

核燃料サイクルの歴史と意義

2021年7月

元核燃料サイクル開発機構理事 河田東海夫

目次

1. 核燃料サイクルとは
 - (1) ウラン利用効率1%未満・・・資源利用から見た軽水炉
 - (2) ウラン利用の理想体系は高速増殖炉サイクル
 - (3) 軽水炉導入期における再処理・リサイクルの意義とその後の変遷
2. 我が国の核燃料サイクル政策
 - (1) 我が国の核燃料サイクル政策とその歴史的経緯
 - (2) 揺らぐ政府の核燃料サイクルに対する姿勢
3. 再処理方式と直接処分方式のバックエンド的視点での特性比較
 - (1) 高レベル放射性廃棄物の発熱と処分場の必要面積
 - (2) 高速炉サイクルのガラス固化体の発熱特性と処分場面積
 - (3) MOX使用済燃料の発熱と処分
 - (4) 廃棄物毒性の観点からの比較
 - (5) 使用済燃料中間貯蔵の必要容量
4. 核不拡散の視点からの二つの選択肢の比較
 - (1) 核不拡散問題から見た二つの選択肢の特徴
 - (2) プルトニウム鉱山問題
 - (3) 地層処分と核拡散防止の間の基本理念の衝突
5. バックエンド方式の全般的比較
 - (1) 経済性
 - (2) 二つの選択肢の総合比較
 - (3) 原子力発電大国は再処理・リサイクル方式を目指す
6. 高速増殖炉の新しい視点:「究極のゴミ焼却発電炉」

1. 核燃料サイクルとは

核燃料サイクルとは、ウラン鉱石の採掘に始まり、核燃料の製造や原子炉での燃焼を経て、使用済燃料の最終的な後始末までの過程全体の総称であり、核燃料の「揺りかごから墓場まで」ということもできる。核燃料サイクルのうち、前半部分、すなわちウラン原料調達から核燃料（燃料集合体）に仕上げるまでの過程を「フロントエンド」と呼び、後半の使用済燃料を原子炉から取り出した後の過程を「バックエンド」と呼ぶ。

核燃料サイクルは、原子力発電を長期的・効果的・安定的に推進するための包括的なインフラとその運用であるということもでき、そのあり方は、対象となる原子炉の型式によって異なってくる。そこで、例えば軽水炉に関する核燃料サイクルは「軽水炉サイクル」と呼び、高速増殖炉（高速炉）に関するそれは「高速増殖炉サイクル」（または「高速炉サイクル」）と呼ぶ。今日核燃料サイクルと言えば、ほとんどの場合軽水炉サイクルを意味する。今日の軽水炉サイクルにおいては、世界的に燃料の供給体制がほぼ固定化されているため、フロントエンドについてそのあり方が議論されることはあまり多くない。一方、バックエンドに関しては、いわゆる「直接処分方式」と「再処理・リサイクル方式」（単に「再処理方式」という場合もある）という二つの異なる選択肢があり、その選択の是非または優劣がしばしば議論の俎上に上る。そのため、今日では軽水炉サイクルのバックエンド部分のみを指して「核燃料サイクル」と呼ぶ場合が多い。

ウラン資源を輸入に頼らざるをえない我が国では、原子力利用開発開始の当初からウランの利用効率を高める「再処理・リサイクル方式」を選択し、使用済燃料を再処理することにより生成プルトニウムと残存ウランを回収して再利用することを目指してきた。図1に示すように、プルトニウムの再利用は、当面は軽水炉において行うこととし、将来的には高速炉で行うとしている。この図は資源エネルギー庁のホームページに掲載されている図であるが、ここでもバックエンド部分のみに対して「核燃料サイクル」という言葉を使用している。

核燃料サイクルの仕組み

- 核燃料サイクルは、使用済燃料を「再処理」し、取り出したウランとプルトニウムを燃料 (= MOX燃料)として再利用するもの。

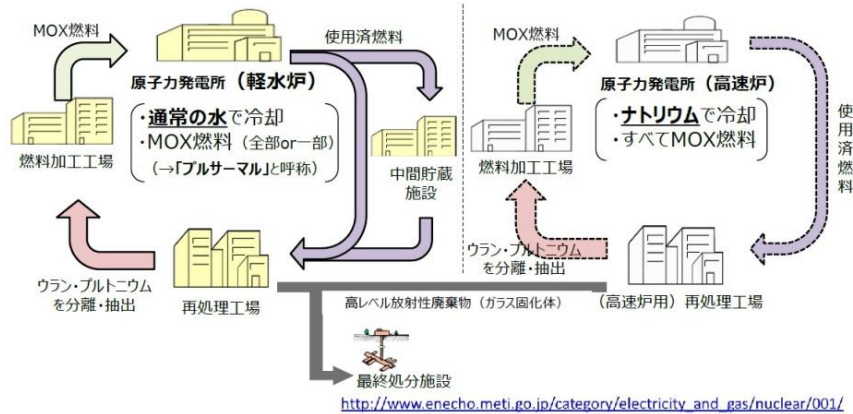


図1 核燃料サイクルの仕組み

(1) ウラン利用効率1%未満…資源利用から見た軽水炉

今日、商業用原子力発電の主流は低濃縮ウランを燃料とし、軽水を減速材兼冷却材として使う軽水炉であり、世界の原子力発電容量の約9割を占める（日本では100%）。軽水炉は、もともとは米国で原子力潜水艦の動力源として開発されたものであり、艦船搭載用として小型で高出力であることに加え、高い安全性（密閉空間である潜水艦であるがゆえに特に重要）が追求された。そうした特性はその後軽水炉が民生用発電技術に転用された段階では優れた経済性を生むこととなり、そのことが軽水炉を世界的に普及させる大きな要因になったのである。その一方で、軽水炉は、基本的にはウラン U-235 の核分裂のみを利用するシステムであり、使用済燃料を直接処分した場合には、ウラン資源全体から見た利用効率はわずか0.6%にしかならない。また、再処理で回収されるプルトニウムを MOX 燃料（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料）としてリサイクル利用する場合でも、プルトニウム高次化（高次の同位元素生成による品位低下）の問題から、繰り返し利用、すなわち多重リサイクルが困難なため、ウラン節約効果は最大でも2割程度にとどまり、ウラン資源全体の利用効率も1%未満にとどまる。軽水炉は、ウランのおいしい部分をほんの少しだけつまみ食いして捨ててしまう、大変な「ウラン食い散らかし炉」であり、再処理・リサイクル方式をとった場合でも、その基本的性格を根本的に改善することはできない。

(2)ウラン利用の理想体系は高速増殖炉サイクル

第2次世界大戦中の1944年春、米国のマンハッタン計画をけん引した頭脳集団ともいえるべきシカゴ大学冶金学研究所の研究者たちは、戦後に進めるべき平和利用の新型原子炉開発に関する検討を約3ヶ月間にわたって行った。この検討をリードしたのはエンリコ・フェルミであった。彼らの検討課題の一つは、当時希少資源とみなされていたウランから、最大限有効に核分裂エネルギーを取り出す方法であり、そのためには、非核分裂性のウラン238をプルトニウムに変換しながら燃やすことが必須の要件と考えられた。それを最も効率よく実現する原子炉として、1944年4月26日の会合でフェルミが提示したのが高速増殖炉の概念である¹⁾。

米国では、戦後直ちに高速増殖炉の研究開発が開始され、アイダホの砂漠の中に小さな発電機を備えた実験用の高速増殖炉 EBR-I が建設され、1951年12月にはじめて4個の電灯を灯すことに成功した(図2)。人類最初の原子力発電は高速増殖炉で行われたのである。高速増殖炉は端的に言えば「ウラン資源をプルトニウムに変換しつつ燃やし尽くす炉」で、ウラン資源の利用効率は工程ロスなどを考慮しても軽水炉の60倍以上と飛躍的に向上する。実際にウラン U-238 をプルトニウムに変換しながら燃やすためには、再処理や MOX 燃料製造などの工程が必要であり、これらも含めた全体体系を「高速増殖炉サイクル」と呼ぶ。

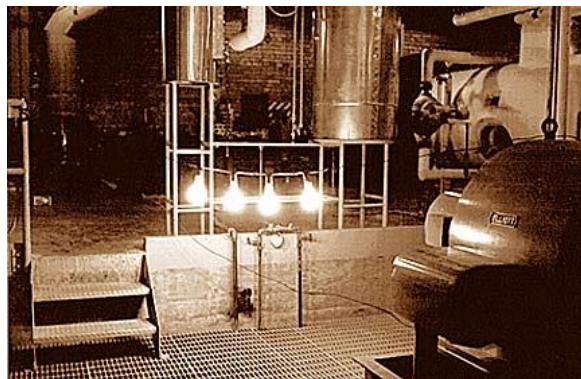


図2 EBR-Iにおける世界最初の原子力発電(1951年12月20日)

英国、フランス、ソ連も早くから高速増殖炉開発に着手し、1970年代にはいずれも原型炉を稼働させている。米国でも原型炉の建設が進んでいたが、1977年のカーター政権による政策変更で建設が中断された。

こうした中、我が国でも1960年代から高速増殖炉の設計研究が始まり、1977年4月に実験炉「常陽」が初臨界を達成した。その後原型炉「もんじゅ」を建設し、発電も開始したが、全出力を達成する前に2次系のナトリウム漏れを起こし(1995年12月)、情報開

示の不手際から社会問題化し、長期の停止を余儀なくされた。「もんじゅ」は、事故から14年以上を経た2010年5月に一旦は性能試験を再開したが、同年8月に起きた炉内中継装置の落下で再び停止に追い込まれた。このトラブルと、この間に発生した東電福島第一原子力発電所事故の余波で、プラント停止状態の長期維持を余儀なくされたことから、現場で点検工程の先送りが行われた。しかし、その際に必要な工程変更手続きが取られていなかったことから、事故後新たに発足した原子力規制委員会から重大な保安規定違反と糾弾され、その問題收拾が図れないまま、政府は2016年12月に「もんじゅ」を「廃炉」とする決定を下した。

(3) 軽水炉導入期における再処理・リサイクルの意義とその後の変遷

前述のように、軽水炉は、元来再処理・リサイクル路線とはそれほど相性の良いシステムとは言い難く、資源有効利用の観点からのメリットもあまり大きくはない。それにもかかわらず軽水炉においても再処理・リサイクル路線が追求されてきたのには3つの理由があった。

その第一は、戦後原子力平和利用が開始された当初は、ウランは希少資源とみなされていたことから、いずれの形式の原子炉においても原子炉運転の副産物として生まれるプルトニウムの再利用は、ウランからエネルギーを有効に取り出すうえでの当然の手段と考えられていた。このため、1970年代中頃までは、米国や欧州の原子力利用先進国はいずれも意欲的な商業用再処理計画を持っていた。そうした風向きを一変させたのは、1974年5月のインドの核実験であり、プルトニウム民生利用の核拡散リスクに強い危機感を抱いた米国は、1977年に商業用再処理や高速増殖炉計画の放棄を決定した（カーター政権による核拡散防止を最重要視した原子力政策の転換）。使用済燃料の直接処分という概念はインドの核実験を契機に浮上した概念であり、カーター政権の決断によって米国の国策として定着したのである。

