

Plutonium for Energy?

Explaining the Global Decline of MOX



A Policy Research Project of the
LBJ School of Public Affairs
University of Texas at Austin



NUCLEAR PROLIFERATION
PREVENTION PROJECT

The University of Texas at Austin

Edited by Alan J. Kuperman

プルトニウム・リサイクルは なぜ失敗したのか？

アラン・J・クーパーマン

この序章では、従来ウラン燃料を使用してきた熱中性子炉でプルトニウムとウランの混合酸化物（MOX）燃料を利用する「プルトニウムのエネルギー利用」に関する初の包括的国際研究である本書で得られた知見を概括している。使用済核燃料を再処理することによって得られる人工元素プルトニウムは、発がん性がある、核兵器に使える、精製し燃料に加工するのが非常に高価である、という3つの理由から論争的になっている。本研究チームは、これまでにMOX燃料の商業的製造または利用を行なった7カ国すべて（ベルギー、フランス、ドイツ、日本、オランダ、スイス、英国）を調査した。その結果、これら7カ国のうち5カ国がすでに商業的MOX利用を段階的に廃止することを決めており、この産業が急速に衰退していることが分かった。この後退の原因は、この燃料の草創期の性能問題ではなく（それはすでに克服済みである）、プルトニウムに内在する危険性にある。プルトニウムに毒性があるために、MOX燃料製造事業者は国民の反対に直面し、特別な安全対策を取ったが、それがコストを押し上げ、生産の足枷になったのだった。世界の熱中性子炉用MOX燃料の商業製造施設6カ所中5カ所が、業績不振の末に早期閉鎖されている。熱中性子炉用MOX燃料を商業利用した6カ国では、MOX燃料価格が従来のウラン燃料の3～9倍にのぼっている。環境や核拡散への懸念からプルトニウム燃料が政治論争的となった国は4カ国ある（ドイツ、日本、ベルギー、スイス）。これらの国では、その時点で原子力の継続を認めつつも、MOX事業を一部または全面的に中断している。1回の輸送で運ばれる未使用のMOX燃料には核兵器数十発分のプルトニウムが含まれているため、安全保障も大きな懸念要素だが、原子炉運転事業者はいまだ物理的防護の抜本的に強化しておらず、輸送はテロ攻撃に対して脆弱である。プルトニウム燃料は、元来原子力産業に不可欠なものと見られていたが、皮肉にも逆に原子力の経済性や安全性、人気を損なう一因となってきた。本章では結論として、原子力利用のためのプルトニウム・リサイクルを推進している国、あるいはそれを考えている国に向けた教訓を提示している。

ふつうリサイクルは、ゴミを資源に変え、原料と廃棄物処分の必要を同時に減らす良いものとされる。だが、使用済みの核燃料から新たな燃料をつくり、原子力エネルギーを生み出すプルトニウム・リサイクルは論争的になってきた。その主な理由は、プルトニウムに発がん性がある、核兵器の材料になる、そして（大部分前の2つの性質のために）精製や燃料加工が非常に高価になる、という3つの大きな欠点があるためだ。こうした問題にもかかわらず、これまで7カ国（ベルギー、フランス、ドイツ、日本、オランダ、スイス、英国）が、プルトニウムを従来の熱中性子原子力発電所（核分裂を起こすのに「高速中性子」ではなく「熱中性子」を用いる^{訳注1}）の燃料として商業ベースでリサイクルする道を推進してきた。それは、従来のウラン（LEU）の代わりに、プルトニウムとウランを混ぜた混合酸化物（MOX）燃料を加工・利用するものだ。この他、中国、インド、ロシア、韓国、米国など、熱中性子炉や高速中性子炉を用いてプルトニウムのエネルギー利用を行なう国内施設の建設を検討している国もある。こうした決定は、国際安全保障、公衆衛生、原子力の資金的実現可能性などへの潜在的影響が極めて大きいことから、世界でこれまでに行なわれた熱中性子炉用MOX燃料の歴史的経験の包括的な分析を行なった上でなされるべきである。だが、残念ながらこれまでのところ、そのような調査研究は存在しなかった¹。

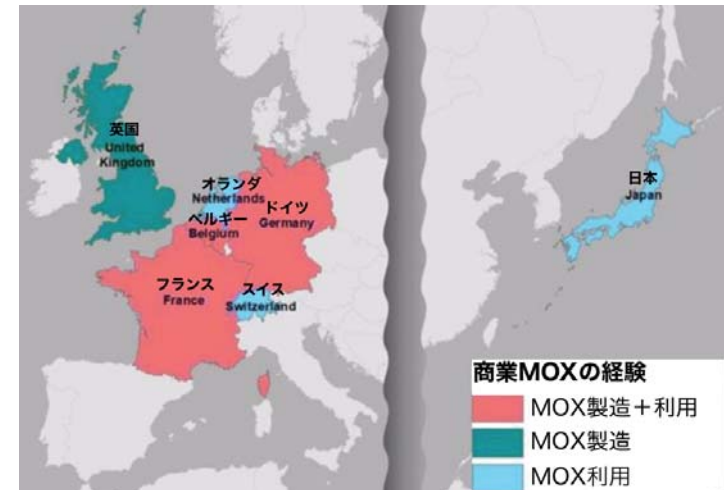
本書は、熱中性子炉によるエネルギー生産を目的としてプルトニウムの商業的リサイクルを推進している7カ国（図1）すべてを、その個別事例研究にもとづいて調査した初めての研究である。これらの国のなかで、ベルギー、フランス、ドイツの3カ国は、こうしたMOX燃料の商業的製造・利用の両方を行なっている。日本、オランダ、スイスの3カ国は、商業的利用はしているが、製造はしていない。1カ国（英国）は、商業的製造はしているが、利用はしていない。

本研究の主要な知見は、熱中性子炉用MOX燃料産業が急速に衰

^{訳注1} 熱中性子炉としては、軽水炉のほか重水炉、黒鉛炉がある。日本では重水炉として「ふげん」（16.5万kWe、重水減速軽水冷却圧力管型沸騰水炉、MOX燃料使用：2003年廃止）、黒鉛炉として東海発電所（16.6万kWe、黒鉛減速炭酸ガス冷却炉、天然ウラン燃料、1998年廃止）がある。現在、世界でMOX燃料の商業利用が行なわれているのは軽水炉のみである。

図1

熱中性子炉用商業MOX開発を行なった7カ国



出典: Yeo-Ri Kim.

