス・スルーとトゥワイス・スルーという現在あ

る二つの選択肢だけを扱っているが、中には、高速中性子炉を基礎としたサイクルも扱っているものがある⁵³¹。不確実性が非常に大きいため、高速中性子炉燃料サイクルの経済的分析の有用性は限定的なものである。しかし、高速中性子炉サイクルを比較対象に含んだ最も新しい二つの研究はどちらも、このサイクルの全体的コストは他の二つのサイクルと比べ相当に高くなるだろうとの結論を下している。これは主として、高速中性子炉の資本コストは軽水炉と比べ、期待される「学習曲線」を考慮しても、相当に高くなるという広く受け入れられている見方のためである⁵³²。

経済性以外の要素

各国政府は、歴史的に、原子力関連政策を「戦略的」問題として扱ってきており、その決定は一般に高い政治的レベルでなされてきた。これは、核燃料サイクルに関して戦略的見地から考慮すべき3つの要素があるからである。

1. 使用済み燃料の再処理は核兵器に利用できる分離済みプルトニウムの入手を可能にするが、使用済み燃料を貯蔵しているだけなら、その国は核兵器オプションからずっと離れたところに留まる。
2. 原子力関係者の多くがウランの利用効率の高い高速中性子炉を民生用原子力技術の必然的到達点とみなしてきており、このため、この長期的な夢の達成に向かう上で必要とみなされている再処理のために熾烈なロビー活動を展開してきた。
3. 再処理は、新しいウランの必要を減らすことにより、エネルギーの輸入に頼る国のエネルギー安全保障を高めることになるとの考えが存在する。

このため、各国政府は、再処理によって多面的な目的を達成するため、相当の経済的プレミアム（割増金）を支払う用意があるかもしれない。しかし、政府もその国民も、このような目的を達成するために払わなければならないかもしれないプレミアムの大きさには関心がある。さらに、いくつかの国々はこの20年ほど、原子力関連の意志決定を市場ベースの枠組みで行う方向に向かっている。これは、主として、電力業界が、自由化の進んだ——場合によっては民営化された——競争的な方向に向かっている結果である⁵³⁴。このため、電力会社はさまざまなオプション間の相対的なコストに関して以前より敏感になってきている。

従って、以前は国家レベルで行っていた核燃料サイクルに関する選択を電力会社に任せるようになってきている国がある。これまでのところ、この動きがもっとも進んでいるのは英国である。英国政府は、ワンス・スルーとトゥワイス・スルーの燃料サイクルについてどちらでもかまわないとしており、電力会社が自分たちで決めるべき問題だとみなすと明確に表明している⁵³⁵。このような競争の圧力が強まり、燃料サイクル関連決定において経済的要素の直接的重要性が高まる傾向は、EU（欧州連合）の他の国々でも見られる。ヨーロッパ全体における自由化に向けた動きのためである。それは、さらに米国の広範な部分においても見られる。規制撤廃のためである。

コスト

燃料サイクル経済に関する分析のほとんどは、市場ベースのコスト・データが存在する場合にはそれらを、市場がなかったり、他の実質的な経験がなかったりする場合（地層処分場の場合など）には、産業側のコスト推定値を使っている。本稿の方針はできるだけ実際のリソースの使用を反映したコスト数値を使うというものである。つまり、外部コストも含めた社会に課せ

られるコストである。燃料サイクルにおいては相当の「市場支配力」^{訳注}が存在するから、市場価格は社会コストを反映していないかもしれない。

核燃料サイクルのフロントエンドに関して言うと、ウラン市場はさまざまな企業や国が供給側にあってかなり競争的である⁵³⁶。バックエンドでは、フランスだけが国際的な形で再処理及び MOX 燃料製造サービスを提供しており⁵³⁷、その国内顧客（仏電力公社（EDF））に対して国外の顧客に対するのとは異なる価格を請求することができる。

実際には、燃料サイクル・サービスの場合、「市場支配力」と外部コストに関して、理にかなった調整を市場価格に加えるのは難しい。従って、本稿で関心があるのは、一般的に言って、市場ベースの価格である。ここで関係のあるコストにはすべての資本コストが含まれる。施設のコスト支払いが完全に終わった後に提供される限界費用・運転コスト関連の契約は、新しい施設を建設するか否かの決定には関係がない。

コストに関連したもう一つの問題は、将来の支出・収入について「割引率」を使って調整するというものである。この方法では、将来のコストは、それが発生すると予測される時期が遠い将来であればあるほど低く評価される。経済学者らは、毎年割り引く率をどうするかについて何十年も議論してきた（割引をまったくしないことを支持する経済学者はほとんどいない）。近年、気候変動によるもののような遠い将来になる可能性のあるコストに関しては低い割引率（年1～2%程度）が良いとする主張が支配的になってきている⁵³⁸。本章のケースでは、割引率の差が影響するような長期的コストは、廃棄物処分場に関するものだけであり、後に論じるように、これらのコストはワンス・スルーとトゥワイス・スルーで大きくは変わらない。従って、ここでは、割引の問題は無視することとする。二つのサイクルのコストを検討する上で重要な役割を果たさないからである。

ワンス・スルーとトゥワイス・スルーの燃料サイクル・コスト比較

これからの議論は主として、NEA が2013年に発表した燃料サイクルに関する研究⁵³⁹に焦点を合わせるが、まず、過去20年間にわたって行われてきた他のいくつかの研究について簡単に概観しておくことが重要である。ほとんどすべてが、かなり透明性のある方法論を使っており、ワンス・スルーの燃料サイクルの方がトゥワイス・スルーより安いとの結論に達している。2013年の NEA の研究は、これらの研究のいくつかをリストアップしている⁵⁴⁰。また、使われている想定の一つについて説明し、その全体的結果を提示している。これらは、トゥワイス・スルー・サイクルの「コスト・プレミアム（割増度）」として示されている。表11.1が、これらのプレミアムを示している。比較のために2013年の NEA 研究も入れてある。

研究	MIT (2011)	Harvard (2003)	Rothwell (2011)	NEA (1994)	NEA (2006)	NEA541 (2013)
ワンス・スルー・コスト (US\$/MWh)	8.2	6.5	7.5	9.4	5.6	6.7
トゥワイス・スルー・コスト	10.3–11.3	8.1	12.4	10.4	6.4	7.3
トゥワイス・スルー・プレミアム	26–37%	25%	65%	11%	14%	20%

表 11.1 いくつかの研究におけるワンス・スルーとトゥワイス・スルーの燃料サイクル・コスト

出典： *The economics of the back end of the fuel cycle*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2013, Table 3.10, p. 107.

^{訳注} 実質的な競争者のいない状態。

これらの研究は、細かな方法論や想定、研究が実施された時期などには関わらず、一貫して、トゥワイス・スルー・サイクルの方が割高であることを示している。そして、英国における将来の原子炉に関する現在の計画のように二つのサイクルが明確な「市場テスト」の対象となった場合、可能性のある電力システム開発業者（仏電力公社、GE 日立、ウエスティングハウス）はすべて、ワンス・スルー・サイクルの方を割安のオプションとみなしている⁵⁴²。これは、英国が THORP 再処理工場（酸化燃料再処理工場）を閉鎖するとの決定を2012年にした際に重要な要因となったものである。

ロスウェルらによる最近の研究（2014年）は、表11.1にある2011年のロスウェル研究と同じような想定を使って、極めて似かよった結論に至っている⁵⁴³。この2014年の研究は、二つの燃料サイクルのコスト差を別の形で示している。それは、ウラン価格が年率0.5%で上昇し、再処理コストが年率2%で下がった場合、二つのサイクルの全体的燃料サイクル・コストが同じになるのに80年かかるというものである⁵⁴⁴。

再処理の経済性に関する他の研究も、二つのサイクルの相対的成本に関して同様の結論に達している。フランスと日本の両政府による研究はとりわけ興味深い。両政府はこれまで再処理に強くコミットしてきたし、現在もそうだからである。

- 日本の原子力委員会は、2005年に、使用済み燃料の管理に関する4つのシナリオを全燃料サイクル・コスト・ベースで評価した研究結果を発表した⁵⁴⁷。その基本的結果は、ワンス・スルー・サイクルが他のシナリオより25%～70%割安になることを示していた。これは主として、再処理コストの高さからきている⁵⁴⁸。
- 日本の原子力委員会は、2005年に、使用済み燃料の管理に関する4つのシナリオを全燃料サイクル・コスト・ベースで評価した研究結果を発表した⁵⁴⁷。その基本的結果は、ワンス・スルー・サイクルが他のシナリオより25%～70%割安になることを示していた。これは主として、再処理の高いコストのためである⁵⁴⁸。