その第二は、軽水炉が世界的に普及し始めた1960年代後半から1970年代中頃までは、西側の低濃縮ウラン供給源は、もともと軍用であった米国のガス拡散濃縮工場でのみで供給能力のひっ迫が予見されており、その緩和策としてプルトニウム利用が推奨されていたためである。実際カーターによる政策変更の直前までは、米国は日本に対するウラン濃縮役務契約の条件として「プルトニウム利用を促進する」という誓約書をとっていた。また、米国自身、1960年代後半から軽水炉での大規模なMOX燃焼実証試験を開始しており、1976年にはGESMOと呼ばれた包括的な環境影響評価報告書を取りまとめ、MOX燃料の本格利用体制を整えつつあった²⁾。

その第三は、1970年代の原子力利用先進国では、いずれもウラン資源利用の究極的な姿は高速増殖炉であるとの認識が共有されており、その開発に邁進していたことが挙げられる。軽水炉使用済燃料再処理には、やがて来る高速増殖炉時代に必要なプルトニウム供給手段としての期待も込められていたのである。

以上のような軽水炉導入期に存在していた再処理推進を正当化する環境条件は、その後の原子力を取り巻く情勢変化の影響を受け、大きく変質していった。1970年代にウラン資源開発が進み生産量が急増した一方で、1979年3月のTMI事故の影響で特に米国における原子力発電の伸びが停滞した結果、ウランの需給関係が大きく緩み、ウラン価格が大幅に下落した。1986年4月に起きたチェルノブイリ事故はウラン価格をさらに下落させ、その後15年以上にわたる価格低迷時代を生んだ。こうした状況は、「ウラン資源節約」（あるいはウラン利用効率向上）という再処理推進理由の説得性を著しく低下させた。

また、1970年代末期に遠心分離技術によるウレンコの濃縮事業が開始された。さらにフランス、ベルギー、イタリア、スペイン、イランの五ヶ国合同出資でフランスが建設したユーロディフのガス拡散濃縮工場も運転を開始したことで、濃縮役務能力不足が解消され、その点からのMOX燃料利用のインセンティブも消失してしまった。

2. 我が国の核燃料サイクル政策

(1) 我が国の核燃料サイクル政策とその歴史的経緯

冒頭で、我が国では、原子力利用開発開始の当初からウランの利用効率を高める「再処理・リサイクル方式」を選択してきたと述べたが、それは単に当時の世界的潮流に従ったにすぎず、直接処分方式との間での二者択一的選択を意識的に行ったわけではない（そもそも、1970年以前には直接処分という概念がなかった）。とはいえ、ウランも輸入に頼る我が国では、再処理・リサイクル方式確立は原子力利用開発の長期目標の主軸をなし、我が国最初の原子力発電所である日本原子力発電株式会社（日本原電）東海発電所（原子炉は英国からの導入の黒鉛減速炉）の建設開始（1960年1月）の3年後には、当時の原子燃料公社で東海再処理工場の設計が開始された。

また、1964年9月に開かれた第3回ジュネーブ会議で明らかにされた欧米における高速増殖炉などの意欲的な開発状況に触発され、我が国でも高速増殖炉や新型転換炉の設計研究が加速され、1967年10月の動力炉・核燃料開発事業団（動燃）の設立とともに、それらはナショナルプロジェクトに格上げされ、高速実験炉「常陽」や、新型転換原型炉「ふげん」の建設へと発展していった。当時の海外の核燃料事情の評価などから、核燃料サイクルの自立的体制確立の重要性が指摘され、1968年6月に原子力委員会が策定した「核燃料政策の基本方針」で、海外ウラン資源開発、濃縮技術開発、プルトニウムの軽水炉での利用（今日のいわゆるプルサーマル利用）技術開発などの具体的方針が示された。また、第二再処理工場を民間主体で建設・運営するための責任体制や環境整備の検討を進めるとの方針も示された。

1973年暮に始まった石油危機は原油価格を急騰させ、世界経済を大混乱に陥れた。我が国では、エネルギー安全保障の強化が強く求められ、1975年12月に策定された「総合エネルギー政策の基本方向」で、脱石油依存の重要な柱の一つとして原子力発電を積極的に拡大することが国策として決定された。その際に原子力発電を安定的に進めるためには、自立した核燃料サイクルの確立が重要との認識が再確認され、核燃料サイクルの各分野の事業化の在り方や官民の役割分担を明確化にするため、原子力委員会は「核燃料サイクル問題懇談会」を設けた。同懇談会は1976年8月に中間報告を取りまとめた。その主要な結論は以下の3点に整理できる³⁾。

- ① 天然ウラン確保は開発輸入に力点を置く。20年後の年間所要量の1/3程度を海外開発で確保。電力はこれら開発の製品引取りで開発を支える。

- ② ウラン濃縮では新規需要の1/3を国内でまかなう。52年度から国（動燃）がパイロットプラントを建設。民間はその後の事業体制確立を図る。
- ③ 第二再処理工場の建設・運転は電力を中心とする民間事業とし、事業準備の機関を発足させる。

こうして我が国が、国の積極的な支援の下で民間事業として濃縮事業や再処理事業を進める意志固めをし、それを具体的に進めるための体制づくりの準備が始まった矢先の1977年1月、米国では民主党のカーター政権が発足し、プルトニウムの民生利用を全面的に否定する劇的な原子力政策変更を発表した。当時我が国では東海再処理工場がウラン試験を終え、実際の使用済燃料を使うホット試験開始直前であったが、当該燃料の供給国である米国は日米原子力協定に規定されていた事前同意条項に基づいて試験開始に待ったをかけてきた。こうして始まった日米再処理交渉では、日本側の挙国一致体制での取り組みにより、何とか日本側の主張を通し、当面回収されるプルトニウムは溶液のまま貯槽に溜めて外に持ち出さないことを条件に、2年間で99トンの処理を行うことについて米国の同意を得ることに成功した。その同意を受け、東海再処理工場は1977年9月からホット試験を開始した⁴⁾。

一方、カーター政権は同年10月からIAEAに国際核燃料サイクル評価（INFCE）という大々的な検討会議を設け、世界的な再処理自粛を目論んだが、日欧が再処理支持で結束したため、2年間にわたる検討は、厳格な保障措置の適用でプルトニウム民生利用と核不拡散は両立しようという内容の結論に落ち着いた⁵⁾。INFCEは、核燃料サイクルの世界ではいわば天下分け目に戦いの場であり、その大事な時期に我が国が東海再処理工場のホット運転を開始でき、濃縮パイロットプラントの運転開始も間に合わせる事ができたことは、日本が非核兵器国として唯一再処理や濃縮を含む核燃料サイクルを全面的に進める国として国際的に認知される決定的要因となった。この間我が国は、核拡散防止条約を批准するとともに（1976年6月）、原子炉等規制法を改正して民間による再処理事業に道を開き（1979年5月）、現在の日本原燃株式会社の母体となる組織作りに拍車をかけた。

以上のように、我が国では、石油危機と日米再処理交渉・INFCEという2度の大きな洗礼を受けることで、自立的で閉じた核燃料サイクルを国策民営で進める意志固めができ、1980年代にその体制づくりが進み始めた。1985年4月には青森県と六ヶ所村がいわゆる三点セット（再処理、濃縮、低レベル放射性廃棄物埋設）の立地受入を決定したことで、巨大な核燃料サイクルセンターの建設用地が確保できた。また6年間にわたる交渉の結果1988年7月に日米原子力協定が改定され、包括同意方式が導入されたことで、核燃料サイクル事業がより円滑に進められる環境が整えられた。こうして六ヶ所村では、1992年に日

本原燃のウラン濃縮工場と低レベル放射性廃棄物埋設センターが操業を開始し、1993年4月には六ヶ所再処理工場の建設が開始された。

(2) 揺らぐ政府の核燃料サイクルに対する姿勢

2011年3月の福島第一原子力発電所事故の深刻な影響は、国民に大きな衝撃を与え、世論は脱原発に大きく傾いた。そうした風潮は、再処理・リサイクル方式を前提とした核燃料サイクルに対しても厳しい逆風を生んだ。現行核燃料サイクルに対する逆風は、一般的な脱原発ムードに加え、

- ① ガラス固化工程のトラブルやその後に加わった新規規制基準対応などによる六ヶ所再処理工場竣工時期の大幅かつ度重なる遅れ
- ② 2016年12月のもんじゅ廃炉決定が生んだ、閉じた核燃料サイクル完遂に向けての政府の本気度への疑念や、核燃料サイクル政策が破綻したとの風説
- ③ 日米原子力協定の延長問題に絡み、六ヶ所再処理工場の運転開始阻止を目論む脱原発論者とそれに同調する米国再処理反対論者たちによる日本のプルトニウム保有や再処理事業に対する様々なネガティブキャンペーン

などによって一層厳しいものになった。

特に③のキャンペーンで日米の再処理反対論者たちは、我が国が保有する47トンのプルトニウムは原爆6000発に相当し、国際社会に懸念をもたらすとの主張をメディア上で繰り返し発信するとともに、米国政府へのロビー活動を積極的に展開した。その影響を受けた米国政府は2018年6月初旬にプルトニウム保有量削減を日本に求めてきた(6月10日日本経済新聞ほか)。その要請に応え日本政府は、日米原子力協定自動延長を目前に控えた7月3日に閣議決定した第5次エネルギー基本計画に急遽「プルトニウム保有量の削減に取り組む」ことを書き加えた。また、原子力委員会も7月31日に「我が国におけるプルトニウム利用の基本的考え方」(基本的考え方)を改訂し、プルトニウム保有量減少や「プルサーマル実施に必要な量だけ再処理」することを明記した⁶⁾。

六ヶ所再処理工場は新規規制基準対応で大幅な遅れを生じていたが、2020年7月に基準対応の事業変更許可が得られ、2022年度上期竣工に向けた準備が鋭意進められている。しかし原子力委員会の新たな「基本的考え方」の適用は、今後再処理工場が運転開始をしても、年間処理量に関してきわめて硬直的で抑制的な操業を強いることになる。2021年5月時点では全国の原子力発電所サイトにおける使用済燃料貯蔵量は平均で管理容量の76%に達しており、一部の発電所では90%を超えている。その結果、プルサーマルが進まない発電所では、使用済燃料排出が滞り、運転停止を余儀なくされる事態も予見される。