退しているということである。2018年現在、7カ国中5カ国が商業MOX事業をすでに終了しているか、または段階的に廃止することを決めている（表1）。ベルギーは2006年にMOXの製造と利用の両方を中止した。スイスは2007年にMOX利用を終了した。英国は2011年にMOXの商業的製造を終了した。ドイツは1991年にMOX生産を中止しており、2017年を最後にMOX燃料集合体の装荷を行っていないため、利用は2020年に終了する。オランダは2026年に最後のMOX燃料集合体の装荷を行ない、4年後にこれを取り出す予定である。このオランダを除けば、いずれの国も原子力発電の段階的廃止決定以前に商業的MOX事業を縮小している。この流れから外れているのは、商業的熱中性子炉用のMOXを継続する計画を維持している2カ国（フランスと日本）だけであり、その計画も財政面と政治面での難題に直面している。

この総合的な衰退の原因と国ごとの結末の違いを評価するために、本書は国ごとの熱中性子炉用MOXの経験を経済、安全保障、安全/環境、業績、国民の受容という5つの側面から検証している。これらの問いに関する情報のなかには、すでに公表された文献で

得られているものもあったが、一般に情報が古く不完全であった。多くの場合、重要なデータは本研究の研究者が政府機関や電気事業者、業界、非政府組織（NGO）の現役や引退後の関係者からの聞き取り調査によって初めて得られたものである。本書の各章は、草稿執筆後、他の専門家に意見を依頼し、修正を加えた後に出版した。

表 1

熱中性子炉用商業MOXの衰退

国名	MOX 燃料製造	MOX 利用
ベルギー	X	X
フランス	✓	✓
ドイツ	X	↘
日本		✓
オランダ		↘
スイス		X
英国	X	

記号:

X = 終了

↘ = 段階的廃止

✓ = 継続中

必要性の見込み違い

エネルギーのためにプルトニウムをリサイクルするという考えが1960年代に根付いたのは、2つの見込み違いに基づいていた。そのひとつは燃料用ウランの埋蔵量は希少であるという見込み、もうひとつは原子力の需要は級数的に増大するという見込みである。そこで考えられた解決策は、「核分裂性」でないため熱中性子炉の燃料にならないウラン同位体（U-238）を、エネルギーを生み出すプルトニウム同位体（Pu-239）に転換することで、ウランが生み出せるエネルギーを増やそうというものだった。ウランの99パーセントは核分裂しないので、この転換をすれば世界のウラン供給から得られるエネルギーを大幅に増やせるはずだ。従来のウランが原子炉のなかで放射線に照射されると、少量のU-238がプルトニウムに転換するので、これを再処理工場で分離抽出すれば新たな燃料が作れる。

充分な量のU-238を転換するためには、熱（低エネルギー）中性子に依存した従来の軽水炉（LWR）よりも高速（高エネルギー）の中性子をもつ高速増殖炉（FBR）を開発する必要がある。1970

年代、原子力事業者は使用済みのウラン燃料の商業再処理を開始し、高速増殖炉用の燃料を製造した。だが、高速増殖炉の商業化が遅れたため、抽出したプルトニウムを軽水炉用燃料に一部混ぜてリサイクルするMOX燃料を始めた。しかし、余ったプルトニウムは大量の在庫となって蓄積した²。

今世紀までに世界の高速増殖炉開発計画のほとんどは失敗している。原子力事業者は、使用済燃料を再処理しても、プルトニウムを商業的にリサイクルする道は軽水炉用MOX燃料以外にないことに気づいた。原子力をもつ国のほとんどで、事業者はプルトニウム・リサイクルを推進しない選択を行なった。さらに、1970年代に世界のウラン資源がそれまでの予測よりもはるかに多く存在し、原子力への需要がはるかに小さいことが明らかになると、こうした事業者は使用済燃料を廃棄物として処分することを選択した。また、米国は1976年以降、プルトニウムの分離が核拡散や核テロのリスクを増大させるとの懸念から、世界的に使用済燃料の再処理に反対するようになった³。本書で検討する7カ国は、こうした背景にもかかわらず熱中性子炉用MOX燃料の商業化を始めた国である。

その後熱中性子炉用MOXが衰退した主な理由は、燃料の性能に問題があったからではなかった。初期段階で、MOXを熱中性子炉で用いる際のいくつもの技術的困難に直面したのは事実である。MOX燃料加工では、各酸化物を混合するさいの均一性確保がうまく行かず、燃料ペレットの中にプルトニウムの塊ができ、照射中にホットスポットや気体状核分裂生成物の放出量増加、被覆管破損、冷却材と減速材の両方の機能をもつ炉水の放射能汚染が生じた。さらに、プルトニウムは、ウランよりも熱中性子を吸収する傾向が強いと同時に、熱中性子によって核分裂を起こす傾向も強い。このため、中性子スペクトルがより硬くなり、過剰な核分裂を制御するために使われる「毒」の効果が低下し、原子炉設備がより多くの破壊的高速中性子に曝されることになった。これにともない、隣接するMOX燃料集合体と低濃縮ウラン燃料^{訳注2}集合体との間に中性子束の勾配が生じる問題が発生し、炉心管理が複雑になるとともに、ひとつの炉心にプルトニウム比率の異なるいくつものMOX燃料を用いる必要が生じた。また、MOX燃料は従来のウラン燃料よりも燃焼度が低く、ひとつの炉心で2つの燃料交

換サイクルを別々に行なう必要が生じた。さらに、プルトニウムの核分裂で発生する遅発中性子の数がウランに比べて少ないという別の問題が生じ、原子炉制御機構の変更が必要になった。しかし、最終的には、これらの基本的な技術上の問題は克服され、今日MOX燃料はウラン燃料にかなり近い性能をもつに至っている。だが、こうした技術的成功にもかかわらず、熱中性子炉用MOX産業はプルトニウムがもつ3つのリスク（がん、核兵器、コスト）によって急速に衰退し、MOX燃料は製造と利用の両面で行き詰まりを見せるようになった。

熱中性子炉用MOX燃料の製造

これまでに稼働した熱中性子炉用MOX燃料の商業加工施設6か所のうち5カ所が早期に閉鎖されており、そのほとんどは稼働中も期待された業績を上げていない。7番目の施設は建設後にキャンセルされている。こうした業績不振の主な根本原因は、プルトニウムがウランよりもはるかに危険であり、そのことが高コストと国民の反対につながったことにある。プルトニウム同位体のほとんどはかなり長寿命で、高レベルのアルファ線を放出する。ひとつのプルトニウム同位体は比較的早く崩壊するが、崩壊後にできるアメリシウム241も強力なアルファ線放射体である。こうしたアルファ線は、皮膚など多くの物質によって遮断できるため、体外にあるときはさして問題にならない。だが、プルトニウム同位体やアメリシウム同位体が吸入されて肺に定着した場合には、突然変異を引き起こすアルファ粒子を周辺組織に絶え間なく照射し続けるため、最終的にがんを引き起こすことが医学的に確認されている。

この危険があるのは、とくにプルトニウムが酸化物という吸入しやすい形をとるMOX燃料製造過程である。また、プルトニウムを金属の形で処理する核燃料サイクル施設では、発火によりエアロゾルになったプルトニウムを吸入する危険がある。作業員や周辺住民の健康リスクを減らすために、MOXプラントでは空気清浄機やグローブボックス、オートメ化などの高額機材や、漏れた放射能を洗浄するための長期停止など費用のかかる手順を導入している。最初にプルトニウムを得るための高額の費用を別としても、

