



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)

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）

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

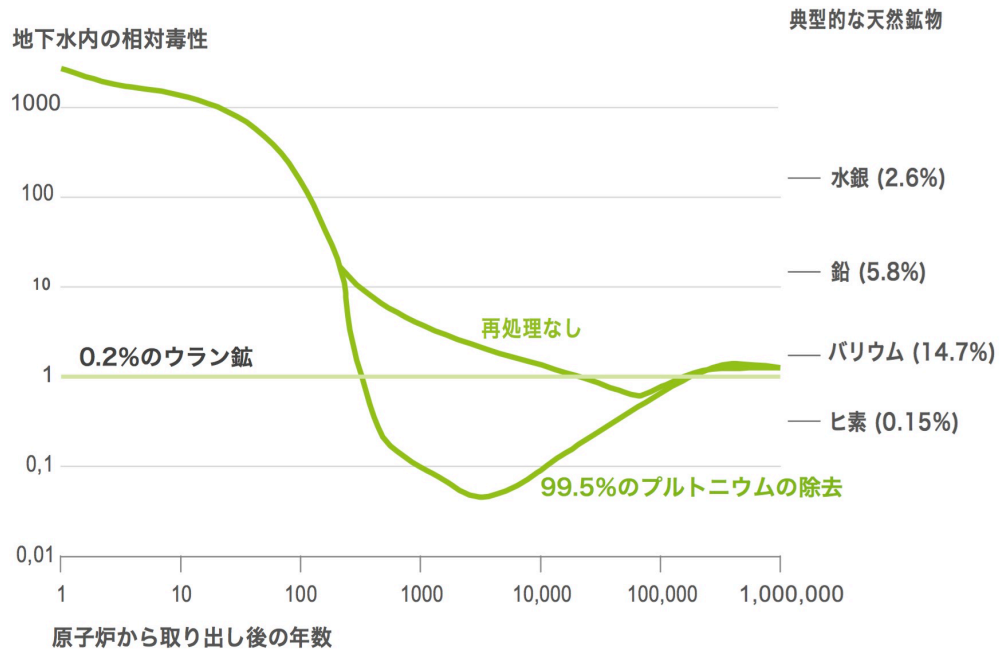


図 10.1 処分場に置かれた使用済み燃料の経口摂取毒性に関する釣り合いのとれた見方

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

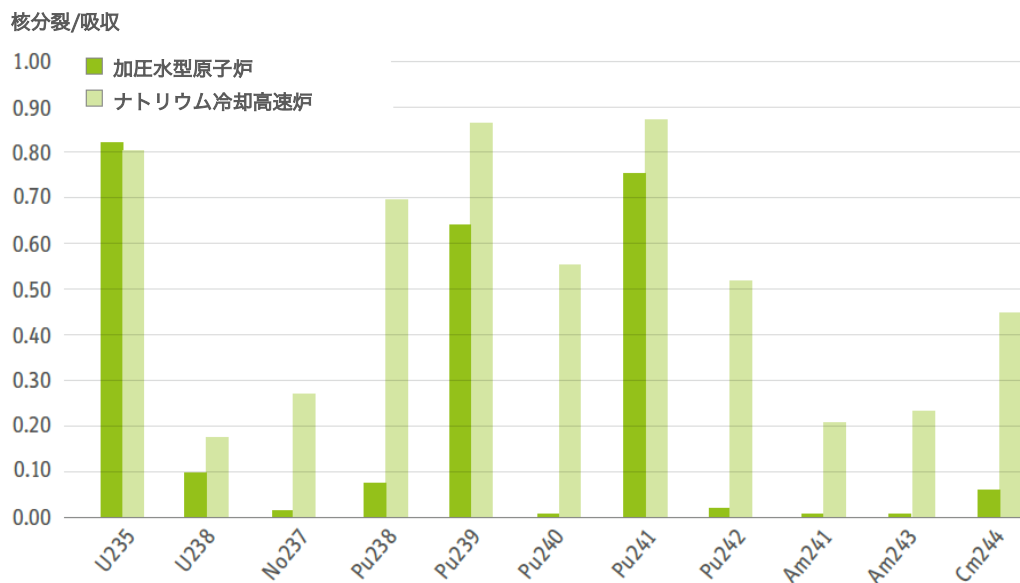


図 10. 2 遅速中性子と高速中性子の核分裂確率

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）^{*訳注}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』^{*訳注}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

^{*訳注} 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。

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・ピ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のでとしている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がん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がん罹病リスクが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——フランスのラアー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。同じような批判は、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、委員長時代に時期に世界的な「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。

文末注

第10章

- ^{478.} Jungmin Kang and Frank von Hippel, “Limited Proliferation-Resistance Benefits from Recycling Un-separated 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/Current-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 Pyro-process 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キログラム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.skb.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-idUSTRE7555OO 20110606.
508. www.areva.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(inJapanese).
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 elements 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.irsn.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,

- ^{523.} “Risks of explosion associated with “red oils” in reprocessing plants,” Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire Technical Note, June 2008, www.irsn.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ら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.

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