「基本的考え方」はその対策として、使用済燃料貯蔵能力の拡大を要請しており、電力各

社ともそのための努力を継続しているが、再処理を約束しない中間貯蔵施設の新規立地は現実にはきわめて難しい。

そもそも我が国が保有するプルトニウムはいわゆる原子炉級プルトニウム（ほとんどが軽水炉由来）であり、発熱が大きいなどの問題から、ミサイルへの搭載が可能な実用的な核兵器製造には全く適さず、その現実的な利用価値は核燃料（エネルギー資源）としての利用にしかない（注1）。その意味で、我が国が国内外に保有する47トンのプルトニウムを原爆6000発分とするのは、きわめてミスリーディングな表現と言わざるを得ない。実用的な核兵器への転用価値が無い一方で、エネルギー資源としての価値がきわめて高いプルトニウム（47トンのプルトニウムは、エネルギー的には30万トン石油タンカー170隻分の原油に相当）を、資源小国日本が今後のプルスーマル利用や将来の高速炉増殖燃料用（47トンのプルトニウムで、100万kWの高速増殖炉を3基立ち上げることができる）として備蓄しておくことは本来であれば決して非難されるべきことではない。

我が国の原子力活動における核不拡散義務履行については、長年IAEAから高い評価を得てきており（注2）、毎年度公表される「保障措置声明」でも明らかなように、我が国では核物質不正転用の兆候がまったくないことがIAEAによって毎年しっかりと確認されている⁷⁾。また我が国では、①原子力基本法で「平和利用に限る」ことを明記している、②政府として、歴史的に「非核三原則」を内外に表明している、③核拡散防止条約に非核兵器国として加盟しており、すべての原子力活動はIAEAの厳しい監視下（査察など）におかれている（不正な核開発に手を染めれば直ちに安保理での制裁が下る）、④米国などの二国間協定でも厳しく縛られている、⑤日本の原子力活動は100%ガラス張り、立地地元との関係も含め、国民や地域住民に公表された計画以外の原子力活動を無断で行えない構図が出来上がっている、などで、隠匿した活動で突然核兵器開発に暴走するということはあり得ない。日本国民は、北朝鮮とは違い完全にグローバル経済の中で生きており、エネルギー資源は9割以上、食料については約6割を輸入に頼っていることから、国際的孤立（経済制裁）には全く耐えられないのは明白である。

こうした点を冷静に考えれば、2018年7月に原子力委員会が決定した「基本的考え方」は、明らかに無用の過剰対策であり、一方で健全な原子力事業推進の大きな足かせとなるので、国益の損失に他ならない。わが国が保有するプルトニウムに関する上述のような実態を、米国との交渉担当者がきちんと主張しえなかったことは、国民に対する大きな失策と言えよう（注3）。

確かに、福島第一発電所事故後のトラウマで、原子力発電所の再稼働が遅れ、それに伴いこれまで計画してきたプルスーマル計画も大きく遅れこんでいるので、プルトニウム消

費の見通しが不鮮明になっているのは事実である。しかし、わが国は2020年10月に2050年カーボンニュートラル宣言を行い、2021年4月22日に開かれた気候変動サミットでは2030年の温暖化ガス排出削減目標を46%（2013年度比）とすることを表明している。この目標達成のためには、パリ協定への対応上設定した2030年における原子力発電比率20～22%をぜひとも達成する必要がある。そのためには国が前面に出て国民の事故トラウマ解消を促し、原発再稼働とプルサーマル利用拡大（注4）の後押しを強力に進める必要がある。

6章で後述するように 軽水炉サイクルは、その後ろに高速炉サイクルがつながることによって完結する。2016年12月の政府によるもんじゅ廃炉決定は、日本が本気で核燃料サイクルを完結する意志を放棄したかのような印象を内外に広めた。そのことが国際的に「日本は大量にたまったプルトニウムをきちんと後始末できるのか？」という疑念を生む根本原因となっている。原子力への逆風が依然として強い中、政府の腰が引けるのはわからないでもないが、我が国のプルトニウムに関する国際的な懸念を根本的に解消するためには、適切なタイミングで高速炉を含む核燃料サイクルの長期ビジョンを再構築し、閉じた核燃料サイクル推進に向けたしっかりした意志表明を行うことが求められる。

（注1） 燃焼度5万MWd/tの軽水炉使用済燃料から回収されるプルトニウム8kgの発熱は約150Wになる。爆縮型の原爆では、プルトニウム球を高性能火薬で包むが、150Wもの発熱体を埋め込めば、火薬は高温で不安定化してしまう。こうした材料をまともな国家が国防用兵器に使うはずがないし、現実に原子炉級プルトニウムを用いた核実験例は世界中で一件もない。なお、実際の核兵器におけるプルトニウムの発熱は8W以下と言われている。

（注2） 2004年に日本に対し統合保障措置の適用が開始されたが、それはIAEAが長年にわたる綿密な調査の結果、日本では核燃料物質が不正転用される恐れはないと公式に認めた結果である。当時日本はすでに40トンを超えるプルトニウムを保有していたが、IAEAの保障措置制度の下で厳格に管理されているプルトニウムは国際社会の懸念材料にはならないことの証左といえよう。同年9月のIAEA総会でエルバラダイ事務局長は「日本が、先進的な核燃料サイクルを進める国として統合保障措置の適用を受ける最初の国になったことをお知らせでき、大変喜ばしい」と述べている。

（注3） 北朝鮮の核実験や相次ぐ弾道ミサイル実験で国際緊張が高まる中、2015年10月に開かれた国連軍縮委員会で中国の傅聡軍縮大使は、自国の不透明な核兵器増産を棚に上げながら「日本は大量のプルトニウムを所有しており、大量の核兵器を作るのに十分な量だ。核不拡散体制への大きなリスクだ」などと陰湿な日本批判を繰り返した。こうした背景もあり、翌年12月にウィーンで開かれた核セキュリティ国際会議では、参加した藪浦外務副大臣と米国エネルギー省のモニツ長官

が二者会談を行い、両国間の確認事項「核セキュリティ協力に関する日米ファクトシート」を公表した。そこでは、日本のプルトニウム管理に関して次のように記し、無用の懸念払拭に努めた。

「米国は、日本が最先端の保障措置を原子力施設に適用し、プルトニウム国際管理指針に沿ったプルトニウム保有量の報告を毎年行うことで、原子力政策における透明性の模範であると考えてる。

両国は、日本のプルトニウム管理に関する懸念には与しないことを強調する。」

歴史的にプルトニウム民生利用に反対の立場をとる民主党のオバマ政権との間で取り交わしたこのような重要な確認文書を、残念ながらその1年半後に反故にしてしまい、日米の再処理反対派が煽り立てた国際懸念に屈してしまったのが2018年7月のプルトニウム保有量削減方針のエネルギー基本計画への追記と原子力委員会決定である。詳述は避けるが、そうした失政を招いた原因の一つは北朝鮮問題で迷走したトランプ政権の粗雑な外交であり、もう一つは日本の外務大臣が確信的再処理反対論者である河野太郎氏であったという不幸なめぐり合わせであったといえよう。

(注4) 電気事業連合会は、2020年12月に公表した文書「新たなプルサーマル計画について」で、稼働する全ての原子炉を対象に一基でも多くプルサーマルが導入できるよう検討し、2030年度までに、少なくとも12基の原子炉で、プルサーマルの実施を目指すとしている。

3. 再処理方式と直接処分方式のバックエンド的視点での特性比較

再処理方式と直接処分方式の比較は、伝統的には主に資源有効利用、すなわちフロントエンド的視点と、経済性の視点で議論されてきた。しかし、今日では持続性のある人類社会実現を目指し「循環型社会」を形成するための努力はすべての産業・経済活動において追求されるべき重要な世界的規範となっており、環境への負荷低減はそのための重要な考慮要件となっている。そこでここでは、廃棄物処分における環境負荷低減要求への適合性の観点、すなわちバックエンド的視点で核燃料サイクルの二つのオプションの特性比較を試みる。

(1) 高レベル放射性廃棄物の発熱と処分場の必要面積

高レベル放射性廃棄物（高レベル廃棄物）の処分については、廃棄物（ガラス固化体）を数十年地上保管して崩壊熱が一定レベル以下になるまで待った後、地下深部の安定した岩盤中に埋設する、いわゆる地層処分という方式がとられる。高レベル廃棄物は、オーバーバックと呼ばれる金属製の外筒内に密封後、地下坑道中に掘削した処分孔内に定置されるが、処分孔とオーバーバックの間には一定の空隙を設け、その空隙に粘土の一種であるベントナイトを主成分とする緩衝材で埋める（図3）。緩衝材は岩盤とオーバーバックの直接接触による荷重発生を回避するクッションの役目を果たすが、地下水の浸透を防ぎ、放射性核種の溶出や拡散を抑える重要な役割も併せ持っている。その重要な機能を長期にわたり保証するためには、緩衝材の変質を避ける必要がある。そのためにはその温度をある限度以下に抑える必要があり、わが国ではその制限値を暫定的に100°Cとしている。この制限温度を守るため、残留発熱の程度に応じ、埋設廃棄物間にある間隔を保持する必要が生ずる。このため、埋設時の廃棄物の残留発熱は、処分場の必要面積を決める重要な設計因子の一つとなる。

図4は、ガラス固化体の発熱量を、仮想的に標準値の1.5倍と2倍に増やした場合の緩衝材最高温度を試算した一例であるが、前者の場合で約2倍、後者の場合は約5倍に埋設面積を増やさないと最高温度を制限値100°C以下に保てないということがわかる。このように、処分場の必要面積は廃棄物の発熱に大きな依存性を示す傾向がある。図5は、ガラス固化体と使用済燃料の崩壊熱（ウラントン数で規格化）の比較を示すが、後者ではプルトニウムやアメリシウムなどの発熱が加算されるため、ガラス固化体のそれに比べ、50年冷却時点で約6割大きいことがわかる。

平成24年に、原子力委員会の下に原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会が設けられ、ここで核燃料サイクルのオプションに関する包括的な比較評価が行われた。そ

の際に行われた高レベル廃棄物の処分場面積の評価結果が図6で、直接処分（図中のワンスルー）の場合は、ガラス固化体処分（図中ではMOXリサイクル）に比べ3倍近い面積を要することが示されている。図5に示された発熱の違いが、処分場面積にこのように大きな差を生み出しているのである。