こうした経費はMOX燃料の製造コストを大幅に押し上げる（ウラン燃料の3倍以上）。こうした加工コストの削減のために経費を切り詰めようとすると、今度はそれが事故や品質不良、不祥事、国民の反対運動の増加を招き、かえって生産量の低下と製造単価の上昇をもたらすことになった。

最大の失敗は英国核燃料会社（BNFL）のセラフィールドMOX工場（SMP）だ。この工場は年間120重金属トン（MTHM/年）の生産量を計画していたが、2001～11年の全稼働期間における実績はわずか14MTHM、年平均1MTHMあまり（当初見込みの約1%）にとどまった（第4章参照）。この深刻な失敗の主な原因としては、労働者の被ばくを減らすためのオートメ化に未実証の技術を採用したことと、労働者防護対策のコストを削減しようと施設の建築面積を無理に切り詰めたことの2つが挙げられる。その結果、設備の故障、高価な修理、長期の生産停止が相次いだ。SMPの問題の原因は実験的な技術と粗悪な設計にあったと言えるが、これらが採用された背景にはプルトニウムが健康にもたらす脅威への懸念と、それを緩和するためのコストがあった。

これよりもはるかに規模の小さいBNFLの先行商業工場だったMOX実証施設（MDF）も、SMPほどではないとはいえ、やはり失敗に終わっている。この工場の生産能力は8MTHM/年で、1993～99年の稼働期間中に計20MTHM、年平均3MTHM以上（生産能力の約40%）を生産した。だが、職員が品質管理データを繰り返し改竄していたことが明らかになり、工場は早期に閉鎖された。この国際的不祥事により、工場は罰金1億ドルを科され、未照射のMOX集合体が日本から返品されることになった。BNFLがなぜ繰り返し品質管理を怠ったのかは不明だが、ひとつの可能性として、SMPでもそうだったように、高いプルトニウムの健康リスク対策費の穴埋めをしようとしたことが考えられる。

ドイツのアルケム・ハナウ工場は、業績低迷を続けた末に放射線事故を起こし、1991年に永久閉鎖された（第6章参照）。この施設の生産能力は最大25MTHM/年とされていたが、1972～91年の年平均生産量は8MTHM、最大能力の約30%にとどまった。生産量が伸び悩んだ一因として、「グローブボックスの中でのやりにくい修理作業」や「加工区域で起きるプルトニウム汚染の除去に多大の時間を要した」など、プルトニウムの毒性からくる煩雑

^{訳注2} 以下では日本の慣例に従い「ウラン燃料」と略記する。

さが挙げられる。プルトニウムの核兵器リスクにともない、欧州原子力共同体（EURATOM）の保障措置査察による障碍や、輸送時の安全保障をめぐる国内の論争も生産の足を引っ張った。1991年、グローブボックスの事故により作業員1名が汚染されたことをきっかけに国民の反発が高まり、工場は永久閉鎖された。論争の高まりの中で、ほぼ完成していた後継のハナウ1工場も1995年に中止に追い込まれた。

ベルギーのデッセル市にあるベルゴニュークリア社が経営するP0工場は比較的成功的な例だったが、効率の悪さや競争、MOX需要の世界的下落により早期閉鎖された（第2章参照）。この工場の生産能力はMOX燃料棒で32MTHM/年で、隣接するフランス＝ベルギー燃料製造会社（FBFC）所有の施設で燃料集合体に成形していた。P0工場は1973～2006年にMOX燃料棒約600トン、年平均18MTHM/年（生産能力の55%）を生産した。しかし、P0工場は、主にプルトニウム健康影響対策により極めてコスト高だった。とくにMOX需要が減少する中で、より効率的なフランスのMELOX工場に太刀打ちできなくなり、結局は閉鎖に追い込まれることになった。つまりP0工場は、プルトニウム燃料の危険性と不人気から来る経済的理由により閉鎖されたことになる。一方、隣接するFBFC工場は、1990年代半ばにMOX燃料棒の破損事故が起き、除染に多大の費用が掛かったことと、MOX燃料集合体専用の附属施設の新設に多額の費用を要したことから、閉鎖されることになった。

フランスは順次2つの施設を建設し、熱中性子炉用MOXの製造に成功したが、経済上・安全上の難題に直面している（第3章参照）。商業的製造は1989年にカダラッシュのATPu工場で始まった。生産能力はMOX燃料棒で20MTHMから40MTHMに順次増強され、これをベルギーとフランスの工場で燃料集合体に成形した。フランスの安全機関は1995年、地震による危険性があるとして、ATPu工場の稼働を「2000年以後の早い時期に」停止するよう命じ、同工場は2003年に停止した。危険には、地震によりプルトニウム火災や臨界事故などの放射能放出が起き得ることが含まれていた。このように、このMOX工場の早期閉鎖も、プルトニウムの安全性と核兵器リスクが少なくともその理由の一部だったといえる。

今日までに最も成功した熱中性子炉用MOX製造工場であり、現在も稼働している唯一の商業施設はフランスのMELOX工場である。この工場の設計生産能力は最大250MTHM/年だが、これまで195 MTHM/年を超える認可を受けたことはなく、実際の生産量もこれよりはるかに少ない。MELOXの2014～17年の4年間の平均生産量は125 MTHM /年未満と、当初の設計能力の半分以下だった。この生産量の低迷の理由としては、主に国外需要の急激な減少（2015年以降ドイツからの需要はなくなり、近年のオランダと日本からの需要は約10MTHM/年にとどまっている）と、国内の電気事業者が高コストを理由にMOX利用を拒否したことが挙げられる。2017年には「技術的な生産障害」が報告されているが、それがMELOXの生産量がさらに110MTHMに減った理由かもしれない。

熱中性子原子炉でのMOX燃料利用

熱中性子炉で商業的にMOX燃料利用を行なっている6カ国は、いずれもMOX燃料価格が従来のウラン燃料の何倍にもものぼっている。主な原因は燃料製造コストの上昇で、とくにプルトニウムの健康影響に起因するものだが、これ以外にも1回の作業で扱える量が少ない、2種類の酸化物を均一に混合することが難しい、輸送安全保障の増強などの要因もある。コストへの影響が最も大きかったのは燃料棒加工事業だ。こうした対策を指揮したベルギーの業界関係者によるある記事は「MOX燃料の場合、このグループの事業コストは一般にウラン燃料の15～25倍にのぼる」⁴としている。