日本原子力委員会は2011年にそのコスト研究をアップデートし、割引率を年0～5%とした場合、トゥワイス・スルーがワンス・スルーより60～100%高くなるとの結論を得た⁵⁴⁹。

中国とインドで最近行われた燃料サイクル・コストに関する研究も、限定的なデータを使ったものではあるが、やはり、どちらの国でもワンス・スルー・サイクルの方が安くなるということを示している。アレバ社が中国に売り込もうとしている年間800トンの処理量の再処理工場の価格が200億ユーロ（210億〔2016年〕米ドル）と報道されているが、これは、日本の六ヶ所再処理工場の価格に匹敵するものである⁵⁵⁰。インドの場合、独立した研究の著者らがトゥワイス・スルー・サイクルにとって都合の良い数々の想定を再処理コストについて当てはめたが、それでも、ワンス・スルーのほうが相当安くなるとの結論に達した⁵⁵¹。

上に挙げた例におけるワンス・スルー・サイクルの全般的な優位性は、燃料サイクル全体について示されたものだが、トゥワイス・スルーの第2ラウンドにおいてでさえ、原子炉に装荷される燃料のほとんどは低濃縮ウラン燃料であることに留意すべきである。MOX燃料と低濃縮ウラン燃料についてトン当たりのコストを直接比較すれば、コスト差は非常に大きく拡大する。上述のシャルパン報告は、MOX燃料がまったく使われないとすると、4300トンの低濃縮ウランが余計に必要になり、そのコストは330億フランに達することを示している。これに対し、再処理シナリオでは、4800トンのMOX燃料が、再処理コストも入れて1770億フランで製造される⁵⁵²。これらの数値を使って単位重量当たりのコストを計算すると、低濃縮ウランが7700フラン/kg、MOX燃料が3万6900フラン/kgとなる。この直接的比較においては、MOX燃料のコストは低濃縮ウランの5倍近くとなる。日本の原子力委員会による同様の比較では、このコスト比は12.3倍となっている。六ヶ所の再処理工場とMOX工場によるMOX燃料製造に関するものである⁵⁵³。

二つの燃料サイクルの経済性がほぼ等しいとしている研究が一つだけある⁵⁵⁴。この研究は、ボストン・コンサルティング・グループ（BCG）がアレバ社のために実施したものである。アレバ社は、G・W・ブッシュ（息子）政権に対し、再処理・MOX 統合プラントを購入するよう説得しようとしてこの研究結果を使った。BCG が使ったウラン、濃縮、地層処分のコストは、表 11.1 にある研究で使われたものの範囲内に入っている。しかし、再処理と MOX 燃料製造のコストはアレバ社が提供したもので、他のどの研究にあるものよりもずっと低いものだった。下の表 11.2 は、BCG 研究と表 11.1 にある研究で想定された使用済み燃料 1kg 当たりの再処理コストと MOX 燃料 1kg 当たりの製造コストを示している。

研究	MIT (2011)	Harvard (2003)	Rothwell (2011)	NEA (1994)	NEA (2006)	BCG (2006)	NEA (2013)
使用済み低濃縮ウラン再処理	\$4,179	\$1,179	\$2,446	\$1,001	\$1,075	\$677	\$579-737
MOX 燃料の製造	\$2,508	\$1,769	\$2,643	\$1,362	\$1,344		

表 11.2 再処理及び MOX 燃料製造コスト

すべての数値は、重金属 1kg 当たりのコストを 2010 年米ドルで表したものだ。BCG 及び NEA (2013) 報告で使われたコストは、再処理・MOX 燃料製造統合プラントを想定。出典： *The economics of the back end of the fuel cycle*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2013, Table 3.9.

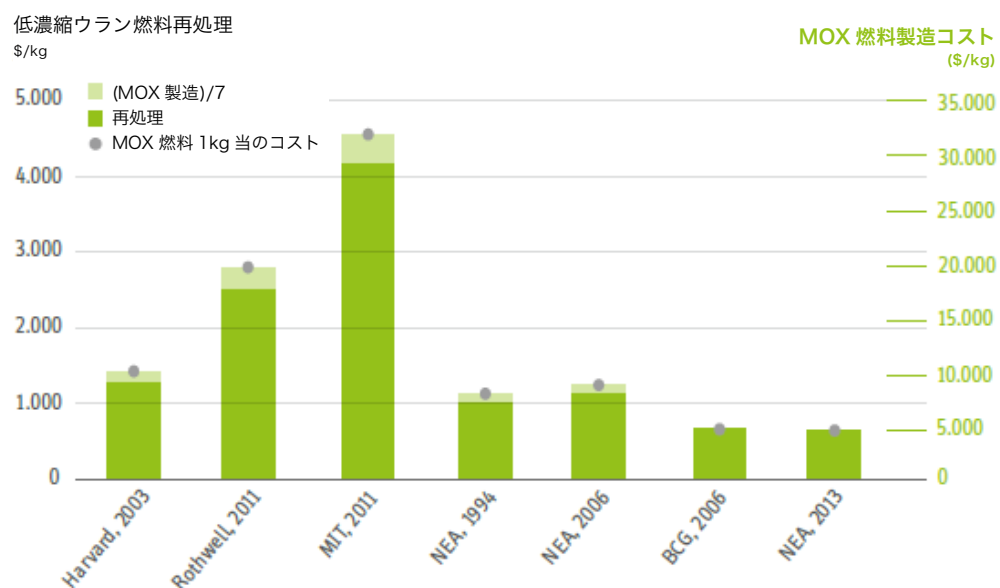


図 11.1 使用済み低濃縮ウラン燃料の再処理コスト（再処理と MOX 燃料製造コストを含む）

アレバ社のためにボストン・コンサルティング・グループ（BCG）が行った研究および同 BCG 研究の推定に基づく NEA (2013) 報告以外では、すべて、MOX 燃料 1kg 当たりの製造コストは 7 で割っている。これは、1 トンの MOX 燃料を作るのに必要なプルトニウムを生産するには約 7 トンの使用済み低濃縮ウランを再処理しなければならないことを反映したものである。BCG 研究及び NEA (2013) 報告の場合、再処理工場と MOX 燃料製造工場は統合されると想定されており、一つの数値しか与えられていない。

表 11.2 は、NEA 報告の表 3.9 及び同アペンディックス 6 にある表 A6.2 からとったものだが、BCG で想定されている「統合」プラントのコストと他の研究で示されているコストとを同等の条件の下で比較するために使う数値を提供しているはずの計算において他の研究における MOX 燃料製造コストがなぜそのまま再処理コストに加算されることになっているのか不明で

ある。1 トンの MOX 燃料を製造するのに必要なプルトニウムを分離するには約 7 トンの使用済み低濃縮燃料を再処理しなければならないことを考えれば、BCG 研究の方の総合値 677 ドルと直接的比較をするには、他の研究の MOX 燃料製造コストを 7 で割ってから再処理コストに足すべきである。この 7 で割ってから足すという方式でいくと、BCG で想定されている再処理・MOX 製造コストは、他の研究で使われているコストの 15～57%になる（図 11.1 参照）^{*}

^{*}訳注。

従って、BCG 研究の全体的な結論——トゥワイス・スルー燃料サイクルのコストがワンス・スルー燃料サイクルのコストと同等だというもの——は、ほとんどが、これまで建設されたことのない「統合」プラントに関して商業的当事者が提示した想定によって得られたものである。ここでこの点を詳細に論じるのは、2013 年の NEA 研究も、再処理と MOX 燃料製造の統合プラントを想定し、BCG/アレバの数字を使ってトゥワイス・スルー・サイクルのコストはワンス・スルー・サイクルの不確実性の範囲内だと論じているからである。

2013 年の NEA 研究

NEA 研究は、加盟国の提供したデータに基づいている。これは、包括的な研究で、大体は、文書に裏付けられており、さまざまな燃料サイクルの間のコストの違いをシステマティックに示すことを目指している⁵⁵⁶。研究は、これらの違いを、バックエンド・コストだけを検討した場合と全体的な燃料サイクル・コストを検討した場合の両方について示している。NEA は、想定されるコストについて幅広いインプットを含んでいるだけでなく、さまざまなシナリオについてモデル計算をしていて、いろいろな変数を組み入れている。