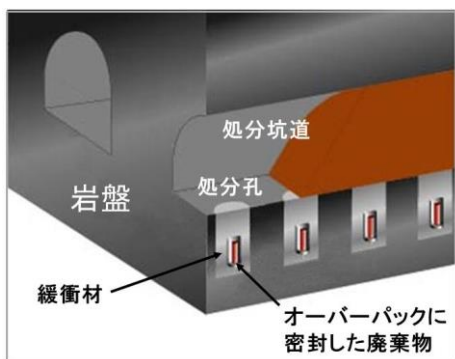


図3 地層処分の概念図

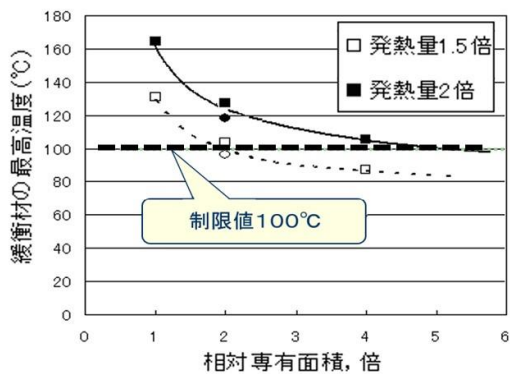


図4 発熱と処分場専有面積

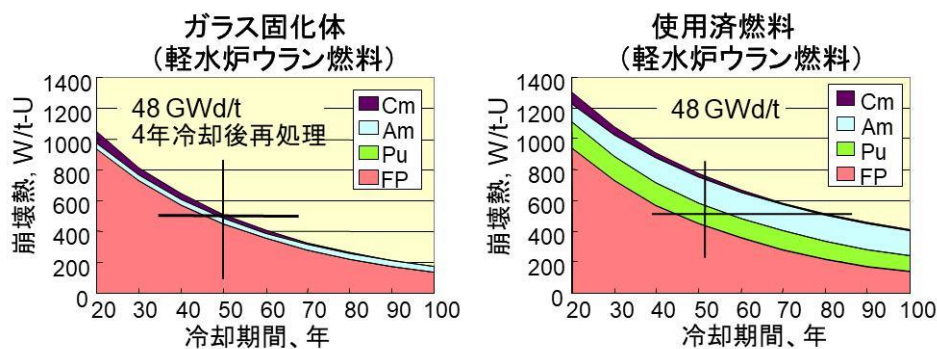


図5 ガラス固化体と使用済燃料の崩壊熱の比較
(ウラン1トンあたりで規格化)

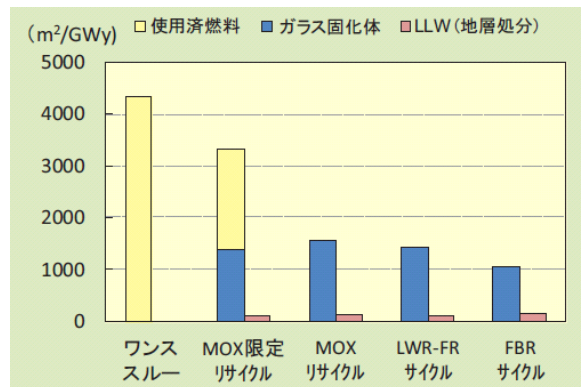


図6 単位発電量当たりの使用済燃料およびガラス固化体の処分場面積

フランスでは2006年廃棄物管理法制定の前年に、地層処分に関する総合的な技術報告書 Dossier 2015 が公表されているが、図7は同報告書に示されている処分場レイアウトの概念図である。同報告書では、フランスが再処理方式を今後も堅持する場合と、2010年以降直接処分方式に転換する場合の、両ケースのレイアウトを示しているが、直接処分方式に転じた場合は処分場の埋設エリアの面積が約3倍に増大することが示されている⁸⁾。

表1は、ベルギー、米国も加えた比較表である。それぞれ設計条件が大きく異なるので、直接比較するのは適当ではないが、再処理方式に比べ直接処分方式のほうがより大きな処分場面積を必要とするとの評価結果は共通で、ベルギーの場合は6倍にも増大している^{9, 10)}。

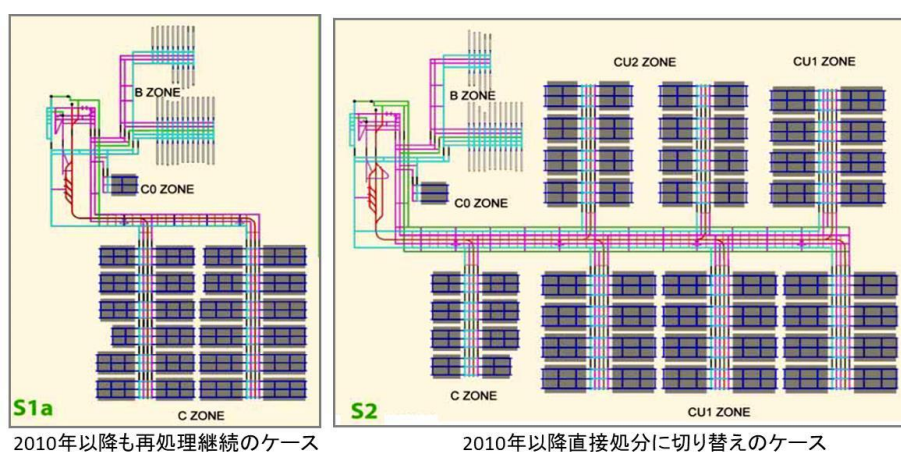


図7 Dossier 2015 における処分場レイアウト概念

表1 各国の処分場面積評価例一覧

評価例	処分場面積比 (直接処分／G固化体処分)
原子力発電・核燃料サイクル技術検討小委員会(H24.3)	2.7
フランス ANDRA Dossier 2005	約3
ベルギー ONDRAF SAFIR-2	6
米国 ANL/AFCI	5.7 (a)

(a) U, Pu, Am, Cm を 99.9 % 除去した場合

再処理方式では、いわゆる TRU 廃棄物と呼ばれる二次廃棄物が発生する(注)。TRU 廃棄物は、燃料溶解後に残る被覆管の切断片(ハル)や集合体部材、高レベル廃液以外の

様々な工程廃液を濃縮・固化したもの、操業や保守の過程で使われ、汚染したウェスやビニール、工具、交換部品など多種多様な性状と形態を有する。一般的に、可燃性廃棄物の焼却灰や濃縮廃液はセメント固化などで安定化させ、不燃性の固体廃棄物は圧縮減容をしたうえで、所定の容器（コンテナ）に密封する。容器の形状や大きさについては、必要に応じ何種類かが用意される。このような二次廃棄物の体積は当初の使用済燃料の体積よりも大きくなる場合があり、脱原発論者などからは、「再処理はかえって廃棄物を増やす」と批判されることがある。しかし現実には、二次廃棄物は発熱が小さいため、処分時には一か所にコンパクトに集中して埋設することができる。したがって TRU 廃棄物が必要とする処分面積は、ガラス固化体が占める処分面積の 1%程度にしかない。処分場の必要面積という観点からは、二次廃棄物発生を考慮しても、再処理方式のほうが小さくて済むという事実は全く変わらないのである。

廃棄物処分における環境負荷の大小を判断する指標は、処分場の必要面積と、そこに処分する廃棄物の毒性と考えるべきであろう。処分場面積から判断する限り、再処理方式のほうが直接処分方式よりも明らかに環境負荷が小さく、「循環型社会」形成という目標によりよく合致する選択肢といえる。

(注) 含有される放射性核種の濃度によって区分され、高いものは地層処分にまわされ、低いものは余裕深度処分にまわされる。

(2) 高速炉サイクルのガラス固化体の発熱特性と処分場面積

ここで、高速炉サイクルで発生するガラス固化体の発熱についても触れておく。図 8 に、高速炉の使用済燃料再処理で、マイナーアクチニド元素 (MA) の回収を行わない場合と、90%回収する場合とについて、発生するガラス固化体の崩壊熱特性（単位発電量あたりで規格化）を軽水炉のそれと比較して示した。高速炉の場合、炉心燃料とブランケット燃料があるが、ブランケット燃料中の高品位プルトニウム単独回収を回避するため、両者は再処理時に混合される。こうした事情も反映し、ここで示した崩壊熱特性は両者の混合廃液を固めた固化体の特性を示している。

MA 回収を行わない場合の高速炉ガラス固化体の特徴は、標準軽水炉固化体に比べてアメリカシウム（Am）の発熱寄与が相対的に大きい一方で、核分裂生成物 (FP) の発熱が半分程度しかないという点である。ここで FP 発熱が顕著に小さいのは、高速炉は軽水炉に比べ熱効率が 2 割近く高いため、同じ電力発生に必要な核分裂数とその分少なくて済むことに加え、プルトニウムの場合、FP 中の主要発熱元素の一つである Sr-90 の核分裂収率（核分裂による生成率）がウランよりも小さいことによる（図 9）。

高速炉サイクルの場合、再処理工程でMAの90%を回収・除去できれば、図8から明らかのように、ガラス固化体の発熱を、軽水炉の場合に比べ半分程度に抑えることができる。図10はJAEAが実施したケーススタディの一例であるが、MAリサイクルを行うことで、高速炉時代には、軽水炉時代よりも、高レベル廃棄物処分場の必要面積を半減できる可能性が示唆されている。軽水炉の直接処分と比べれば、同じ発電量で処分場面積は約六分の一で済むことになる¹¹⁾。MAリサイクルは従来廃棄物毒性低減の観点でその有用性が主張されてきた。その場合には99.9%以上の回収率が求められるが、発熱低減の観点から必要とする回収率は90%で十分であり、この程度であれば、工学的実現性も十分期待できる。発熱低減による大きな処分場面積抑制効果は、高レベル廃棄物処分事業の負担軽減に大きく役立つので、第一ステップとして、MA90%リサイクル技術の早期実用化に向けて真剣に取り組んでいただくことを期待したい。