もうひとつの大きい出費は、ウラン使用済燃料の再処理によりMOXの主原料であるプルトニウムを得る事業だが⁵、それがどのようにMOX燃料コストに反映されるかは会計処理の仕方によって変わってくる。この業界では通常、再処理を廃棄物管理の一環と見做しているため、再処理の結果得られる分離プルトニウムは新たな燃料製造に使える無料の材料とされる。事実、原子力業界ではプルトニウムが実際にマイナスの実質価値をもっているため、プルトニウムの所有者がそれを他の誰かに引取ってもらうさいには高額の引取料を支払うことになっている（第8章参照）。この現象は2つの要素から説明される。ひとつは、製造コストが高いこともあって現在MOX燃料への市場の需要が皆無であること。2

つ目は、未照射のプルトニウムを廃棄物として処分するというもうひとつの処理方法も、この物質の毒性と安全保障上のリスク故に高価であるという点である⁶。MOXのもうひとつの主材料として通常使われる劣化ウランは、ウラン濃縮の廃棄物として豊富に存在し、それ故に価格は低い。このため、原子力業界では、ウラン燃料（天然ウランと濃縮ウラン）がかなりコスト高なのに対して、MOX燃料の材料である重金属は実質的に無料と見られているのである。再処理による高額なプルトニウム取得費用がこのような形で無視されている以上、価格上のハンデがMOX燃料に及ぼす重圧はMOX加工段階ほどではないことになる。

それにもかかわらず、MOX燃料は、それが利用されたすべての国で、ウラン燃料よりはるかに高価になっている。報道によれば、近年日本の電気事業者が支払っている輸入MOX燃料の価格は、同等のウラン燃料の少なくとも9倍にのぼっているという⁷。日本の原子力委員会は、日本が自国の燃料サイクル施設を計画通りに推進すれば、熱中性子炉用MOX燃料のコストはさらに高くなり、ウラン燃料の12倍になるとしている⁸。ベルギーで1998年に業界が行なった調査では、材料費をMOXでは無視しウランでは含めた場合でも、MOX燃料の製造コストはウラン燃料の少なくとも5倍にのぼることが明らかになっている⁹。ドイツでは、政府、業界、市民社会のいずれの立場の専門家による調査でも、MOX燃料の製造費がウラン燃料の3～5倍にのぼることがわかっている¹⁰。オランダで2010年に提出されたMOX燃料の商業利用の事業認可申請では、MOX加工コストをウランの5倍としている¹¹。1979年に英国エネルギー省が行った熱中性子炉用燃料の加工コストの推計では、MOXをウランの4倍としている¹²。スイスでは、電気事業者は歴史的にMOX燃料価格（物価調整後の価格）としてウラン燃料価格（現在価格）の約6倍を支払っている¹³。

フランスでは、規模の経済が働いているものの、業界関係者などの話¹⁴によると、MELOX工場の稼働が生産能力を大幅に下回っていることもあって、MOX燃料加工コストはウラン燃料の4～5倍にのぼっているという¹⁵。2000年のフランス政府の報告書は、再処理によるプルトニウムの取得費を含むMOX燃料の総製造コストはウラン燃料の4.8倍としている¹⁶。近年、再処理工場でも、MOX製造工場でも生産量が減少しており、そのため生産単価が上

昇していることから、MOX燃料加工コストのこのハンデは増大していると思われる。

MOX推進派は、原子力発電所のコストの大部分を占めるのは建設費なのだから、こうした追加費用は原子力発電の総コストにほとんど影響しないと見ている¹⁷。建設費の償却終了前の段階では、ウラン燃料の初期費用はエネルギー生産コスト全体の5～10%にすぎないと見られている。MOX燃料が導入されると、ふつう炉心のウラン燃料の約3分の1がMOXで置き換えられる。MOX燃料価格がウラン燃料の5倍とすると、MOX導入により初期燃料費は133%増加するが、総費用は7～13%しか増加しない。しかも、規制料金の下では、歴史的にこうした費用は電気料金に転嫁されていたので、電気事業者の負担は皆無だった。

しかし、MOX燃料によるこの追加費用は、とくに電力市場の自由化が進む現在、原子力発電所建設費の償却終了後はるかに重みを増すことになる。発電所の償却が完了すると、ウランを燃料とする炉心のコストが総コストの約30%まで上昇することもある。MOXが炉心の3分の1装荷され、その価格がウラン燃料の5倍とすると、総エネルギー生産コストは劇的に（40%）上昇する。自由化市場の下で需要家は選択肢があるため、このようなコスト増を黙って受け入れる必要はない。このため、電気事業者は利益の減少や赤字に直面することになる。熱中性子炉用MOXによるプルトニウム・リサイクル中止の拡大は、古い発電所の償却終了、そして電力市場の自由化と期を一にしてきたのである。

MOX燃料を導入した電気事業者は、その時点で他の選択肢はほぼないと考えていた。だが、MOXに対しては、コストや安全性、稼働上の難題、認可取得、そして長期的にはウラン使用済燃料よりもはるかに多くの熱と放射能を放出するMOX使用済燃料の処分などの面で懸念も抱いていた。電気事業者が1970年代にMOX導入の決定をした当時は、一般に使用済燃料を暫定貯蔵するための国の法規や設備が整備されていなかったため、原子炉の早期停止の危険を避ける唯一の方法は再処理しかないとされた。再処理をしてプルトニウムを分離した後は、それをリサイクルする現実的な道はMOXしかないと思られるようになった。多くの原子力事業者が、不安を抱きつつもMOX燃料に走らざるを得なかった背景にはこうした事情があったのである。

原子力以上に物議を醸すMOX

MOXの衰退は、単なる経済現象でもなければ、より広く、世界が原子力離れしつつあることの現れでもない。使用済燃料のリサイクルは、プルトニウムの安全性と核兵器転用の脅威のために、従来のウラン燃料の貫流（ワンスルー）利用よりも人気がないことはこれまで何度も明らかになっている。ドイツでは、プルトニウム・リサイクルのための国際輸送（とくに再処理のための使用済燃料の輸出と高レベル廃棄物の輸入）がもたらす環境リスクや核拡散リスクが注目されるようになった1990年代に反核運動が高揚した。国民の怒りに突き動かされて、2002年には、2005年以降の再処理のための使用済燃料の輸出を禁止し、2021年までに原子力の段階的廃止を義務付ける連邦法が制定された（第6章参照）。本来なら原子力を支えるはずだったプルトニウム・リサイクルが、逆に原子力を弱体化させる一因になったことは、皮肉というほかない。

日本でもプルトニウム・リサイクルは、健康と安全保障の問題から原子力そのものよりも大きな論争を内外で巻き起こしている（第5章参照）。1999年、日本の反核NGOは安全性問題を足掛かりに政府を説得して、高浜4号機向けMOX燃料輸入を拒否し、返還させることに成功した。だが、その時点で同発電所を閉鎖させるまでには至らず、また2011年の福島原発事故後の再稼働を止めることもできなかった。2001年、新潟県の有権者は、柏崎刈羽原子力発電所3号機のウラン燃料による可動継続は承認しつつも、やはり主として安全上の理由からMOX燃料利用は阻止した。同じ2001年に、福島県知事も、安全上の懸念から福島第一原子力発電所でのMOX利用同意を取り下げている。プルトニウム・リサイクルに対するこれら3つの下からの反乱は、日本でのMOX商業利用の開始を10年遅らせることになったが、これにより日本のプルトニウム保存量はさらに増大し、現在47トン以上に膨れ上がっている。中国、韓国、北朝鮮などの近隣諸国は、5,000発以上の核兵器を生み出せるこのプルトニウム蓄積に強い安全保障上の懸念を表明している¹⁸。つまり、日本のMOX推進は、国内的にも国際的にも、原子力計画を進める上で障害となっているのである。