- 割引率年 0%～3%
- さまざまな規模の原子力システム：25TWh、75TWh、400TWh（基準ケース）、800TWh——それぞれ、大体、4、10、60、110GWe の原子力システム容量に相当する（想定設備利用率 80%）。2013 年に 404TWh の原子力発電をし、再処理工場と MOX 燃料製造工場の両方を持っている唯一の国であるフランスが基準ケースのようである。米国、そして、将来の中国、あるいはバックエンド施設を共用するいくつかの国が 800TWh のケースに相当するかもしれない^{**訳注}。
- 三つのコスト・レベル。低、高、基準。低及び高は、加盟国が提供した極端な数値からきている⁵⁵⁷。

二つの割引率と 4 つのシステム規模、それに 3 つのコスト・レベルを組み合わせると 24 の異なるコスト結果が得られる。それに、感度テストも入れられている。例えば、ウラン価格や再処理コストなどの値が異なる場合を反映させるためである。

NEA は「理想化された」燃料サイクルに関する計算結果を出すことに焦点を合わせている。サイクルの一つのステージから次のステージに動く際に過度の遅れのない均衡状態を想定しているということである⁵⁵⁸。この「理想」状態に近い国はフランスだけである。他の国々（インド、日本、ロシア、それに英国）は、いずれはプルトニウムがリサイクルされるだろうとの期待の

^{*}訳注 上の計算で得られた値に 7 を掛けると、再処理費用も含めた「MOX 燃料製造総合コスト」/kg が得られる。図の右側の目盛りがそれである。あるいは、BCG で想定されている再処理・MOX 燃料製造統合プラントでは、例えば 100 トンの使用済み燃料を再処理するコストと、その再処理で得られた 1 トンほどのプルトニウムを MOX 燃料に製造するコストとを合わせたものが 100 トンの使用済み燃料の処理の総合コストとなり、それを kg 当たりで示したものが 677 ドルという数字である。

^{**}訳注 TWh＝テラワット時＝10 億 kW 時。GWe＝発電容量 1 ギガワット＝発電容量 100 万キロワット。

下に何十年も再処理を続けている。インドとロシアは増殖炉におけるリサイクリングに焦点を当てていて、軽水炉におけるMOX利用には取り組んでいない。NEA報告の対象は後者である。NEAの再処理及びMOX燃料製造に関する想定も、まったく別の意味で「理想化」されている。存在していない技術と歴史的経験よりずっと低い下限コストを想定しているという意味である。

NEAの結果

NEA研究のヘッドライン的結論は、ほとんどの条件の下では、ワンス・スルー・サイクルはすべてのシナリオにおいてトゥワイス・スルー・サイクルと比べ経済的に平均20%有利であるというものである⁵⁵⁹。しかし二つの注釈が加えられている。

1. 全体的燃料サイクル・ベースで示された24のケースのうち、三つ（すべて800TWh/年のケース）はトゥワイス・スルーの方が安いことを示している⁵⁶⁰。
2. NEAは、その基準ケース（実質的にはフランス）におけるすべての推定値の不確実性の幅（エラー・バー）は、ワンス・スルーとトゥワイス・スルーのサイクルの間の推定コスト差よりもずっと大きいと主張している⁵⁶¹。だが「エラー・バー」（グラフで誤差範囲を示す棒）は、単に、加盟国が提供した高いコスト推定値と低いコスト推定値を反映したものである。低いコスト推定を提供したのはフランスである。つまり、ボストン・コンサルティング・グループの研究のためにアレバ社が提供した統合プラントに関する数字である。これは、表11.2に示されているもので、先に見たとおりである。このことは、「エラー・バー」は、現実の世界のいかなる経験にも基づいていないことを意味している。しかし、それにもかかわらず、NEA報告が明確に送ろうとしているメッセージは、いかなる現実世界の状況においてもワンス・スルー・サイクルの方がトゥワイス・スルー・サイクルよりも安くなると断定的に論じることは不可能であり、「基準コスト・シナリオで検討された三つのオプションにおける全体的燃料サイクルのコスト差は不確実性の範囲内である⁵⁶²」ということである。

このようにして、NEA研究は、基準ケースや他のケースのほとんどにおいてワンス・スルー・サイクルはトゥワイス・スルーと比べ幾分、場合によっては相当安くなると見られるということを示しながら⁵⁶³、この結果に但し書きを付け加え次のように論じている。

1. 原子力発電システム容量が非常に大きい（800TWh/年）場合には、ワンス・スルー・サイクルがコスト面で常に有利だとは必ずしも言えない。
2. ワンス・スルー燃料サイクルの優位性が存在するように見える場合は、そのような結果は確実なものではない。なぜなら、コスト推定における「エラー・バー」が二つのサイクルのコスト差よりもずっと大きいからである。

このことからNEA研究は、二つのサイクルの間で選択をする国々は、経済性以外の理由で選択すべきだと言う。なぜなら、「リサイクリング・オプションでは、再処理によって生じる追加的成本はフロントエンドにおける燃料コストの節約によって相殺されているからだ」というわけである⁵⁶⁴。

NEAの結論が、他の研究のものと違っている理由を理解するために、ここで、以下のようなコストを検討してみよう。

- 二つのサイクルの間で異なっているコスト
- 全体的結果に重要な差をもたらすコスト

ワンス・スルー・サイクルとトゥワイス・スルー・サイクルの類似点と相違点について考える単純な方法は、現在利用可能な技術を使って、2ラウンドの燃料使用を想像してみることである。第1ラウンドでは、両サイクルはまったく同じフロントエンドを伴う。ウランを購入し、濃縮し、燃料を製造する。しかし、第1ラウンドのバックエンドでは、ワンス・スルーの使用済み燃料は最終処分のために貯蔵される。ここでは最終処分は、すべての場合、深地層処分となると想定する。トゥワイス・スルー・サイクルのバックエンドでは、使用済み燃料は貯蔵され、その後、再処理される。この結果、ウランとプルトニウムが分離され、高レベル放射性廃棄物が発生する。この廃棄物は「ガラス固化」され、最終的には地層処分場に送られる。この他、再処理の結果さまざまな中レベル及び低レベル破棄物が発生し、その一部は同じく地層処分場に送られる。

ワンス・スルー・サイクルの第2ラウンドは、第1ラウンドとほとんど同じである。トゥワイス・スルー・サイクルの方の第2ラウンドでは、ほとんどの燃料が低濃縮ウランだが、8分の1が別の種類の燃料となる。この燃料（MOX 燃料）は低濃縮ウランとは異なる燃料工場で作られる。MOX 燃料には、再処理で得られたプルトニウムがウラン濃縮の過程で発生した劣化ウランに6～8%の濃度で混ぜられる。この燃料自体の製造にはウラン濃縮は必要でない⁵⁶⁵。この第2ラウンドのバックエンドでは、トゥワイス・スルー・サイクルの場合、使用済み MOX 燃料は貯蔵されて地層処分場での処分を待つ⁵⁶⁶。

ここで問うべきは、第1に、では二つのサイクルのコスト差はどうなるか、第2に、その差は両者の全体的コストに重要な差をもたらすほど大きなものか、というものである。

両サイクル間のコスト差及び全体的なコストにおける重要性に関する基準を満たすコスト項目としては次の4つが挙げられる。

- 最終処分コスト。このコストは大きなものとなる可能性があり、トゥワイス・スルー・サイクルの方が相当割安になると主張されることがあるからである。
- ウラン・コスト。トゥワイス・スルー・サイクルではワンス・スルーよりウランの使用量が小さい。
- トゥワイス・スルー・サイクルにおける再処理
- トゥワイス・スルー・サイクルにおける MOX 燃料製造コスト⁵⁶⁷

以下、これらの4つの項目に関する NEA の想定 of 妥当性について論じ、それが全体的コスト比較に与える影響について評価する。

廃棄物処分コスト

NEA は、使用済み MOX 燃料を無期限に貯蔵するのではなく、処分する必要があると想定している。従って、比較対象は次の二つである。

- ワンス・スルー・サイクル：2 回のラウンドの使用済み低濃縮ウラン燃料処分。
- トゥワイス・スルー・サイクル：第 1 ラウンドの低濃縮ウラン燃料の再処理廃棄物の処分と、第 2 ラウンドの使用済み低濃縮ウラン燃料処分及び使用済み MOX 燃料処分。