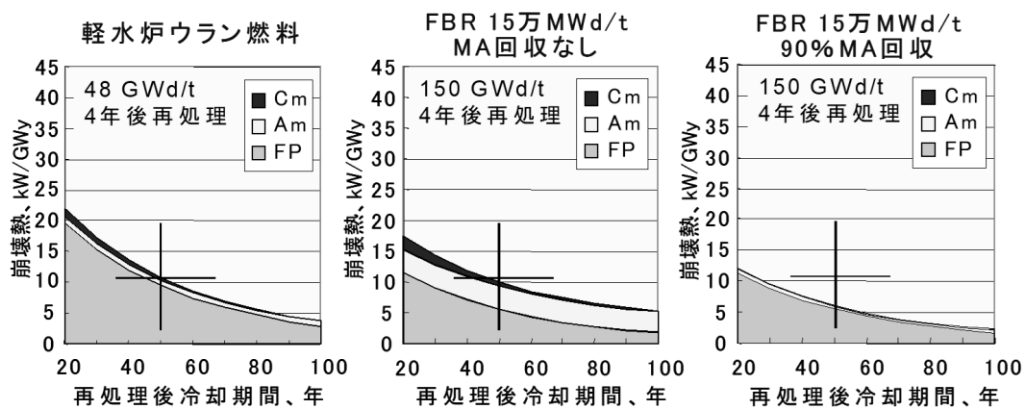


図8 高速炉サイクルで発生するガラス固化体の崩壊熱特性

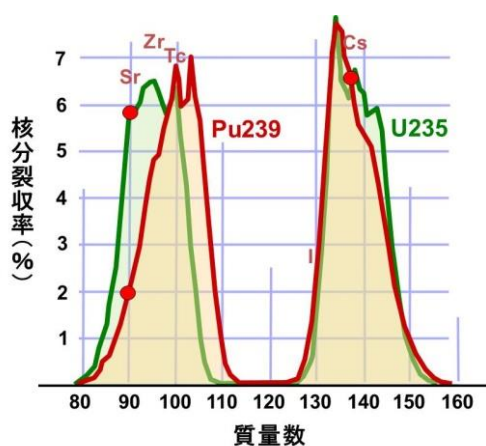


図9 U235 と Pu239 の核分裂収率

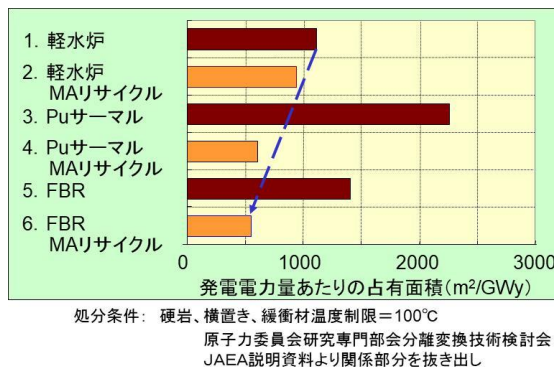


図10 MA 回収と処分場面積縮減効果

(3) MOX使用済燃料の発熱と処分

図11に炉取り出し後10年までの軽水炉のウラン使用済燃料とMOX使用済燃料の崩壊熱特性を比較して示す。前者に比べ、後者はFPによる発熱は若干小さくなるが、プルトニウムとキュリウムの大きな発熱が加わるため、10年冷却時点の発熱は前者の約2.5倍になる。図12は冷却期間20~100年間の比較を示すが、50年冷却時点で比べれば3.5倍以上になる。

このようなMOX使用済燃料は、直接処分を行う場合は、かなり厄介な廃棄物となる。前述のフランスの処分報告書 Dossier 2015 では、ウラン使用済燃料を直接処分する場合は、1本のキャニスタに集合体4本を収納して廃棄するが、発熱が大きなMOX使用済燃料は1本のみに制限するとしている。また、埋設前の標準冷却期間についても、前者の場合は60年とするが、後者については90年としている。冷却期間を5割伸ばしても、MOX使用済燃料は通常のウラン使用済燃料の4倍の処分面積を必要とするのである。もっとも、フランスでは、2006年廃棄物管理法制定時、再処理リサイクル方式堅持の方針を決めているので、MOX使用済燃料の直接処分はあくまでも仮想的な評価に過ぎず、現実には高速炉時代を迎えたときに必要となるプルトニウムの供給源として備蓄（長期保管）することになっている。

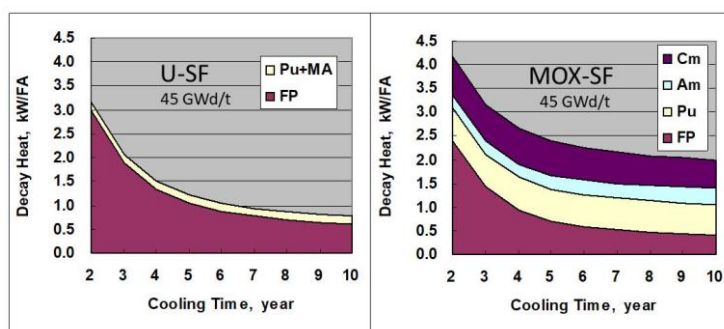


図11 ウラン使用済燃料とMOX使用済燃料の崩壊熱特性の比較
(冷却期間2~10年)

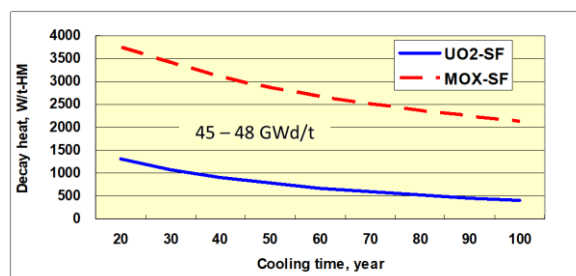


図12 ウラン使用済燃料とMOX使用済燃料の崩壊熱特性の比較 (冷却期間20~100年)

我が国が今世紀後半以降も長期にわたり原子力利用を続ける必要があるとすれば、適切なタイミングで高速炉サイクルへの移行（しばらくは軽水炉サイクルと共存）を進める必要がある。しかしながら、高速炉導入期に必要とするプルトニウムは、その時代に発生する軽水炉使用済燃料から回収できるプルトニウムでは、とても間に合わない。その問題を解決するのが、MOX使用済燃料の備蓄なのである。MOX使用済燃料はプルトニウム濃度が高く、少量の再処理で多量のプルトニウムが回収できるので、高速炉導入期の強力なプルトニウム供給源として役立つ。プルトニウムの品位は低下し、軽水炉へのリサイクルには不向きになるが、高速炉なら問題なく使用できる。軽水炉時代のプルスーマル利用は、高速炉導入期に必要となるプルトニウムの大変効果的な備蓄手段として重要な意味を持つのである。しかも備蓄するプルトニウムは、通常の原子炉級プルトニウムよりも品位が低下しているので、核不拡散上の観点からも優れた備蓄法なのである¹²⁾。

我が国では、MOX使用済燃料について、2005年に原子力委員会が策定した原子力政策大綱で、当面長期保管とし、その後の処理方策については2010年頃から検討を開始するとされた。実際、そのための検討準備が開始されたが、その直後に東日本大震災が起これ、福島第一原子力発電所事故の影響で中断されたまま今日に至っている。その結果、長期保管とされるMOX使用済燃料のその後の扱いが不透明なままになっており、そのことが再処理を前提とする核燃料サイクル政策への不信を生む要因の一つにもなっている。しかし、上述のようなことを踏まえれば、MOX使用済燃料の長期保管は決して問題の先送りを意味するのではなく、高速炉時代への橋渡しとして必要なプロセスなのである。事故後の原子力への逆風で、原子力の長期政策検討はむつかしい雰囲気が続いているが、上述のような懸念や不信を払拭するためにも、適切なタイミングで高速炉を含む核燃料サイクルの長期ビジョン検討の場を立ち上げることが望まれる。

(4) 廃棄物毒性の観点からの比較

高レベル廃棄物の地層処分では、しばしばMA回収による廃棄物の毒性低減効果（あるいは、それに伴う有意な毒性継続期間の短縮効果）の有用性が議論される（図13）。しかし、そこで議論される毒性は、廃棄物が持つ潜在的毒性であり、地層処分の安全性がその大小によって決まるわけではない。地層処分の安全性は、廃棄物の潜在的毒性（いわば“ソースターム”）とその特性を踏まえた防護手段との組み合わせで決まる人や環境への影響度の大小で決まるものであり、具体的には、個人線量が代表的な安全指標となっている。図14は、2000年頃までに行われた主要国における地層処分の予備的安全評価結果をまとめたものであるが、おおむね100万年までの間に予想される個人線量のピーク値を生む主要影響核種は、I-129、Cs-135、Cl-36、Se-79などといった非アクチニド系核種であることがわかる。これは、廃棄物中のアクチニド系核種は難溶性の酸化物の形態で存在

し、不変の原理である「溶解度制限」によって地下水への溶出が極めて低く抑えられるので、地下深部埋設後は、生物圏への有意な影響要因にはならないという事実を反映している。地層処分事業推進上最も困難な課題は国民や地元住民との合意形成であり、毒性低減は、それを進める上での障壁を和らげる「安心材料」として有用性が認識されているのであるが、毒性低減をどこまで真剣に求めるかは、技術上の判断ではなく、極めて政治的な判断といえるであろう（注）。

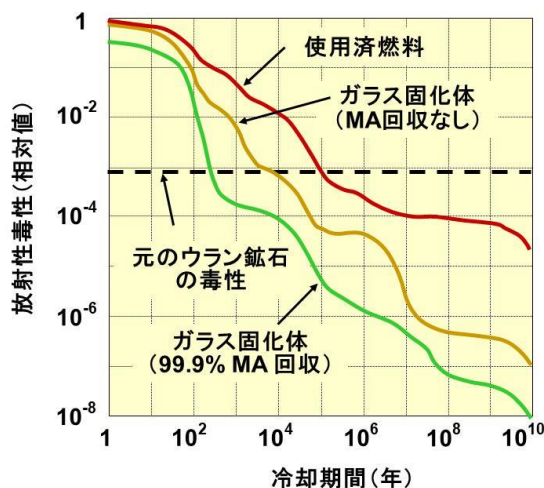


図13 廃棄物の潜在的毒性

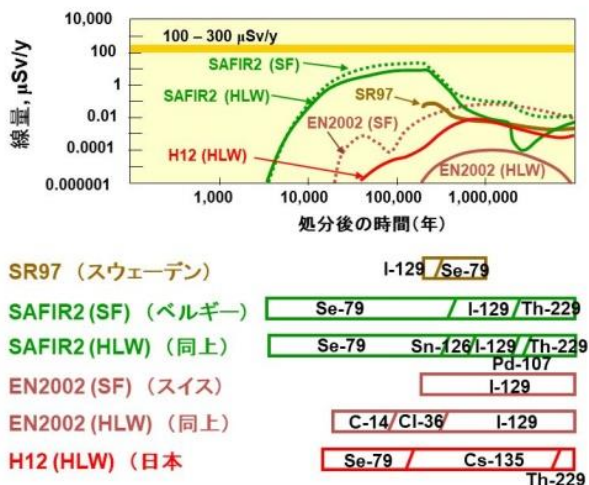


図14 個人線量への主要影響核種

図15左は、図13と同じ内容を縦軸を線形表示にし、主要組成別に示したものであるが、使用済燃料の冷却初期段階の潜在的毒性のほぼ半分はプルトニウムに由来することがわかる。核分裂生成物 (FP) の毒性は100年程度の間急速に減衰し、図15右から明らかのように、1000年から10万年の間は毒性の9割以上をプルトニウムが占めることになる。したがって、廃棄物の毒性低減の観点からすれば、再処理を行って廃棄物からプルト

ニウムを取り除くことが最も効果的なことが歴然としている。東日本大震災以来広がった脱原子カムードの中で、再処理不要論が高まっている。しかし、直接処分への転換は、廃棄物の毒性を一桁高めることになり、毒性低減待望論とは全く反対の選択を強いることになる。もっと端的には、直接処分は、再処理反対論者がしばしば訴える「猛毒のプルトニウム」を、そのまま「あなたの裏庭」に埋めさせもらう処分法なので、処分場立地の困難性が一段と増すことは想像に難くない。この点は、我が国で直接処分を検討する場合に、忘れてはならない重要課題の一つである。

先に廃棄物処分における環境負荷の大小を判断する指標は、処分場の必要面積と、廃棄物の毒性であるとしたが、第2の指標である廃棄物の毒性の点から見ても、再処理方式のほうが直接処分よりも明らかに環境負荷が小さく、「循環型社会」形成という目標によりよく合致する選択肢なのである。