他の国々でも、プルトニウム・リサイクルは従来の原子力以上

に論争の種になっている。スイスでは、2003年の国民投票で再処理のための使用済燃料の輸出を暫定的に禁止するモラトリアムが成立し、2006年に発効したが、スイスの有権者は原子力発電所の閉鎖に対しては繰り返し反対してきた（ただし、福島原発事故後の変化により、2017年の国民投票で原子力発電を2050年までに段階的に廃止することが決まっている：第7章参照）。ベルギーでは、1990年代にNGOがプルトニウムによる核拡散と核テロ、環境リスクに焦点を当てた反核キャンペーンを展開した。1993年、ベルギー政府は新たな再処理契約を暫定的に禁止するモラトリアムとMOX燃料の再検討を余儀なくされ、1998年には既存の再処理契約がすべて終了するに至った（第2章参照）。ベルギーの副首相は1998年、「経済と環境の側面に関して現在得られている情報に基づけば、今後も再処理技術を使うことに正当性はない」と説明している¹⁹。その数年後の2003年、ベルギー政府は、原子力発電を段階的に廃止し、2025年までに全廃することを決めた。

これまでのところ国民からの決定的な反対に遭わずに熱中性子炉でのプルトニウム・リサイクルを進めることができていく国はフランスとオランダの2カ国でのみである。フランスでは、産業界と政府の強力な結びつきにより、グリーンピースや緑の党による再処理の環境リスクやプルトニウム輸送の安全保障リスクの主張をすり抜けてきた（第3章参照）²⁰。オランダでは、唯一の発電用原子炉と廃棄物処理施設が南西部のベルギーとの国境沿いにあり、そこがフランスの再処理工場とMOX工場とを結ぶ輸送ルートになっていることから、プルトニウム・リサイクルのための輸出入の影響を受けるオランダ住民は少ない。また、オランダの原子力事業者は、13年間に及ぶMOX利用計画全体を規定する単一の契約を交わしており、それが国内の反核NGOや政治家が、他の国々で功を奏したような契約変更に向けた反対運動を起こす道を塞いできた。フランスとオランダの経験は、プルトニウム・リサイクルは、それが強力な国内の利害に裏打ちされているか、国民の監視の眼から護られている場合には、政治的に成功する可能性が高くなることを示唆している。

安全保障上のリスク

本書はまた、未使用のMOX燃料に含まれるプルトニウムが核兵器

の製造に使われる可能性があるという物理的安全性の妥当性について、深刻な懸念を提起している。原子力発電所で取られている安全保障体制には秘密の部分もあるが、われわれが行なった事例調査では、原子力発電所の物理的防護体制は、MOX燃料導入後も著しく強化されたわけではないことが分かった。電気事業者は、燃料供給の中断に備えて未使用のウラン燃料の予備を保管する場合があるが、MOX燃料については納入後すぐに原子炉内に装荷することで未使用のMOXの保管期間をできるだけ短縮するようにしている。原子力発電所の運転者も、放射能がウランよりも強いプルトニウムに対応するために運転員の安全手順を改訂しているほか、国ごとのバラツキが生じないように未使用のMOXに対しては未使用または使用済ウラン燃料よりも頻繁な監視と査察を行なうとしている国際安全保障措置の基準も遵守している。また、運転責任者のなかには、未使用のMOX燃料にプルトニウムが含まれることから、未使用ウラン燃料よりも厳しい、プルトニウムも含んでいる使用済ウラン燃料なみの防護措置を取っているものもある。

こうした対策のなかで、テロリストや犯罪者からの脅威に適切に対処できているものはひとつもない。未使用のMOXには、盗難や処理工程によって兵器用プルトニウムを取得するさいの妨げになる高い放射性がないため、使用済ウラン燃料よりもはるかに大きな準国家レベルの安全保障リスクをもたらす。原子力発電所の運転者や政府高官は、未使用のMOX燃料集合体の質量が大きいこと（数百キログラム）や、原子炉の貯蔵プールや地下倉庫に貯蔵することで、盗難を十分防止できると考えているようで、この未照射プルトニウムを核兵器に転用可能な物質として防護しているようには見えない。だが、プルトニウムはまぎれもなく兵器転用可能な物質であり、ひとたび連携テロ攻撃が発生すれば甚大な事態に至る恐れがある。

何百キロメートルという長距離におよぶことも多い未使用MOX燃料の地上輸送では安全保障対策が強化されている。しかしながら、こうした対策は通常、装甲トラックを用い、少数の国家警察車両を配備して、中央司令部と無線で交信しながら護衛するという形にとどまっている。テロリストがこれまで用いてきたような武器（成形爆薬、徹甲弾、ロケット推進手榴弾など）で攻撃してきた場合、こうした形の輸送では侵犯や盗難を受けやすい可能性

がある。輸送車両が予測可能な決まった経路を取り、狭隘路や駐車地点など理想的な攻撃の機会を提供するような場所を通過する場合、この脆弱性はさらに高まる²¹。加圧水型原子炉用のMOX燃料集合体は、一体で通常30キログラム以上、少なくとも核兵器3個分のプルトニウムを含んでいる。しかも、1回のMOX輸送で原子炉装荷に必要な十数体かそれ以上のMOX集合体が運ばれることもあり、フランスではそうした輸送が毎週行なわれている。最近MOX燃料の統合製造施設が開発されるまでは、MOX燃料棒を別の工場まで運び、そこで燃料集合体に成形するという、もうひとつの脆弱性が存在した（第2章、第3章参照）。

フランスではさらに危険なことに、再処理工場で分離された酸化プルトニウムをMOX加工施設に輸送することも行なわれている（1回で最高プルトニウム250キログラム、核兵器二十数発分を輸送）²²。こうした出荷が週2回発生し、1,000キロメートル以上の距離を運ばれている。フランスの再処理工場やMOX製造工場にはそれぞれ核兵器数百～数千発分の分離プルトニウムがトン単位で保管されており、ここでも安全保障対策が問題になっている。核燃料サイクル会社オラノの取締役社長は、2018年に、同社の安全保障支出を倍増したとしても、フランスの電気料金の上昇はせいぜい0.2%ほどにとどまると証言している²³。テロリストによる核兵器に使用可能なプルトニウムの盗難がもたらし得る事態の甚大さを考えれば、こうした安全保障投資の増強は賢明な判断と見なされるだろう。