NEA の分析では、処分が全体的燃料サイクルに占める割合は両方の燃料サイクルとも小さく、大体同じである。例えば、どちらのサイクルでも、処分コストが全体的燃料コストの 18%を超えるのは、25TWh の規模で割引率ゼロの場合（24 のケースの内、3 つ）においてだけである。二つのサイクルの間の処分コストの差が 10%を超えることは、どのケースにおいても無い⁵⁶⁸。

これら二つの点——廃棄物処分コストは全体的燃料サイクル・コストにおいて小さな要素であり、二つのサイクルで非常に似かよっていること——は、処分が、NEA 自身の分析において、トゥワイス・スルー・サイクルにコスト面での重要な優位性を与えないということを意味する。これは、一見、驚くべきことである——なにしろ、トゥワイス・スルー・サイクルで処分すべき高レベル廃棄物の量はワンス・スルーの場合の 5 分の 1 だと NEA は主張しているのであるから⁵⁶⁹。しかし：

- 高レベル廃棄物だけでなく、長寿命の中レベル廃棄物の一部も地層処分場に入れなければならない。NEA によると、これにより量の低減効果が半分になってしまうという⁵⁷⁰。アレバ社の廃棄物データに関するある独立の分析によると、量の低減効果はまったくなくなってしまうという⁵⁷¹。
- 燃料サイクルの第 2 ラウンドでは、トゥワイス・スルー・サイクルの場合、使用済み MOX 燃料を処分する必要がある。使用済み MOX 燃料は、使用済み低濃縮ウラン燃料より相当熱くなり——NEA によると——使用済み低濃縮ウラン燃料と比べ、トン当たりで必要な地下の容積が 2.5 倍になる⁵⁷²。
- どんな地層処分場でも、そのコストのうち、固定コストの割合が高い。例えば、地下数百メートルの深さまでのトンネルあるいは堅坑の建設は、地層処分場の廃棄物収容部分の容積に関係なく、同様のものとなる。

従って、廃棄物処分コストは、トゥワイス・スルー・サイクルにとってコスト面の優位性をもたらし得る重要な要素とはならない。

ウラン・コスト

トゥワイス・スルー燃料サイクルを正当化する元々の議論は、将来ウランが希少で高価なものになるということだった。となると、プルトニウム増殖炉への移行期の燃料としてプルトニウムを使うことによりウランの使用を節約できれば、「クローズド・サイクル」はオープン・サイクルと比べ長期的優位性を持つことになる。だが、現在のトゥワイス・スルー・サイクルでは、再処理で回収されるすべてのウランがリサイクルされたとしても最大 22～25% のウラン使用の節約にしかない。もしプルトニウムだけがリサイクルされるとすると 12% の節約にしかない⁵⁷³。

トゥワイス・スルー・サイクルはワンス・スルー・サイクルよりもウランの使用量が少ないから、トゥワイス・スルーの方が全体として安くつくウラン価格のレベルというのが存在する。従って、ウラン価格の見通しが大きな問題となる。NEA は、将来のウラン価格を一定と想定し、それを 2010 年の物価で 130 ドル/kgU としている。表 11.1 にあるどの研究で使われているのよりも高い数値である。NEA はまた、1980 年～2011 年のウラン価格データを 2010 年恒常ドルで提供している（図 1.2 参照）。このデータは、ウラン価格の相当の変動を示しているが、長期的な上昇トレンドは見られない。NEA の 31 年間の価格データの平均は、約 110 ドル/kgU（2010 年の物価）である⁵⁷⁴。価格が 130 ドル/kgU を超えたのは 31 年のうち 5 年だけである。だが、130 ドル/kgU という想定は、妥当な出発点と思われる。ただし、価格の変動の影響をチェックする十分な感度テストが行われたとしてである。

NEA は、ウラン価格の上下移動が二つのサイクルのコストに与える影響について、簡単だが役に立つ感度分析を提供している。このような感度テストの結果を提示する伝統的な——そして役に立つ——方法は、ウランの「ブレイクイーブン（均衡）」価格を見いだすことである。これは、ワンス・スルー・サイクルとトゥワイス・スルー・サイクルのコストが等しくなって釣り合うウラン価格である。NEA はこのような「均衡」価格を提供していないが、その「基準」ケ

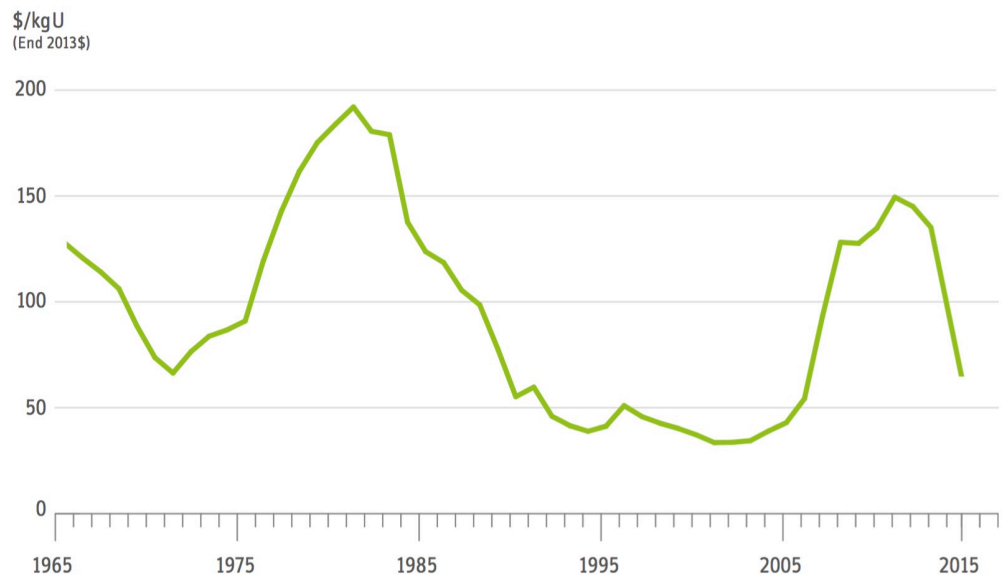


図 1.2 米国の原子力発電会社が 1965～2013 年に支払った平均ウラン価格

2014 年のポイントは、スポット市場価格——市場の方向を示す——である。ここでも本報告書の他の場所でも、古い価格は 2013 年ドルに換算している。米国国内総生産（GDP）データのために使われるインフレーターを使用。ドル以外の通貨に関しては、まずドルに換算してから GDP インフレーター指数を使って現在のドル価格に換算。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. Source for GDP deflator index: research.stlouisfed.org/fred2/series/GDPDEF

ース——システムの規模400TWh/年——の割引率0%と3%に関する感度テストの結果の「内挿」によって、大まかな「均衡」価格を算出することができる。

NEA は、ウラン価格の50%の上昇はワンス・スルーとトゥワイス・スルーの全燃料サイクル・コストをそれぞれ33%と27%上昇させるとの結果を得た。この直線の関係に基づく、割引率ゼロ・パーセントの場合、ワンス・スルー燃料サイクルのコストがトゥワイス・スルー燃料サイクルのコストの高さになるには、ウラン価格が5倍の650ドル/kgU にならなければならない。割引率3%の場合には、ウラン価格は数千ドル/kgU まで上がらなければならない。

現在、重要な分析の中で、ウラン価格が予見できる将来に劇的に高騰すると言っているものはない。しかし、ウラン価格の将来の可能性について簡単に検討しておくのは価値のあることだろう——とりわけ、高速炉がワンス・スルー・サイクルよりも経済的になる経済的になる「均衡」ウラン価格は170ドル/kgU という低いレベルである可能性がある」と NEA が主張していることを考えれば⁵⁷⁵。

ウラン価格の長期的トレンドは、他の商品の価格の場合と同じく、長期的な需要と供給の兼ね合いで決まる。NEA と「国際原子力機関（IAEA）」は、ウラン資源に関する各国の不完全な推定報告に基づき次のような結論を下している⁵⁷⁶。