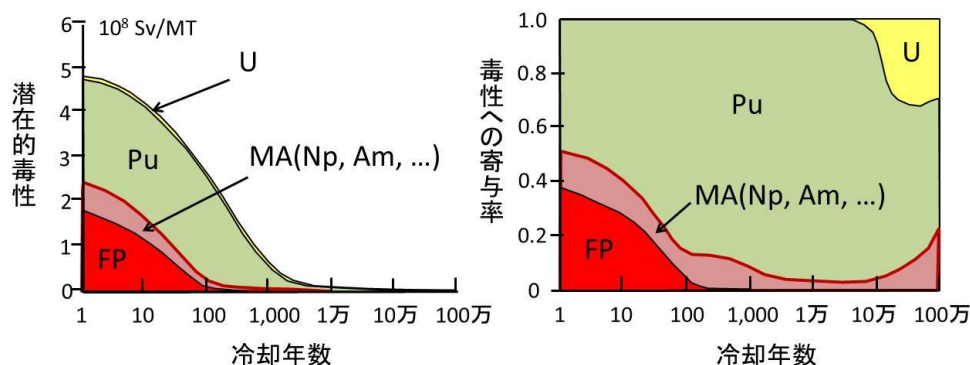


図15 使用済燃料の毒性の経時変化と内訳
(ガラス固化体の毒性は上図のFPとMAのみになる)

(注) 毒性低減が安全性に直結するケースが一つだけある。それは地層処分の安全評価で「人間接近シナリオ」と呼ばれるケースで、地下埋設した廃棄物を誤って掘り出してしまうケースや、隆起浸食により、例えば100万年後に埋設廃棄物が地表露出してしまうケースである。こうしたケースは「稀頻度事象」に分類され、線量基準もそれ相当に緩和されるので、その評価結果が毒性低減策（MA回収）実施要求につながる可能性は小さい。

(5)使用済燃料中間貯蔵の必要容量

2021年3月時点で全国の原子力発電所で保管される使用済燃料の総量は、約16,000トンで、使用済燃料プールの総管理容量（約21,000トン）の76%以上を占める。このほか、六ヶ所再処理工場の受入貯蔵プールに約3,000トンが保管されており（ほぼ満杯状態）、合計すると約19,000トンにのぼる。

第5次エネルギー基本計画では、2030年の発電における原子力比率を20～22%としている。その上限側をとった場合に原子力発電所から毎年排出される使用済燃料は約630トンと見積もられる。

以下仮定の話になるが、従来の再処理リサイクル政策を破棄し、直接処分政策に転換するとした場合、今後発生する使用済燃料はすべて中間貯蔵する必要があり、その期間は最低でも50年間となる（フランスでは60年としている）。単純に毎年630トンの使用済燃料排出が続くとすれば、その間に必要とする中間貯蔵施設の総保管容量は、3万トンを上回り、現在むつ市に建設中のリサイクル燃料備蓄センター（RFS）相当の施設を10基以上必要とすることになる（5年に1基ずつ建設）。直接処分を前提とした中間貯蔵施設は、処分が進まないことにより永久貯蔵施設化するリスクが高いことは関係する住民にも容易に想像できることであり、その分再処理を約束した中間貯蔵施設に比べ、立地の困難性は格段に増すであろう。したがって、直接処分への転換は、地層処分場の立地の困難性上昇と、その前段で確保すべき多数の大型中間貯蔵施設の立地困難性の2重の苦しみを背負うことになる。

一方、再処理リサイクル政策を堅持した場合でも、現下の発電所における使用済燃料管理容量のひっ迫を考慮すれば、一定の中間貯蔵能力確保は喫緊の課題であるが、再処理工場稼働を前提とすれば、その必要容量はミニマムで済む。また、再処理に伴い発生するガラス固化体の貯蔵施設については、すでに一部は整備済みで、40年間の操業で発生する全量貯蔵（貯蔵施設は順次増設）のための敷地がすでに確保されている。

仮に大規模中間貯蔵施設10基を日本の各地に建設するとしても、それがただちに過剰な環境負荷をもたらすことにはならないだろうが、放射性廃棄物施設という特殊性によって、立地の困難性など、社会的側面でもみた国民の負担は容易に受容しがたいレベルになる。そうしたことを考慮すれば、再処理リサイクル政策の堅持は、はるかに国民負担が小さく、それゆえ「持続性ある人類社会実現」という目的との整合性という点でより優れた選択肢と言える。

なお、直接処分に切り替えると、これまで再処理で回収され、国内外に保管されているプルトニウムの処分方針も決めなければならない。海外への譲渡、ガラス固化後深地層処分などいくつかの選択肢が考えられるが、技術的にも社会的受容性の観点からも実現へのハードルは極めて高い。直接処分への切り替えにあたっては、こうした困難な課題を背負い込むことになることも覚悟しなければならない。

4. 核不拡散性の観点からの二つの選択肢の比較

(1) 核不拡散問題から見た二つの選択肢の特徴

米国では、1974年のインドの核実験（プルトニウム使用）で受けた衝撃から、1977年の政権交代で発足した民主党のカーター政権が、核不拡散最重要視の直接処分政策に転じ、当時進んでいた大型商用再処理工場計画や高速増殖炉開発計画を破棄した。それ以来米国は伝統的に直接処分政策を堅持している。直接処分方式の核不拡散上の利点は、使用済燃料自体が強い放射能を持つことと、それらを地中深く埋設して隔離することで、人間の接近を二重に困難にし、したがってプルトニウム回収を困難にすることにあるとされている。

カーター政権は、再処理を含む民生用プルトニウム利用の核拡散リスクを受忍できない重大なリスクととらえ、全世界が米国に追従して直接処分方式に転ずることを期待したが、1977年10月に開始された国際核燃料サイクル評価（INFCE）では、2年以上にわたる検討の結果、厳格な保障措置の適用によって、民生用プルトニウム利用と核不拡散は両立可能との結論が下された。

再処理・リサイクル方式は、プルトニウムを分離回収して燃料として再利用するので、再処理やMOX燃料加工を含む様々な工程で核拡散上のリスクを伴う。このため最終処分を除く全工程にIAEA保障措置の厳格な適用が求められる。INFCE以降既に40年以上を経過したが、この間に、西側世界だけで使用済燃料の累積再処理量は4万トンを超え、MOX燃料の累積生産量は3千トンに近い。しかしこの間、核拡散防止条約加盟国間では、民生利用のプルトニウムに関して核拡散の問題は全く発生していない。このことは、INFCEの結論が正しかったことが歴史的事実によって裏打ちされたということの意味する。

発電用原子炉の使用済燃料から回収するプルトニウムは「原子炉級プルトニウム」と呼ばれ、高次のプルトニウムの蓄積が進んでいるため、自発核分裂による中性子の発生量と発熱量が大きく、核兵器利用には望ましい材料とは言えない。もちろん、原子炉級プルトニウムであっても、一定規模の爆発威力を発揮する核爆発装置を作ることには不可能ではないが、ミサイル搭載用の核弾頭製造には全く不向きであり、本格的な核武装を目論む国家が原子炉級プルトニウムを利用することは現実にはあり得ない。米国の再処理反対論者の多くは、そうした見解を頭から否定するが、次の二人の発言は、その立場も考慮すると極めて信頼性が高いと考えてよいだろう。

カーソン・マーク氏（元ロシアアラモスの核兵器開発の理論部門の責任者）

「兵器」という言葉を、軍事組織が配備するのにふさわしいものを意味するとすれば、原子炉級プルトニウムは純粋な核爆発装置の兵器として魅力のないものといえるだろう¹³⁾。

ピーター・ジョーンズ氏（元英国アルダーマストーン核兵器研究所長）

原子炉級プルトニウムは、転用される可能性が少なく、特に、完全な爆発システムを得るには核分裂特性を計算するだけで決まらず、他の工学的な問題を考えなければならぬ。この50年間世界で核兵器用には原子炉級プルトニウムを避けてきた歴史的証拠を考えるべきである¹⁴⁾。

(2) プルトニウム鉱山問題

こうした事実にもかかわらず、米国政府近辺には再処理反対論者が根強く存在する。特に非核兵器国である我が国の核燃料サイクル事業には、そうした側からの批判の声がしばしば届き、国内の再処理反対論者と連携して日本に直接処分への転換を迫る。

ところで、米国では1990年代に米ロ間での解体核プルトニウムの処分問題の検討が進み、具体的な処分法として、プルトニウムをガラス固化して埋設する方法と、原子炉で燃焼させる方法の2案が提案されていた。この問題に関して米国原子力学会が組織した「プルトニウムの防護と管理に関する特別パネル」は1995年8月に、すでに商業炉での実施経験があり、プルトニウムの品位低下も期待できるMOX燃焼オプションの方が望ましいとの勧告を出した。その際に核燃料サイクルの二つの選択肢にも言及し、その選択に関しては世界的に統一される必要はないとしつつ、使用済燃料の直接処分に関して以下のような見解を示した¹⁵⁾。

- （処分場への）使用済燃料の蓄積増大は、長期的に見れば核拡散のリスクが高まる可能性がある。使用済燃料の放射能は長時間のうちには減少し、そこに含まれるプルトニウムへのアクセスが次第に容易になるからである。
- したがって、使用済燃料の直接処分は国家レベルでの核拡散の脅威を消滅させることにはならない。プルトニウムへのアクセスが次第に容易になるからである。

図16は、米国のヤッカマウンテン処分場計画（オバマ政権時代に計画破棄）で埋設される使用済燃料用キャニスタの横1mの位置に8時間立った場合のガンマ線及び中性子線による被ばく線量の経時変化を示したものである。この図から、300年後には、キャニスタ近くに8時間たっても1mSvの被ばくしか受けないことがわかる。このことは、300年たてば、嚴重な放射線防護がなくとも裸のキャニスタ近くで長時間作業をすることが可能

になり、使用済燃料回収がきわめて容易になることを示唆している。また回収後の使用済燃料からのプルトニウム分離も、重遮蔽のない、より簡便な設備で実施が可能となる。

図17には、兵器級プルトニウムと比べた原子炉級プルトニウムの自発核分裂中性子の発生量と発熱の経時変化を示す。この図から明らかなように、発熱については300年後には兵器級プルトニウム並みに低下してしまう。このことは原子力級プルトニウムの本格的核兵器への利用を阻む2つの障壁の一つが消失してしまうことを意味し、地下埋設されたプルトニウムの核兵器原料としての魅力度が格段に増すことを意味する。