驚くべきことに、外国の政府高官や業界関係者のなかには、原子力級プルトニウムは核兵器に転用できないと、何十年も前に瓦解している神話をいまだに主張している向きもある。日本の今井隆吉前国連軍縮会議大使は、1993年に「原子炉級プルトニウムは [...] 原爆製造には極めて向かない」と宣言した²⁴。ベルギーの高官も同様の感情表明を行なっている（第2章を参照）。フランスでは、2017年10月の政府報告書が「MOX燃料でプルトニウムを利用することにより [...] 残存プルトニウムの同位体組成を著しく劣化させることができるため、この技術は核拡散につながらない」と述べている²⁵。

こうした主張は、熱中性子による核分裂に依存しているために特定のプルトニウム同位体しか連鎖反応を持続できない軽水炉と、

高速中性子に依存するため、すべてのプルトニウム同位体が連鎖反応を持続できる核兵器とを混同しているものと思われる。どのような同位体組成の原子炉級プルトニウムを使おうと、信頼性のある核兵器を作ることは可能なであり、そのことは政府の専門家や独立系専門家が繰り返し文書で論証している²⁶。こうしたプルトニウムでも臨界量は依然小さい。熱の増加は、熱伝導で除去するか、ピットの挿入を遅らせる、または浮上型コアや耐熱性の爆縮材を用いることで処理できる。また早期爆発は、集合を早めるかトリチウムの添加によって対応できる。スイスでの聞き取り調査では、政府と軍が使用済燃料のリサイクルを核兵器保有への選択肢を確保する一助として支持していることを明かすことで、原子炉級プルトニウムがもたらすこのリスクを、身分保持のため暗黙の形で認める発言があった（第7章参照）。

東アジアとその彼方への教訓

本書は、少なくとも3つのグループの国向けに教訓を提供している。最初のグループは、熱中性子炉でMOX燃料の商業利用を長期間継続する計画をもっている2つの国、フランスと日本である。2つ目のグループは、熱中性子炉でのMOX燃料の大規模な利用開始を検討している3つの国、中国、英国、米国である（米国の場合は、もともと核兵器用に製造されたプルトニウムの処分が目的）。3つ目は、高速炉や乾式再処理などの代替技術（プルトニウムの毒性や兵器転用の可能性、付随費用の面で熱中性子炉でのMOX利用と同様の懸念を引き起こす可能性がある）によって使用済燃料のリサイクルを進めている国、インド、韓国、ロシア、中国などである。

第1の教訓は、使用済核燃料をエネルギーを目的にリサイクルすることは、核燃料サイクル施設におけるプルトニウムの安全面と衛生面での脅威に対処するためのコストが高いため、極めて高価になるということだ。第2に、プルトニウムをリサイクルすることの表面的な利益（エネルギー安全保障と廃棄物管理）は、それを最大限評価したとしても、こうした莫大な費用を補うにはあまりにも副次的である。最近の信頼に足る諸研究²⁷によると、このことは熱中性子炉でのMOX利用だけでなく高速炉などの代替技術にも当てはまる。第3に、使用済燃料のリサイクルで取られて

いる安全対策は、原子炉級プルトニウムが核兵器に転用可能性であることや、テロリスト集団が核兵器を取得し使用することを目標にすると公言していること、こうした集団が9.11のような精妙な攻撃を実行する能力をもっていることはすでに実証済みであることなど、多くの懸念材料に対して不十分である。第4に、世界の豊富なウラン供給と濃縮能力を考えれば、使用済燃料のリサイクルは原子力の持続的かつ効率的な生産には不必要である。したがって、プルトニウム・リサイクルがもつ深刻な経済上、安全上、安全保障上のリスクを負担することには正当性がない。第5に、高コストとそれに見合う利益がないにもかかわらずプルトニウム燃料を追求し続けている国は、他国から国際的な平和と安全を揺るがすような動機を隠しているのではないかと疑われかねない。

以上の教訓から、上記3つの国グループそれぞれに向けた提言が導かれる。不経済かつ危険な熱中性子炉でのMOX利用を継続する計画をもつフランスと日本は、国内の政治状況が許す限り早急にMOX利用の段階的廃止を行なうべきである。フランスには、政府と産業界のなかにプルトニウム推進を望む強力かつ根強い利害が存在する。とはいえ、国の電力会社は、プルトニウムのリサイクルが電力コストを押し上げていることを認識している。分離プルトニウム、再処理能力、MOX加工能力、MOX利用可能な原子炉という4つの必要条件が国内で過剰になっているにもかかわらず、MOX燃料の利用を増やしてこなかった理由もそこにある。たとえフランスが安全上と安全保障上の懸念によって自らのMOX計画を再評価せざるを得なくなることはないとしても、行くゆくは経済的重圧によってそうせざるを得なくなることが考えられる。

日本のプルトニウム推進勢力はフランスほど強力ではないが、それは日本ではまだ商業用再処理施設もMOX加工施設も稼働開始に至っていないためだ。むしろ、リサイクル推進を求める最大の圧力は、使用済核燃料で身動きできなくなるのを恐れる地元地域（原子力発電所や未稼働の再処理工場とMOX工場の隣接自治体）から来ているのかもしれない。この懸念に対処するためには、日本政府は使用済燃料のドライキャスク貯蔵の拡大に投資すべきであり、同時にこの技術の安全性と信頼性を地元で説明するとともに、地層処分場の完成まで廃棄物の暫定貯蔵場所を提供する自治体に対して補償金を交付すべきである。政府はまた、潤沢にある

再処理基金（電気事業者からの負担金を核廃棄物管理に充てている）の一部を、英国に保管されている22トンのプルトニウムの所有権を英国が引き取り、日本の保有量を半分に減らすために充てるべきである。日本の国内プルトニウムの大部分は現在日本の原子力発電所では使えない形態である以上、政府は米国と協力してこれを廃棄物として処分すべきである（米国はこれと類似の処分計画をもっている）²⁸。日本が保有しているこれ以外のプルトニウム（国内2トン、フランス15.5トン）については、MOXと廃棄物の組み合わせとして比較的迅速に処分すべきである。そうすることで、日本は現在抱えているプルトニウム在庫をわずか5年で解消できるはずだ²⁹。