「発電用原子炉における現在のウラン消費率を使うと、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。」

最近の包括的な研究も同様につきのような結論に至っている。2100 年までに 2000GWe の原子力発電（現在のレベルの 5 倍）が達成されるとの「国際エネルギー機関（IEA）」のシナリオの一つも含め、「原子力発電の予見できる将来を賄うに足る既知資源が十分にあると言っていいだろう」^{577/訳注}。少なくとも 1970 年代以降、地質学者らは一貫してウランについて予見できる資源上の制約はないと論じ続けている⁵⁷⁸。

ウランの需要は、主として、原子力発電容量のレベルに依存する。2006～2011年の時期に起きた価格の高騰は、主として、「原子力カルネッサンス」の誇張と期待の結果生じたものである。IAEA は、2050年の原子力発電容量の予測を毎年行っている。これらの予測は、下降を続けている。2014年には、IAEA は413GWe～1092GWe と予測した。これは2014年の現状と比較して10～190%の伸び意味する⁵⁷⁹。世界の原子力発電は2006年にピークに達し、それ以来下降している。とりわけ、フクシマ事故の後はそのようである⁵⁸⁰。世界の原子力発電容量は、中国、ロシア、そしていくつかの開発途上国において新しい原子炉が運転開始するに従い、向こう数十年間でまた上昇するかもしれないが、これは確実ではない。退役する原子炉も多くあるからである。

過去20年間、新しい原子力発電容量は、平均して毎年3GWe の割合で追加されてきた。しかし、米国、西ヨーロッパ、日本、カナダの原子炉群——合計すると世界の原子力発電容量の72%を占める——は、老朽化しつつある。世界の原子力発電容量の72%は25年以上運転されたものである。一方、これまで45年以上運転されたものは1基もない（図11.2）。将来、原子炉が平均して45年を終えたところで退役するとした場合、向こう20年間、平均して毎年13GWe が退役することになる。

世界の原子力発電の炉齢累積発電容量の比率

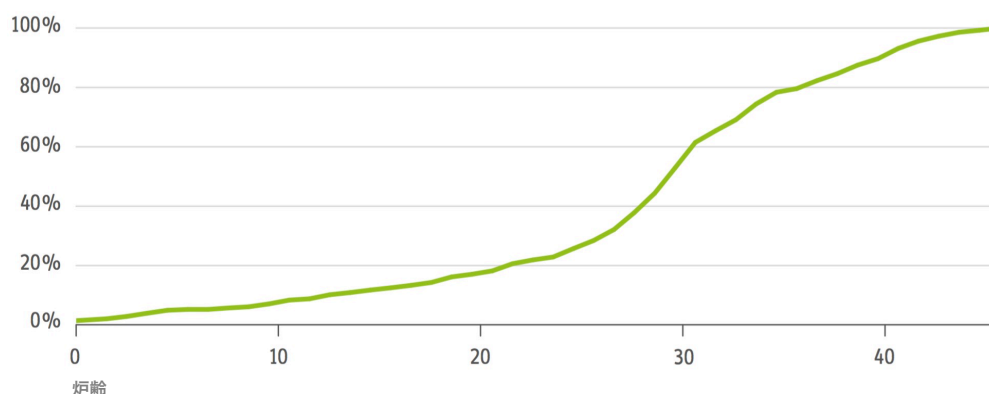


図 11.2 2014 年末現在の世界の原子力発電容量の年齢分布

2014 年末現在の世界の原子力発電容量は 375GWe だった。

出典：Data from Power Reactor Information System (PRIS) Database, International Atomic Energy Agency, 12 April 2015, www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx

再処理及び MOX 燃料製造のコスト

NEA による再処理及び MOX 燃料製造コストの扱いは驚くべきものである。他のすべての燃料サイクル活動に関するデータは NEA の加盟国からきたもので、現在・過去の歴史的経験に基づくものであるが、再処理及び MOX 燃料製造コストのデータはすべて、単一の商業的当事

訳注 IGWe は電気出力 100 万 kW。2000GWe は電気出力 100 万 kW の原子炉 2000 基に相当。

者（アレバ社）から来たもので、将来のプラントに関する憶測の絡んだものである。将来のバックエンド施設では、再処理、再処理から生じる廃液の固化、そして、MOX 燃料製造が統合されるだろうと想定されている⁵⁸¹。そして、これらの活動はひとまとめにして、単一のコスト項目として扱われている。

高い方の推定値は、英仏海峡に面したラアーグの二つの再処理工場と仏南部にあるメロックス MOX 燃料製造工場に関してアレバ社から報告された歴史的コストに基づくものである。真ん中の「基準」推定値は、2006年のボストン・コンサルティング・グループ（BCG）の研究用にアレバ社が提供した見積もりに基づいていて、ラアーグとメロックスが建て直され、ガラス固化施設も含めて、統合された形になれば全体の資本コストが削減できると想定されたものである⁵⁸²。低い方のコスト推定値は、2006年の BCG 研究のためのもう一つのアレバ社の推定値に基づくもので、こちらは「相当の改善と規模の経済」を伴うケースとしてアレバ社が出したものである⁵⁸³。

ボストン・コンサルティング・グループは、その報告の中に明確な責任放棄声明を入れている。「BGC はアレバ社から提供された商業的秘密データを検討したがこれらの原資料に事実として含まれている事項に関する独自の検証は行っていない」⁵⁸⁴。

つまり、NEA 研究において使われた再処理及び MOX 燃料製造コストに関するすべてのデータは基本的に単一の商業的当事者から来た商業的秘密に属するものであり、従って、NEA チームあるいは他の誰も入手して検討することはできない。

アレバ社由来の NEA 報告（2013）の想定 of 妥当性について評価するに当たっては、次の二つが試金石となるだろう。

1. 図11.1に示されている独立の研究で想定された再処理及び MOX 燃料製造コスト
2. 現実の世界で経験された実際の再処理及び MOX 燃料製造コスト

図11.1から、NEA 報告（2013）は独立の研究——とりわけ「マサチューセッツ工科大学(MIT)」が2011年に行った研究——と矛盾することが明らかである。

現実世界の経験に関していうと、最新のものはアレバ社が設計した日本の六ヶ所再処理工場である。同じサイトではやはりアレバ社の設計に基づく MOX 燃料製造工場が建設中である⁵⁸⁵。この再処理工場の資本コストは2.19兆円（約2200億ドル）⁵⁸⁶である。割引率0～3%として、40年間、800トン/年の設計容量通り運転されたとすると、資本コストだけで、処理量当たり700～1200ドル/kgHM（重金属＝ウラン及びプルトニウム）となる。この期間の運転コストは、日本の原子力委員会（工場の擁護者）が11.7兆円（約120億ドル）と推定している。処理量当たりになると、3650ドル/kgHM である。つまり、資本コストと運転コストを合わせると、4350～4850ドル/kgHM となる⁵⁸⁷。2011年、日本の原子力委員会は、再処理工場に隣接して建てられる新しい MOX 燃料製造工場における燃料製造コストを再処理コストの15%と推定した⁵⁸⁸。この計算だと、再処理及び MOX 燃料製造の総合コストは5000～5600ドル/kgHM となる。

これらの工場は、ともに、大きな遅延に見舞われており、将来の工場のコストの可能性を代表するものではないかもしれない（もっとも、論争を呼ぶ巨大な原子力関連施設は標準的な工業プロジェクトとは異なる）。しかし、これらの最新のケースは、アレバ社や NEA が言うように将来の工場がラアーグやメロックスと比べずっと安くなると主張するのは妥当でないことを示している。

NEA のモデルは、統合された工場の再処理コストが50%上がると、トゥワイス・スルー・サイクルの全体的な燃料コストが15～18%上がることを示している（この幅は設定される割引率による）⁵⁸⁹。六ヶ所の二つの工場の中レベルの推定値は、2013年 NEA 研究の中レベルの数値

の8倍の高さである。影響の比率が50%の上昇のケースから直線的であると仮定すると、全体的な再処理及び MOX 燃料製造コストが700%増大すると、トゥワイス・スルー燃料サイクルの全体的なコストは200%以上増えることになる。

従って、ワンス・スルー燃料サイクルのトゥワイス・スルー燃料サイクルに対する経済的優位性はわずかで不確実なものとする NEA の結論が主として再処理及び MOX 燃料製造コストに関する不当に低い想定から来ていることは明白である。現実世界の経験に基づく数字が使われれば、ワンス・スルー・サイクルの方がトゥワイス・スルー・サイクルと比べ、否定しようのない相当の経済的優位性を持っていることが明らかになる。