この問題は、「プルトニウム鉱山問題」と呼ばれ、プルトニウムの発見者であり、ケネディ大統領時代から10年間米国原子力委員会委員長を務めたグレン・シーボークは、「直接処分政策は、予測不能な核拡散リスクを持ち、際限なく増え続ける『プルトニウム鉱山』を将来世代に残すことになる。それを避けるためには、プルトニウムをそれぞれの世代で消費できる核燃料サイクル政策をとる必要がある。平和利用の核燃料サイクルは核拡散リスクの主要因ではなく、また将来にわたってそうではない。核拡散リスクの主要因は、国家が核兵器生産を目的として開発する専用小規模施設であって、その種のリスクは仮に平和利用の核燃料サイクルを放棄しても消えるものではない。したがって、この種の危険性を的確に識別し、確認する国際的能力の強化が重要であり、その方向でIAEAの国際保障措置制度を強化することが大切である。」と述べている¹⁶⁾。

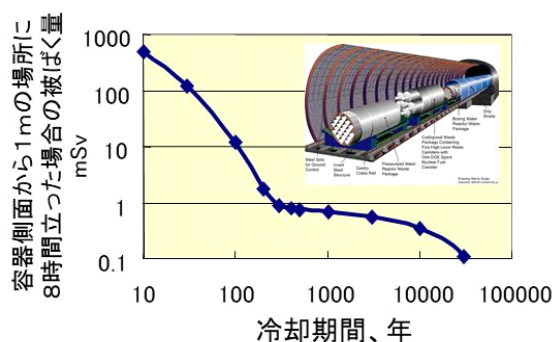


図16
ヤッカマウンテン処分用キャニスタ側面に立った場合の被ばく線量

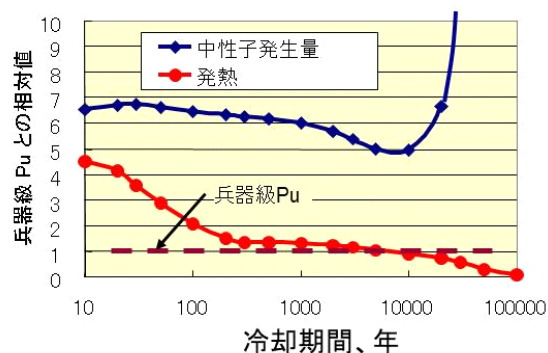


図17
原子炉級プルトニウムの中性子発生量と発熱の経時変化

世界中が直接処分政策をとった場合、今世紀末までに地下埋設されるべきプルトニウムの総量は埋設待ちも含め1万トン前後になる。再処理・リサイクル方式の潜在リスクは、眼前にあるリスクであり、保障措置の適用で十分管理可能なことが長年の実績で証明されてきたリスクである（注）。また、現世代が発生させ、現世代が自らの責任で対処しうるリスクである。一方、直接処分方式がもたらす「プルトニウム鉱山」リスクは、それが世

界中に広まり、前述のような量に達した場合、はたして制御可能なかどうかは全く検証されていない。しかも、それは現世代が発生させ、将来世代に解決を押し付けるリスクなのである。

(注) IAEA は 2004 年に日本に統合保障措置の適用を開始したが、このことは、IAEA が、再処理を含む日本の核燃料サイクルの核拡散リスクは完全に制御されていると公式に認めたことに他ならない。毎年 IAEA が公表する「保障措置声明」においても、我が国が保有する「すべての核物質が平和的活動に留まっている」と報告されており、核拡散リスクの完全制御が揺るがずに維持されていることが内外に示されている。

米国の核拡散分野の専門家の当面の興味は、新たな再処理国や濃縮国の出現を抑え込むことに置かれているため、残念ながらこの問題を真剣に受け止め、検討する努力をほとんどしてこなかった。しかしながら近年、中東などでも新たな原子力利用が開始されており、そうした国々においてもいずれ使用済燃料の後始末問題は重要な課題となってくる。こうした新たな状況を考え、図 1 6、図 1 7 に示したような事実を直視すれば、「プルトニウム鉱山問題」をいつまでも無視し続けることは適切ではなく、そろそろ、その将来リスクを抑え込むための方策の検討を開始するべき時期に来ているのではなかろうか。

以上の議論を踏まえれば、核拡散防止の観点からの直接処分政策の優位性は、それを理由に再処理政策を排除できるほど堅牢なものとはとても認めがたい。むしろ、世代間倫理や「持続性ある人類社会実現」という目的との整合性などの観点も含めれば、直接処分方式のほうが問題が多く、再処理・リサイクル方式のほうが明らかに優れている。また、最終処分段階では、ガラス固化体処分の場合は、固化体のプルトニウム濃度は十分低いので、保障措置の適用は除外されるが、直接処分の場合、プルトニウムを含む使用済燃料をそのまま地下埋設するため、保障措置の恒久的適用から逃れられない。この点からも、直接処分は、社会により重い負担を求める処分方式であるといえる。

(3) 地層処分と核拡散防止の間の基本理念の衝突

もう一つの問題は、地層処分に関して近年世界的に議論されている「可逆性・回収可能性」(Reversibility and retrievability: R&R) と核拡散防止との関係である。最終処分とは、元来「回収可能性を意図しない恒久的な隔離」と定義されてきた。しかしながら R&R 議論の進展により、今日では倫理的な要請からではあるが、地層処分の計画遂行には可逆性が求められ、それを担保するために埋設した廃棄物の回収に関し、一定レベルの技術的可能性を長期(300年間程度)にわたって保証することが求められている。このことは、見方によっては、直接処分の核拡散抵抗性を担保する2つの要素の一つ、使用済燃料の地下

深部隔離の恒久的確実性が、地層処分における倫理的要請から崩されてきていると解釈することができる。地下深部に埋設される廃棄物は、かつては「悪意の試みがない限りは恒久的に隔離されるもの」という前提で扱うことができたが、今後は、「いつでも再取り出しが可能なもの」という前提で見なければならないのである。

地層処分場のサイト選定の重要な要件の一つは、その地域に有望な地下資源が存在しないことである。処分場の長期安全性をもっとも深刻なレベルで損なう可能性がある将来の人間侵入の可能性を極力排除するための重要な要件である。しかし、直接処分の場合には、地下埋設するプルトニウム自体が、エネルギー資源や核兵器原料としての潜在的利用価値を有するため、将来的に意図的な人間侵入を促す可能性を否定しきれない。

以上述べたように、直接処分の場合、地層処分と核拡散防止とでは、元来目指すべき方向性の点で互いに矛盾する側面を持っている。もっと端的に言えば、地層処分と核拡散防止の間で、「基本理念の衝突」が生じているのである。こうした相互矛盾は、これまで廃棄物処分と核不拡散の分野は全くの別世界であり、相互に干渉しあう機会がほとんどなかったことに由来するのであろうが、今後は両分野の専門家が協調してより矛盾の少ない解を見出していく必要がある。その方向性について、本稿で完全に論ずることはできないが、少なくとも直接処分によって生まれる「プルトニウム鉱山」がもたらす将来リスクの有効な軽減策の一つとして考えられるのは、地層処分場を複数の国による共同事業として推進し、多国間管理のもとに置くことであろう。

5. バックエンド方式の全般的比較

(1) 経済性

再処理方式と直接処分方式の経済性比較は、過去に国内外で何度となく実施されてきており、いずれにおいても「核燃料サイクルコストは直接処分方式よりも再処理方式のほうが高くつく」という評価結果になっている。しかし一方で、全体の発電コストでみた場合の両者の差は1割前後に過ぎない。図18は、平成27年の長期エネルギー需給見通し小委員会における様々な電源に関する発電コスト試算結果であるが、ここでも直接処分方式と再処理方式の発電コストの差は1円/kWh未滿であることが示されている。この差は、他電源の発電コストの大きな広がりや、化石燃料発電における燃料費変動による発電コストの揺れ幅に比べれば、ほとんど無視できる程度の差でしかない。その一方で、すでに述べてきたように、環境負荷低減や、循環型社会形成という目標からすれば直接処分方式のほうが明らかに問題が多く、その分国民への負担も大きい。再処理反対論者からは、再処理方式は経済性に劣るので、直接処分方式に転換すべきであるとの主張がしばしばなされるが、図18を見れば、経済性は、そうした重要な決定を行う判断要因には全くなりがないことが明らかである。多少のコスト増を受忍してでも環境負荷低減を図るべきという考え方は現代社会における普遍的規範の一つであるが、再処理反対論者の主張は、そうした考え方にも逆行している。

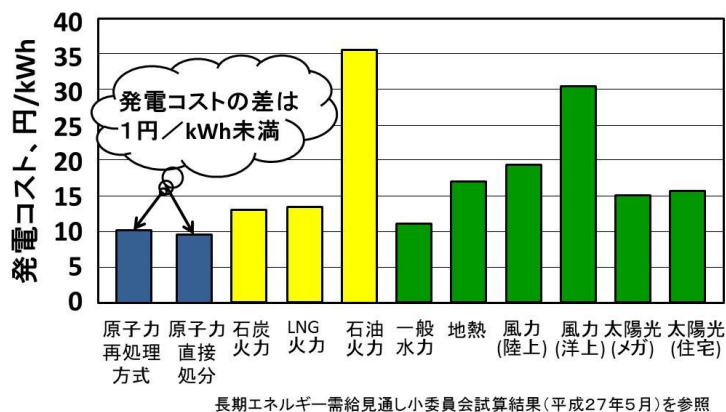


図18 種々の電源による発電コスト試算結果

(2) 二つの選択肢の総合比較

以上述べてきた核燃料サイクルの選択肢の特徴を踏まえ、30GWeの発電を100年間続けるとした場合の、バックエンド的視点で見たマテリアルバランスと代表的諸量を整理

して表2に示す。なお、ここで用いた数値は、マクロな特性比較のための極めて粗い概算値であり、厳密な諸量評価の数値とは必ずしも一致しないことをお断りしておく。

軽水炉においては、直接処分方式はリサイクル（再処理）方式に比べ、ウラン資源必要量が1割程度増大する一方、高レベル廃棄物処分の観点からは、処分場の必要規模が約3倍程度大きくなり、有意な毒性継続期間も一桁長くなることに加え、大容量の中間貯蔵施設能力確保も必要になる。したがって直接処分方式のほうが明らかに環境負荷が大きく、国土が狭く、諸外国に比べ、立地の困難性が際立つ我が国においては不利な（国民負担が大きい）選択肢と言える。なお、表2には、高速増殖炉サイクルの関係諸量も示しているが、高レベル放射性廃棄物処分場の必要規模は、軽水炉の直接処分方式に比べると、1/5程度に縮減されることがわかる。

表2 30GWe, 100年間の原子力利用のマテリアルバランス
(数値はすべて極めて粗い概算値)

核燃料サイクルのオプション	100年間に必要とする天然ウラン量	100年間に発生する高レベル廃棄物量	羽田空港埋立地相当の広さの処分場の必要基数	RFS(注5)並み中間貯蔵施設の必要基数	放射性毒性が元のウラン鉱石並みになるまでの年数	100年間に埋設する原子炉級Pu量	100年間に累積するサイクル残留物
軽水炉・直接処分	50万トン	使用済燃料6万トン	3.3	10	10万年	600トン	劣化ウラン(注1): 45万トン
軽水炉・リサイクル(一回リサイクル)	45万トン	ガラス固化体67,000本(3.4万トン)	1.2(注2)	原則不要	1万年	0	劣化ウラン(注1): 40万トン 回収ウラン: 5万トン MOX-SF: 64,000トン(注3)
高速増殖炉サイクル(MA90%回収・燃焼)(注4)	0	ガラス固化体63,000本(3.2万トン)	0.6	原則不要	1000年	0	軽水炉サイクルで残留する物質を燃料として利用・消費できる