熱中性子炉での大規模なMOX利用の開始を検討している3カ国（中国、英国、米国）は、この選択肢が不経済かつ不必要であることを認めるべきである。米国政府は、MOX加工工場を費用高騰により建設半ばで中止し、数十億ドルを無駄にした末にこうした決定に至ったと見られ、余剰兵器のプルトニウムは廃棄物として処分することを計画している³⁰。英国は半世紀以上にわたって使用済燃料を再処理してきたが、経済性などの理由から再処理で得られたプルトニウムを原子力発電所で商業的にリサイクルしたことは一度もない（第4章参照）。その結果、英国は、国内に110トンという、核兵器用プルトニウム3.2トンに比べて桁違いに多い民生用分離プルトニウムを抱えるに至った。政府は、このプルトニウムをMOX燃料の形でリサイクルする方針を公式には変えていないが、英国内にはMOX加工施設もMOX利用を認可された原子炉も存在しない。英国はこの虚構に見切りをつけ、このプルトニウムを廃棄物として処分すべきである³¹。中国は、分離プルトニウムの余剰がまだ発生していないことから、3カ国のなかで最もいい立場にあるが、国内に再処理工場とMOX加工工場を建設する交渉をオラノ社と進めている。中国は西側の工業化を模倣し成功してきたが、熱中性子炉用MOXが西側で高価かつ危険な失態を重ねてきたことを考えると、ここで先蹤を踏むことは推奨しかねる。

最後に、インド、韓国、ロシア、中国などその他の国は、代替技術を用いてエネルギー目的のプルトニウム・リサイクルを追求している。理論上、高速原子炉はその燃料中のプルトニウムなどアクチニドをより多く消費することができ、そのことで高レベル

廃棄物の長期にわたる熱と放射能を減らすことができる。乾式再処理は、純粋なプルトニウムの分離を避けることができ、それ故（従来の再処理に比べれば）閉じた核燃料サイクルがもつ核テロのリスクを幾分軽減する可能性がある。しかし、これまでの研究で、こうした長所は甚だ誇張されたものであることが分かっている³²。使用済燃料のリサイクルを目指す努力を阻んできた安全性、核兵器、コストという、プルトニウムのもつ3つの根本的リスクがこうした技術で克服できるわけではないのである。したがって、これらの国が自らの代替技術を追求するさいには、中性子炉用MOXをめぐる国際的な経験を検証し、なぜそれが失敗したかを理解することが称揚される。そうすることで、これまで試みたほぼ全ての国で技術的にも経済的にも失敗した高速炉の商業化というハードルに加えて、現在提案されているエネルギー目的のプルトニウム・リサイクルという路線が同じような難題に直面するであろうことに気づくことができるかもしれない³³。

プルトニウム抽出を目的とした使用済核燃料の再処理は、核兵器を製造するには優れた方法である。だが、本書で詳述しているこれまでの歴史は、それが発電のためには非効率で危険かつ不要な方法であることを示している。使用済燃料リサイクルの安全性と安全保障、経済性に大幅な改善が見られない限り、「プルトニウムのエネルギー利用は有効か？」という本書が提起する問いへの答えは、明確にNOである。

文末注

- ¹ 個別の国の計画については既存の有益な記事や論文があり、本書でも個別事例を扱う各章で引用している。また、国ごとの短い比較研究として、少なくとも次の2件がある：Per Högselius, “Spent nuclear fuel policies in historical perspective: An international comparison,” *Energy Policy* 37, 1 (2009): 254-263およびD. Haas and D. J. Hamilton, “Fuel cycle strategies and plutonium management in Europe,” *Progress in Nuclear Energy* 49, 8 (2007): 574-582。1990年代に日本のNGOがMOXの安全性・安全保障・経済性を評価しているが、国別の比較という枠組みで行なわれたものではない。高木仁三郎・他『MOX（プルトニウム燃料）総合評価—IMA（国際MOX燃料評価）プロジェクト最終報告』（七つ森書館, 1998年：英語版はJinzaburo Takagi, *et al.*, *Comprehensive social impact assessment of MOX use in light water reactors* (Tokyo: Citizens' Nuclear Information Center, 1997, http://www.cnrc.jp/english/publications/pdf/ima_fin_e.pdf) を参照。この時期以降のより短い批判的分析としては次の文献がある：Frank Barnaby, “How Not to Reduce Plutonium Stocks: The Danger of MOX-fuelled Nuclear Reactors,” *Corner House Briefing* 17, December 30, 1999, <http://www.thecornerhouse.org.uk/resource/how-not-reduce-plutonium-stocks>。
- ² Thomas B. Cochran, *et al.*, *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (International Panel on Fissile Materials, 2010)。
- ³ J. Samuel Walker, “Nuclear Power and Nonproliferation: The Controversy over Nuclear Exports, 1974–1980,” *Diplomatic History* 25, 2 (2001): 215-249。この米国の政策は、1974年にインドが「平和的核爆発」を実施し、建前は平和利用の使用済燃料からプルトニウムを分離して核兵器が作れることを実証したことに対する対応策である。この政策では、米国由来または米国の技術を土台にした原子炉で照射された使用済燃料であるという理由で米国の同意権の対象となっている使用済燃料の再処理について、その許可を撤回すると脅迫することにより強制力をもたせる手段が採られた。
- ⁴ A. Vielvoye and H. Bairiot, “Economic optimization of MOX fuel,” *Nuclear Europe Worldscan*, 11, 1/2 (1991): 13。MOX燃料では、これらの事業が製造コストの大半を占めている。これに対して低濃縮ウラン燃料では、こうした事業のコストは、燃料棒や燃料集合体用の部材、UF₆からUO₂への転換、工学的・経済的準備、工場への往復輸送を含めても、製造コスト全体の2割程度にすぎない。製造コストには重金属の投入は含まれない。
- ⁵ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs: Status, Problems, and Prospects of Civilian Reprocessing Around the World* (International Panel on Fissile Materials, 2015)。
- ⁶ 米国の「希釈処分」計画のコストは、2018年にプルトニウム1kgあたり約50万ドルと推計されている。極めて高価だが、プルトニウム1kgあたり160万ドル以上と推計されるMOX燃料による処分コストの3分の1以下である。U.S. Department of Energy, “Surplus Plutonium Disposition Dilute and Dispose Option Independent Cost Estimate (ICE) Report,” April 2018, <https://s3.amazonaws.com/ucs-documents/global-security/dilute-and-dispose-independent-cost-estimate-4-18.pdf>。ヨーロッパでは、プルトニウムの負の市場価格はkgあたり数万ドルである（第8章参照）。