結論

核燃料サイクルに関して電力会社や各国政府が現在直面している選択肢は、使用済み燃料を廃棄物として扱うか、あるいは、使用済み燃料を再処理し、分離されたプルトニウムを（場合によっては、まれではあるが、分離されたウランも）、使用済み燃料を発生させたのと同種の原子炉で使うかというものである。向こう数十年間は、既存の原子炉でプルトニウムを複数回リサイクルするという現実的な可能性はない。二つのサイクルに関する独立の諸研究がワンス・スルー・サイクルは、核拡散リスクに対する抵抗性が高いだけでなく、トゥワイス・スルーよりも割安だとの結論を下している。

NEA による最近の包括的な調査は大体が透明性のある方法論を使ったものだが、このコンセンサスに異を唱えている。この NEA の報告書は、ほとんどの状況においてワンス・スルー・サイクルの方が安い、その優位性は通常小さなものであり、この結果に付随する不確実性（「エラー・バー」）は二つのサイクルの平均的コスト差よりずっと大きいと主張している。

我々は、これらの結論の根拠について吟味し、その欠陥を見いだした。NEA 報告書は、二つの重要な問題を抱えている。

1. 報告書は、トゥワイス・スルー・サイクルにおける最終処分場のコスト（及び必要な容積）がワンス・スルー・サイクルの場合よりも小さいとの間違った主張をしている。ただし、この点について修正しても、その定量的結果に大きな影響はでない。
2. 報告書は、当事者である私企業（アレバ社）の独自の予測を使って、再処理及び MOX 燃料製造の将来のコストが、他の研究によって想定されたコスト、あるいは（もっと重要なことには）同社が設計した最近の日本の再処理及び MOX 燃料製造工場のものや中国での再処理工場建設に関する同社の提示額などの現実のコストよりも大幅に低くなるとの結論を下している。

再処理に関する主要な経済的アピールが、これまでずっと、希少度の増していく高価なウランの節約という考えに基盤を置くものであったことを考えると、トゥワイス・スルー・サイクルの経済的競争力にとって深刻な問題がある。それは、トゥワイス・スルー・サイクルではワンス・スルー・サイクルとほとんど同量のウランを使うという事実である（節約できるのは、今日普通そうであるようにプルトニウムだけをリサイクルするなら12%である。再処理で得られたウランもリサイクルするなら節約量は25%に増える）。その結果、NEA の想定を全部そのまま使ったとしても（再処理及び MOX 燃料製造コストが歴史的に経験されたものよりずっと低くなると想定する「基準ケース」のものを含め）ウランの「均衡」価格——二つのサイクルのコストを同じにするウラン価格——は650ドル/kgU に達する。これは、NEA が想定している将来の価格の5倍、歴史的な平均の6倍の高さである。

全体的な結論は、二つの燃料サイクルの相対的成本に関する NEA 以前のコンセンサスに揺るぎはないというものである。ワンス・スルー燃料サイクル（オープン燃料サイクル）は、ト

ウワイス・スルー燃料サイクル（再処理サイクル）よりも、実質的にあらゆる将来の状況において、確実に、相当安くなる。

文末注

第10章

478. Jungmin Kang and Frank von Hippel, “Limited Proliferation-Resistance Benefits from Recycling Unseparated Transuranics and Lanthanides from Light-Water Reactor Spent Fuel,” *Science and Global Security*, Vol. 13, 2005, pp. 169–181.
479. 以下から J. Boulton, ed., *Management of Radioactive Fuel Wastes: The Canadian Disposal Program*, Atomic Energy of Canada Research Company, AECL-6314, 1978, Figure 6, adapted by カナダ原子力FAQ (www.nuclearfaq.ca: 公有ウェブサイト) による翻案。軽水炉に関する同様のグラフについては、以下を参照: *Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management*, International Atomic Energy Agency, 2004, figure 1.
480. 代わりに低濃縮ウランが使われた場合に生み出されるプルトニウムを計算に入れても。以下を参照: *Plutonium Fuel: An Assessment*, Nuclear Energy Agency, OECD, 1989.
481. 例えば以下を参照: Shwageraus, E., P. Hejzlar, and M. S. Kazimi, “A Combined Nonfertile and UO₂ PWR Fuel Assembly for Actinide Waste Minimization,” *Nuclear Technology*, Vol. 149, 2005, pp. 281–303.
482. *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*, National Academy Press, 1996, Figure 4–2 and Table 4–3.
483. *Ibid.*, p. 66, 82–83.
484. “Planning Act No. 2006–739 of 28 June 2006 Concerning Sustainable Management of Radioactive Materials and Waste,” www.andra.fr/download/andra-international-en/document/editions/305cva.pdf
485. ASTRID: Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration.
486. World Nuclear Association, “Fast Neutron Reactors,” 16 March 2015, www.world-nuclear.org/info/Curent-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/.
487. MYRRHA: Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications.
488. myrrha.sckcen.be/en/MYRRHA/Applications and Friederike Frieß, Physics Department, Technische Universität Darmstadt, personal communication, August 2014.
489. www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/033/pdf/33-4.pdf (日本語).
490. Jong-Bae Choi, Ministry of Education, Science and Technology, “Status of Fast Reactor and Pyroprocess Technology Development in the Republic of Korea,” *Proceedings of an International Conference Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities*, Kyoto, Japan, 7–11 December 2009, International Atomic Energy Agency, 2012, p. 119.
491. P.G. Schedrovitsky et al., “The Programme for Fast Reactor Development in the Russian Federation,” *Proceedings of an International Conference Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, International Atomic Energy Agency, 2009, pp. 139–147.
492. P.B. Lyons, “Meeting tomorrow’s energy needs,” *Proceedings of an International Conference Fast Reactors and Related Fuel Cycles*, International Atomic Energy Agency, 2009, pp. 63–67.
493. 熱・電力変換効率を1/3、設備利用率を80%、燃料のエネルギー放出率を43 MWt-days/kgUとした場合。燃料1トン当たり、10.89kgのプルトニウム(及びアメリシウム)。以下に基づく。 *Plutonium Fuel*, OECD Nuclear Energy Agency, 1989, Table 9.
494. 軽水炉の発電容量330GWeは、以下から Power Reactor Information System (PRIS) Database, International Atomic Energy Agency. 使用済み燃料の超ウラン元素1キログラを高速炉に入れて核分裂させると1GWt日の熱を生み出す。74トンだと約200GWt年を生み出す。高速炉での熱・電変換率を40%とし、設備利用率を74%とすると(ロシアのBN-600の生涯設備利用率、IAEA-Power Reactor Information System) 110 GWeとなる。
495. *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*, op. cit., pp. 211 – 212.
496. ナトリウムは空気中でも水中でも燃える。また、制御棒が入っていない状態で冷却材のコンスタントな流れが阻害されると、ナトリウムは沸騰する。これは、ほとんどの炉心の形状では、炉心の反応度の上昇をもたらし、小さな核爆発が起きることになる。Bethe-Tait事故である。このような事故で放出されるエネルギーのレベルを抑え、これを閉じ込める格納容器のコストが高くなりすぎないようにしようとの試みがドイツのSNR300高速実証炉に関してなされたが、結局、約60億ドル(2014年のドル)をかけて完成した炉を運転しないとの決定となった。以下を参照: W. Marth, *The SNR 300 Fast Breeder in the Ups and Downs of its History*, Kernforschungszentrum [Nuclear Research Center] Karlsruhe, 1994.
497. 米国原子力規制委員会は、ピーチボトム原子力発電所の使用済み燃料プール火災からの放射能放出に関する最悪に近いシナリオでは、平均で、9400平方マイル(2万4000平方キロメートル)の地域からの410万人の長期的避難が必要となると推定している。しかし、このような事故が地震で起きる確率は非常に

- 小さい（1000万炉・年に1回）とも推定している。次を参照：Table 33, in “Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor,” NUREG 2161, U.S.Nuclear Regulatory Commission, October 2013, Table 33.
498. 次を参照：chapter 8, “Sweden and Finland,” in Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, International Panel on Fissile Materials, 2011.
499. 彼らはまた、自分たちのコミュニティーを経済的に支えている原子力発電所が生み出した放射性廃棄物の処分に協力すると言う点で何らかの責任を感じるかもしれない。
500. UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, 2000, Annex B, Table 31.
501. BEIR, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2, National Academy Press, 2006, Table 13-1.
502. 例えば次の文書の議論を参照：Allan Hedin, Spent nuclear fuel — how dangerous is it? Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Technical Report TR-97-13, 1997.
503. 次を参照：chapter 13, “Geological Disposal,” in Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors International Panel on Fissile Materials, 2011.
504. 例えば次を参照：Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark: Main report of the SR-Site project, Volume III, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), TR-11-01, 2011, www.skf.se/upload/publications/pdf/TR-11-01_vol3.pdf, Figure 13-18. ラジウム226は、半減期が1600年である。埋設後10万年から100万年の期間に線量に寄与するものとして示されている他の放射性核種の半減期は、重要性の順でいうと：ヨウ素129（半減期1600万年の核分裂生成物）、ネプツニウム237（ウラン235による中性子の捕獲によって生まれる半減期200万年の超ウラン元素）、セレンウム79（半減期6万5000年の核分裂生成物）、鉛210（半減期22年のウラン238崩壊生成物）、ニッケル59（鋼鉄に含まれるニッケル58から生まれる半減期7万6000年の放射化生成物）、アクチニウム227（半減期22年のウラン235崩壊生成物）、ニオブ94（鋼鉄に含まれるニオブ93から生まれる半減期2万4000年の放射化生成物）。
505. Bernd Granbow, “Mobilisation and activation products in nuclear waste disposal,” Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 104, 2008, pp. 180–186.
506. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, op. cit., Vol. 3, pp. 746–752.
507. “AREVA Signs A Series Of Strategic Agreements With Its Chinese Partners,” Areva press release, 25 April 2013; and Ayesha Rascoe, “Areva sees nuclear waste recycling planning [in the U.S.] by 2015,” Reuters, 6 June 2011, www.reuters.com/article/2011/06/06/us-areva-nuclear-usa-idUSTRE7555OO20110606.
508. www.aveva.com/EN/operations-3028/the-advantages-of-recycling.html, accessed 31 May 2014.
509. www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_problem_committee/033/pdf/33-4.pdf(in Japanese).
510. Mycle Schneider and Yves Marignac, Spent fuel reprocessing in France, International Panel on Fissile Materials, 2008.
511. Roald A. Wigeland, Theodore H. Bauer, Robert N. Hill, and John A. Stillman, “Repository Impact of Limited Actinide Recycle,” Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, 9–13 October 2005, Paper No. 496.
512. J. Choi et al., “Experimental assessment of non-treated bentonite as the buffer material of a radioactive waste repository,” Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering, Vol. 36, No. 5, 2001, pp. 689–714.
513. 燃焼度 53 MWt-days/kgHMの低濃縮ウラン燃料及びMOX燃料に関するJungmin Kangによる計算。
514. 2011年末現在、米国には6万7600トンの使用済み原子力発電用燃料が存在。Fuel Cycle Potential Waste Inventory for Disposition, Rev. 5, U.S.Department of Energy, 2012, Table 3–4.
515. Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation, pp. 82 – 83.
516. Ibid. p. 3. 「追加的運転リスク」に関しては、報告書にある明確な記述は核変換を伴う燃料サイクルにおけるプルトニウムの処理に関連した核拡散リスクに言及したものだけである（p.108）。燃料サイクルの被曝リスクは核変換をしてもしなくても小さいとの結論だった（p.111）。再処理の金銭的成本は大きいとの結論である（p.117）。
517. “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 4 July 2013 on transmutation of long-lived radioactive elements”] and “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 industrial prospects of separation and transmutation of long-lived radioactive elements, review of the interim report of the CEA, in October 2010, on technical assessments economic options for partitioning and transmutation.”]
518. [高速増殖炉による]「資源活用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」 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。『論点：核のごみ 最終処分への提言』（聞き手 山田大輔）、毎日新聞 2014年05月23日
519. UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000, Vol. 1, Annex C, Table 44; see also “Carbon-14 and

- the environment,” Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, www.irs.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/environment/Pages/carbon14-environment.aspx
520. BEIR, Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Table 12–13.
521. Thomas Cochran, Robert Norris and Oleg Bukharin, *Making the Russian Bomb: From Stalin to Yeltsin*, Westview Press, 1995, pp. 109–113.
522. “Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami” in UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, Vol. 1, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, 2013, p. 37.
523. “Risks of explosion associated with “red oils” in reprocessing plants,” Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire Technical Note, June 2008, www.irs.fr/EN/publications/technical-publications/Documents/IRSN_Technical-Note_Red-Oils_062008.pdf. Other references give a detonation temperature of 130 °C or even lower. See Randall N. Robinson, David M. Gutowski, and William Yeniscavich, *Control of Red Oil Explosions in Defense Nuclear Facilities*, Technical Report, Defense Nuclear Facilities Safety Board, 2003; and Velayuthan Sreekantan Smitha et al., “Reactive Thermal Hazards of Tributyl Phosphate with Nitric Acid,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 21, 2012, pp. 7205–10.
524. 1990–94年の期間、再処理工場の2万4000人の労働者が平均して年間3ミリ・シーベルトの被曝。一方、ウラン鉱山及び粗精錬工場で7万6000人の労働者が平均して年間4ミリシーベルトの被曝。UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, 2000, Vol. 1, Annex E, Table 12.
525. Edwin Lyman and Harold Feiveson, “The Proliferation Risks of Plutonium Mines,” *Science and Global Security*, Vol. 7, 1998, pp. 119–128.
526. Glenn Seaborg, speech at the 1995 meeting of the American Nuclear Society, San Francisco, quoted in “Burying Spent Fuel is Not the Best Approach to Nonproliferation, Seaborg Tells ANS,” *Spent Fuel*, Vol. 2, 6 November 1995, p. 2.
527. アトムズ・フォー・ピース・プログラム（平和のための原子力計画）の一環として、カナダと米国は、インドにCIRUS原子炉を提供。インドは、これを核兵器用プルトニウムの生産に使った。米国はまた、インドのエンジニアに再処理の訓練を提供。この協力関係は、インドが1974年に「平和核爆発」実験を実施した後中止された。30年後の2005年、G・W・ブッシュ政権は、この禁輸措置を終わらせるよう「原子力供給国グループ (NSG)」を説得するキャンペーンをインドとともに展開した。以下を参照：IAEA, “Statement [by the Nuclear Suppliers Group] on Civil Nuclear Cooperation with India,” *International Atomic Energy Agency, INFCIRC/734 (Corrected)*, 19 September 2008.

第 11 章

528. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2013, p. 124.
529. 現在の状況で1回のリサイクリングしかない理由は、使用済みMOX燃料内のプルトニウムのかなりの部分が軽水炉では簡単に核分裂させられないからである。この問題は、高速中性子炉ではずっと小さくなる。
530. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 125.
531. *The future of the nuclear fuel cycle: An interdisciplinary MIT study*, Massachusetts Institute of Technology, 2010 and NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle* are recent examples.
532. これまでのところ、経験によって資本コストの削減を達成できていないという点で原子力は他の技術と異なっている。以下を参照：A. Grubler, “The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing,” *Energy Policy*, Vol. 38, 2010; and N. Hultman, J. Koomey, and D. Kammen, “What history can teach us about the future costs of U.S. nuclear power,” *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 7, April 2007.
533. このステップは実は必要ではない。なぜなら、高速中性子炉は濃縮ウランで運転が開始できるからである。例えば、ロシアと中国はその実験炉と実証炉の燃料に高濃縮ウランを使っている。MOX燃料を製造する施設がないためである。また、韓国は、低濃縮ウランを使う計画である。米国側の核拡散についての懸念のためである。以下を参照：“Cooperation deal to develop advanced reactor,” *World Nuclear News*, 27 August 2014, www.world-nuclear-news.org/NN-Cooperation-deal-to-develop-advanced-reactor-2708141.html.
534. J. Surrey, ed., *The British electricity experiment*, Earthscan, London, 1996.
535. *Meeting the energy challenge: A White Paper on Energy*, UK Department of Trade and Industry, 2007, p. 204, paras. 116 – 118.
536. NEA, *Uranium 2014: Resources, production and demand*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2014. 2013年現在、ウランは21カ国で生産されていた（11ページ）。
537. ロシアは、他の国に提供した燃料から発生した使用済み燃料の一部を再処理しているが、分離されたプルトニウムも放射性廃棄物も返還しない。従って実質的にロシアは使用済み燃料処分サービスを提供しているのである。そして、再処理をへてこの処分を実施することをロシアは選択している。
538. N. Stern, *The Stern review on the economics of climate change*, Her Majesty’s Treasury, 2006, Chapter 2.
539. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, *op. cit.*