- ⁷ 第5章参照。“MOX imports have cost at least ¥99.4 billion, much higher than uranium fuel,” *Energy Monitor Worldwide*, February 23, 2015。
- ⁸ Atomic Energy Commission Bureau, “Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost,” November 10, 2011, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf。
- ⁹ 第2章参照。Belgonucléaire, “Comparison of MOX & U Fuel Assembly Costs,” 1998, 3。
- ¹⁰ 第6章参照。Jurgen Krellmann, interview with Kelli Kennedy, Marseilles, France, January 4, 2018。Dr. Christoph Pistner, interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 10, 2018。Dr. Klaus Janberg, interview with Kelli Kennedy, Dusseldorf, Germany, January 6, 2018。Wolfgang Heni, interview with Kelli Kennedy, Darmstadt, Germany, January 12, 2018。Wolfgang Heni, “Physical, Technological, Ecological, and Economic Aspects for The Optimization of the Nuclear Fuel Cycle,” Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 1994。
- ¹¹ 第8章参照。EPZ, “Milieueffectrapportage Brandstofdiversificatie,” July 2010, Figure 2.9.1。
- ¹² Peter Jones, *The Economics of Nuclear Power Programs in the United Kingdom* (New York: St. Martin's Press, 1984): 55。
- ¹³ 第7章参照。匿名希望の元原子力運転責任事業者職員の発言（interview with Harry Kim, January 10, 2018）。この結果、スイスの電力事業者は、MOX燃料の製造料をできるだけ減らそうと、プルトニウムを天然ウランではなく劣化ウランと混合し、それを購入する契約を行なった。H. Bay and R. Stratton, “Use of Mixed Oxide Fuel in a Pressurized Water Reactor Experience of NOK, Switzerland,” *International Topical Meeting on Safety of Operating Reactors*, American Nuclear Society, San Francisco, CA, 1998, 293。
- ¹⁴ 第3章参照。
- ¹⁵ Vielvoye and Bairiot, “Economic optimization of MOX fuel,” 15, observes that, “MOX fuel fabrication plants must operate at or near nominal capacity to maintain reasonable manufacturing costs.”
- ¹⁶ *Plutonium Separation in Nuclear Power Programs*, 138 (footnote 16), www.fissilematerials.org/library/cha00.pdf。次の内容を分析している：Jean-Michel Charpin, Benjamin Dessus, and René Pellat, “Economic forecast study of the nuclear power option,” Report to the Prime Minister, July 2000, Appendix 1。
- ¹⁷ コスト全体の約4分の3と推計。次を参照：“The Future of the Nuclear Fuel Cycle,” MIT, April 2011, 21。
- ¹⁸ Yukio Tajima, “Japan's 'plutonium exception' under fire as nuclear pact extended; Beijing and Seoul question why US allows only Tokyo to reprocess,” *NIKKEI Asian Review*, July 14, 2018, <https://asia.nikkei.com/Politics/International-Relations/Japan-s-plutonium-exception-under-fire-as-nuclear-pact-extended>。Lee Min-hyung, “NK slams Japan's plutonium stockpiling,” *The Korea Times*, August 5, 2018, https://www.koreatimes.co.kr/www/nation/2018/08/356_253381.html。
- ¹⁹ WISE-Paris, “Belgium: Scheduled End to Reprocessing and to MOX Use,” January 21, 1999, <http://www.wise-paris.org/index.html?eng->

- lish/ournews/year_1999/ournews0000990121.html. Jan Vande Putte, interview with Valentina Bonello, January 12, 2018によると、同氏は主要な論拠として核拡散の懸念を挙げている。
- ²⁰ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*, film documentary, directed by Éric Guéret, ARTE, 2017.
- ²¹ *Sécurité nucléaire: le grand mensonge*.
- ²² 1回の輸送でプルトニウム280kgが運ばれる（第3章参照）。
- ²³ “Audition de M. Philippe Knoche, directeur général d’Orano (ex-Areva),” Commission d’enquête sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, March 8, 2018.
- ²⁴ Nuclear Control Institute, “The Plutonium Threat,” <http://www.nci.org/new/nci-plu.htm>.
- ²⁵ Republic of France, “Sixième rapport national sur la mise en œuvre des obligations de la Convention commune,” October 2017, 36. 以下の記述がある：“l’utilisation du plutonium dans les combustibles MOX permettant de consommer environ un tiers du plutonium, tout en dégradant significativement la composition isotopique du plutonium restant, fait que cette technologie n’est pas proliférante.”
- ²⁶ Gregory S. Jones, *Reactor-Grade Plutonium and Nuclear Weapons* (Arlington, VA: Nonproliferation Policy Education Center, 2018). Bruce T. Goodwin, “Reactor Plutonium Utility in Nuclear Explosives,” Lawrence Livermore National Laboratory, November 6, 2015. 過去の懐疑論者は、使用済MOX燃料からの分離プルトニウムで信頼性のある核兵器を製造するさいの潜在的困難性を強調していた。以下を参照：Bruno Pellaud, “Proliferation aspects of plutonium recycling,” *C. R. Physique* 3 (2002): 1067–1079. 世界の民生用分離プルトニウムのなかで使用済MOX由来のものは約1パーセントにすぎない。
- ²⁷ National Research Council, *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation* (National Academy Press, 1996): 3. Lindsay Krall and Allison Macfarlane, “Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 74, 5 (2018): 326-334.
- ²⁸ Frank von Hippel and Gordon MacKerron, *Alternatives to MOX: Direct-disposal options for stockpiles of separated plutonium* (International Panel on Fissile Materials, 2015). 両国はすでに「米・日プルトニウム管理専門家グループ」（PMEG）として知られる二国間メカニズムをつくり、こうした技術協力を促進している。次参照：U.S. National Nuclear Security Administration, “Prevent, Counter, and Respond – A Strategic Plan to Reduce Global Nuclear Threats, FY 2017 – FY 2021,” Report to Congress, March 2016, 2-4.
- ²⁹ Alan J. Kuperman and Hina Acharya, “Japan’s Misguided Plutonium Policy,” *Arms Control Today* (October 2018): 16-22, <https://www.armscontrol.org/act/2018-10/features/japan's-misguided-plutonium-policy>. Alan J. Kuperman, “How not to reduce Japan’s plutonium stockpile,” *Kyodo News*, op-ed, July 13, 2018, <https://english.kyodonews.net/news/2018/07/f91d38319475-refiling-opinion-how-not-to-reduce-japans-plutonium-stockpile.html>.
- ³⁰ Timothy Gardner, “Trump administration axes project to generate power from plutonium,” *Reuters*, May 13, 2018.

- ³¹ von Hippel and MacKerron, *Alternatives to MOX*. こうした処分方法は、英国、フランス、日本、米国などが参加する国際プルトニウム管理円卓会議（IPMR）のような既存の多国間協議の下で行なう国際技術協力によって促進することができるだろう。次を参照：U.S. Department of Energy, “Departmental Response: Assessment of the Report of the SEAB Task Force on Nuclear Nonproliferation,” October 2015, 12-13.
- ³² National Research Council, *Nuclear Wastes*. Krall and Macfarlane, “Burning waste or playing with fire?” James M. Acton, “The myth of proliferation-resistant technology,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 65, 6 (November/December 2009): 49-59. Edwin S. Lyman, “The Limits of Technical Fixes,” in *Nuclear Power & the Spread of Nuclear Weapons*, eds. Paul Leventhal, et al. (Dulles, VA: Brassey’s Inc., 2002): 167-184.
- ³³ ロシアは例外だが、ロシアで最も順調な高速炉であるBN-600でも1980～97年に蒸気発生器でナトリウム火災が14回起きている。次を参照：Thomas B. Cochran, et al., “It’s Time to Give Up on Breeder Reactors,” *Bulletin of the Atomic Scientists* 66, 3 (2010): 50-56.