540. 本稿の表1で言及されている研究は、表1のコラムの順に言うと：G. De Roo and J. Parsons, “A methodology for calculating the levelized cost of electricity in nuclear power systems with fuel recycling,” *Energy Economics*, Vol. 33, 2011, pp. 826 – 839; Matthew Bunn et al. “The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel,” *Nuclear Technology*, Vol. 150, June 2005, p. 209; G. Rothwell et al., “Option values for the long-term use of MOX,” Working Paper for the International Atomic Energy Agency (2011); NEA, *The economics of the nuclear fuel cycle*, Nuclear Energy Agency, OECD, 1994; NEA, *Advanced nuclear fuel cycles and radioactive waste management*, Nuclear Energy Agency, OECD, 2006.
541. NEAの報告 (*The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013) で提示されている結果の矛盾は、6.7米ドル及び7.3米ドル/MWhという数字は単一の「基準」ケースからくるが、20%という数字は広範なシナリオの平均であるという事実からくる。
542. Rob Broomby, “Hinkley firm denies fuel claim,” *BBC*, 6 November 2013, www.bbc.co.uk/news/science-environment-24834932
543. G. Rothwell et al., “Sustainability of light water reactor fuel cycles,” *Energy Policy*, 74, 2014, S16 – S23.
544. *Ibid*, p. S22.
545. J-M. Charpin, B. Dessus and R. Pellat, Economic forecast study of the nuclear power option, Report to Prime Minister, July 2000, fissilematerials.org/library/cha00.pdf (Translated from French).
546. Charpin, Dessus and Pellat, *op. cit.* Appendix I contains a scenario for no reprocessing (S7). We derive a scenario for 100 percent reprocessing from a linear combination of this scenario and scenario S6, which is for 70 percent reprocessing.
547. Reported in T. Katsuta and T. Suzuki, *Japan’s spent fuel and plutonium management challenges*, International Panel on Fissile Materials, 2006.
548. Katsuta and Suzuki, *Japan’s spent fuel and plutonium management challenges*, Table 2.5, p. 11. 日本原子力委員会は、その後、「政策変更コスト」という概念を導入してこれらの結論に修正を加える。再処理をしなければ、使用済み燃料プールが満杯になった時点で原子力発電所を閉鎖して代わりに化石燃料発電所を建てなければならなくなるとの非現実的な想定を伴うものである。
549. “Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost,” Japan Atomic Energy Commission, Technical Subcommittee on Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle, 10 November 2011, Slides 31 – 32, www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf. (日本語版：原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会資料集1 核燃料サイクルコストの試算, 2011年11月10日 31-32ページ http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1.pdf)
550. “Is France to Blame for [China National Nuclear Corporation’s] Back-End Problems?” *Nuclear Intelligence Weekly*, 19 December 2011; see also Chapter 2.
551. M. V. Ramana and J. Y. Suchitra, “Costing plutonium: economics of reprocessing in India,” *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 27, No. 4, 2007, pp. 454 – 471.
552. Charpin, Dessus and Pellat, *op. cit.*
553. “Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost,” Japan Atomic Energy Commission, Technical Subcommittee on Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle, etc, 10 Nov. 2011, www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf, (日本語版：原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会資料集1 核燃料サイクルコストの試算, 2011年11月10日 http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1.pdf) ,スライド28の割引率0%に関するもの。製造される1kgのMOX燃料当たり使用済み低濃縮ウラン7.5kgが再処理されると想定。
554. BCG, *Economic assessment of used fuel management in the United States*, Boston Consulting Group, 2006.
555. Reproduced directly from NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, p. 106, Table 3.9.
556. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013. Only the results for the once-through and twice-through cycles are discussed here.
557. これらの異なるケースについては次の報告書でやや詳しく、数量的結果とともに説明されている。NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, Chapter 3, pp. 63 – 108.
558. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, pp. 14 and 69.
559. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, Table 3.10, p. 107.
560. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, Table 3.5.
561. As shown in NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, Figures 3.23, 3.24, 3.25 and 3.26, pp. 90 – 93.
562. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, p. 8.
563. In NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, Table 3.5, p. 88, there are six cases out of the 24 in which the cost advantage to the once-through cycle is greater than 30 percent.
564. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, p. 16.
565. *Plutonium Fuel: An Assessment*, Nuclear Energy Agency, OECD, 1989. 再処理で得られたウランは、MOX燃料製造用のフィードストックの一部として使うことができるが、実際には、そのコストは劣化ウランを使うよりも高くつき、再処理回収ウランはほぼ例外なく貯蔵されたままになっている。
566. いくつかのケース、例えば、フランスでは、使用済みMOX燃料の一部は、長期間貯蔵された後、再処理されて高速炉サイクル用に使われると想定されている。しかし、これは確実であるというにはほど遠く、

- また、発電体系の高速炉燃料サイクルへの移行を意味する。高速炉燃料サイクルに関する諸研究が、このサイクルのコストはトゥワイス・スルー・サイクルよりも高いとしていることから、ここでは使用済みMOX燃料は最終的には廃棄物として扱われるだろうと想定する。
567. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle* uses three of these four issues (the exception is MOX fabrication costs) in its own sensitivity testing, (p. 94).
568. この段落のデータは次から： NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Figs 3.23 to 3.26, pp. 90 – 93.
569. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Section 4.6.1, p. 120.
570. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Section 4.6.1, p. 120.
571. Mycle Schneider and Yves Marignac, *Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France*, International Panel on Fissile Materials, 2008, chapter VI.
572. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 75.
573. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Section 2.1.2, p. 30.
574. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, Figure 3.2.
575. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 99. この結果は、400TWh/年のシステムについて割引率0%で計算されたものである。ウラン価格は、割引率が3%だと、270～300ドル/KgUに上がる必要がある。次を参照：NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, 2013, footnote on p. 142. この分析における他の想定には次のものが含まれる。1) 軽水炉に対する高速炉の資本コストのプレミアム20%（軽水炉は4500ドル/kWeのコストと想定、77ページ）。2) 高速炉の使用済み燃料の再処理と高速炉用のMOX燃料製造のコストが熱中性子炉〔遅い中性子を使う炉、つまり普通の原子炉〕の同様のコストと同じレベルだとの主張（77ページ）。全体として、高速炉のコストに関するNEAの想定はいささか楽観的とみなすことができるだろう。
576. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*, OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, 2014, p. 130.
577. Gavin M. Mudd, “The future of yellowcake: A global assessment of uranium resources and mining,” *Science of the Total Environment*, Vol. 472, 2014, pp. 590 – 607.
578. K. Deffeyes and I. MacGregor, “World uranium resources,” *Scientific American*, Vol. 242, January 1980, pp. 66 – 76.
579. *Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050*, International Atomic Energy Agency, 2014, Table 3.
580. Power Reactor Information System (PRIS) Database, International Atomic Energy Agency, 12 April 2015, www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx.
581. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 81.
582. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 81.
583. NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, p. 81.
584. BCG, Economic assessment of used fuel management in the United States, 2006, p. iv.
585. 2013年6月7日のプレス・リリースにおいて、アレバ社は次のように述べている。「アレバは、また、日本のMOX燃料製造工場の継続中の建設に対し、その技術的専門能力を提供する。この工場の技術は、フランスにあるアレバのメロックス工場に基づいている。」
www.areva.com/EN/news-9857/areva-signs-series-of-strategic-agreements-with-japanese-partners.html.
586. コストは日本原燃（株）から。同社は六ヶ所再処理工場とMOX燃料製造工場の建設・運転の責任を負う。
www.jnfl.co.jp/jnfl/establishment.html（日本語）。前述のとおり、六ヶ所再処理工場を設計したアレバ社は、同じ処理能力を持つ再処理工場を中国で建てる計画に関し200億ユーロ（210億[2016年]ドル）を要求している。
587. “Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost,” Japan Atomic Energy Commission, Technical Subcommittee on Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle, etc, 10 Nov. 2011, www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf, slide 30.
588. *Ibid.*, slides 31 and 32.
589. Derived from NEA, *The economics of the back end of the fuel cycle*, figure 3.27, p. 94.

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12月