(注1)濃縮のテイル

(注2)MOX使用済燃料は処分しない前提 → 高速炉導入期に再処理

(注3)SF=使用済燃料。530トンのMOX級Puを含む。MOX級Puは品位低下で実質的に核兵器転用不可

(注4)MA90%回収の目的は熱源除去 → 処分場利用率向上

(注5)むつリサイクル燃料備蓄センター

また、直接処分では、使用済燃料に含まれるプルトニウムが総量で約600トン地下埋設されることになるため、処分場への保障措置の永久適用が求められ、その点でもより負担の大きな選択肢と言える。

このほかに、軽水炉では、低濃縮ウラン生産のための濃縮工程の残渣（濃縮テイル）の劣化ウランが大量に残される。その量は、原料の天然ウラン量の9割に近いが、直接処分の場合はそれも放射性廃棄物となるので、大きな環境負荷要因になることを認識しておく必要がある。わが国の場合、低レベル放射性廃棄物処分の基準は諸外国よりも厳しく設定

されており、ウランそのものの廃棄は、地層処分にまわさなければならなくなる可能性も高い。

リサイクルの場合でも、回収ウランも含めると直接処分とほぼ同量のウランが残され、さらに MOX 使用済燃料が残されるが、これらはすべて高速炉時代の燃料に転換できるので、これらは環境負荷要因ではなく、貴重なエネルギー資源として備蓄されることになる。

4章で述べたように、核不拡散や経済性の観点からの比較を踏まえても、リサイクル方式が直接処分に比べ決定的に劣るわけではなく、むしろ利点も認められるところもある。こうしたことを総合的に勘案すれば、我が国にとっては、環境負荷が小さく、立地問題にかかわる国民負担もより少ない再処理・リサイクル方式のほうが明らかに望ましい選択肢であるということが出来る。しかしながら、2018年7月の日米原子力協定自動延長の問題に絡み、我が国の反核・脱原発論者と米国の伝統的な再処理強硬反対論者が連携し、様々なかたちで再処理放棄と直接処分への転換を訴える運動を展開したため、日本の世論もそれに少なからぬ影響を受けている。そこで、我が国にとっては再処理方式のほうが直接処分方式よりも望ましいとする今日的な理由を再度示すと、以下の5点に整理できる。

- ① 高レベル廃棄物処分場面積が1/3で済む。
- ② Puを埋めないなので、埋設廃棄物の長期放射性毒性が一桁小さくなる。
- ③ 中間貯蔵能力確保の必要性がミニマムで済む。
- ④ 将来の核拡散リスクを生むプルトニウム鉱山を残さない。
- ⑤ 資源節約ができ、FBRサイクルへの橋渡しができる。

核燃料サイクルの選択肢を考える上で、資源節約はもちろん重要な視点ではあるが、今日では、「環境負荷低減」がもう一つの重要な視点になっており、見方によってはこちらのほうが今は重要とさえいえる。また、今日では原子力事業推進上の最も困難かつ重要な課題は立地問題や住民合意形成問題である。これら二つの観点からすれば、①～④のいずれもが、日本では再処理方式のほうが望ましいことを明確に示している。

(3) 原子力発電大国は再処理・リサイクル方式を目指す

現在、設備容量でみた原子力発電の上位5ヶ国は、米国、フランス、日本、中国、ロシアであり、米国以外の4ヶ国はいずれも再処理・リサイクル政策をとっており、究極的には高速増殖炉サイクル実現をめざしている(図19)。

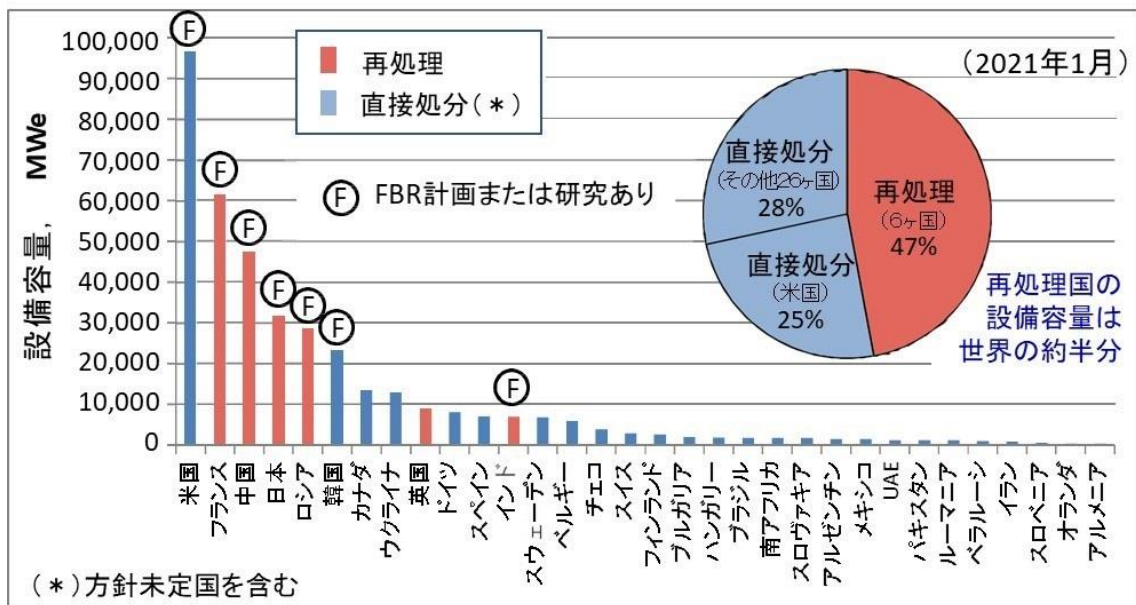


図19 各国の原子力発電規模と核燃料サイクル政策

今日では、原子力発電規模が大きな国では直接処分方式では高レベル廃棄物処分への負担が相対的に大きいという認識が専門家の間では広く共有されており、また先行国での経験から、住民の合意形成の問題からの処分場立地の困難性も強く認識されている（ロシアですら、地層処分研究用地下施設の建設に反対運動が起きている）。こうしたことから、原子力発電大国が廃棄物処分の負担軽減が図れる再処理・リサイクル政策をとるのは自然の成り行きとも言え、かたくなに直接処分政策を守る米国のほうがむしろ王道から外れているといってもよい。米国でも技術サイドでは直接処分方式がもたらす廃棄物処分の負担増大の深刻さは十分認識されており、ブッシュ政権時代にはその問題解決のために、核不拡散対策強化を前提に再処理・リサイクル路線に復帰する計画（GNEP 計画）が進み始めていた。しかしその後の政権交代で、計画は頓挫し、さらにヤッカマウンテン処分場計画が政治的に破棄されてしまったので、当分の間は集中式中間貯蔵施設の建設で泳ぐしか道がない。広大な土地に恵まれる米国はそれでも困らないが、カーター政策の呪縛（直接処分への固執）から逃れられない米国原子力のバックエンド対策は、きわめてギクシャクしてしまっている。

6. 高速増殖炉サイクルの新しい視点:「究極のゴミ焼却発電炉」

高速増殖炉は、第1章(2)で述べたように「ウラン資源をプルトニウムに変換しつつ燃やし尽くす炉」である。基本的に、炉心とブランケットからなり、炉心にはウランで希釈したプルトニウムを燃料として装荷し、ブランケットには非核分裂性のウラン U238 からなるウラン燃料を装荷する。炉心では、プルトニウムの核分裂で発電に必要な熱を生産し、ブランケットでは炉心から漏れ出る中性子で U238 をプルトニウムに転換する。炉心とブランケットの配分の調整により、炉心で消費される以上の量のプルトニウムをブランケットで生産でき、場合によっては、ブランケットをなくすことでプルトニウムの専焼炉にすることもできる。炉心中のプルトニウムは燃焼で品位低下が進むが、ブランケットでは高品位プルトニウムが生産されるので、両者を混合しながら使うことにより、プルトニウムの無限回数の多重リサイクルが可能となる。

以上が高速増殖炉のやや詳しい基本原理であるが、ここで重要なのは、

- ① 炉心で使うプルトニウムは、軽水炉の MOX 使用済燃料のプルトニウム程度まで品位低下が進んでも利用可能なこと
- ② ブランケットに使用するウランは、天然ウランである必要はなく、軽水炉では無用の長物である濃縮テイルの劣化ウランや、軽水炉時代に使いきれない回収ウランで十分であること

である。このため、高速増殖炉時代には、新たにウランを採鉱する必要は全くなく、軽水炉時代に無用の残渣として残される膨大な量の劣化ウランと、軽水炉ではリサイクル利用が困難な MOX 使用済燃料を燃料源とすることで、何千年にもわたる発電を可能とするのである。

この関係を 100 万 kW 級の軽水炉 1 基 40 年間分の発電を基準に図 2 0 に示すが、**高速増殖炉は、軽水炉時代が残す膨大な核のゴミを燃料としながら電気を何千年にもわたって人類に供給できる「究極のゴミ焼却発電炉」である**ということが出来る。軽水炉サイクルは様々な制約があり、理想のサイクルにはなり難いことは既に述べてきたが、後に高速増殖炉サイクルが続くことによって、資源面と廃棄物の後始末の観点の両面から、理想のサイクルとして完結するのである。これまで、高速増殖炉は軽水炉に比べるとより複雑な体系であり、その分経済性の面では不利とされてきたが、軽水炉時代が残す膨大な負の遺産を解消する役割を持っていることの計り知れない価値は全く認識されてこなかった。その役割の重要性を正しく認識すれば、そのメリットは、従来のコスト比較で示されてきた程度の経済デメリットをはるかに凌駕することは明らかであろう。また、第3章(2)で述べたように、MAリサイクルを行えば、軽水炉よりもガラス固化体の単位発電量当たりの発

熱を低減でき、処分場の必要面積を半減できる点も、高速増殖炉サイクルの大きなメリットである。

従来、高速増殖炉は、燃やした以上のプルトニウムを生産できる「夢の原子炉」と言われてきたが、循環型社会形成が重要な社会命題となっている今日では、その時代ニーズに完全合致する素晴らしい「究極のゴミ焼却発電炉」という姿を前面に出した開発戦略のほうが、はるかに世の中から共感が得られるであろう。しかもこの「究極のゴミ焼却発電炉」はカーボンフリーであり、脱炭素化時代を半恒久的に支える最も強力な信頼性の高い発電システムになりうるのである。

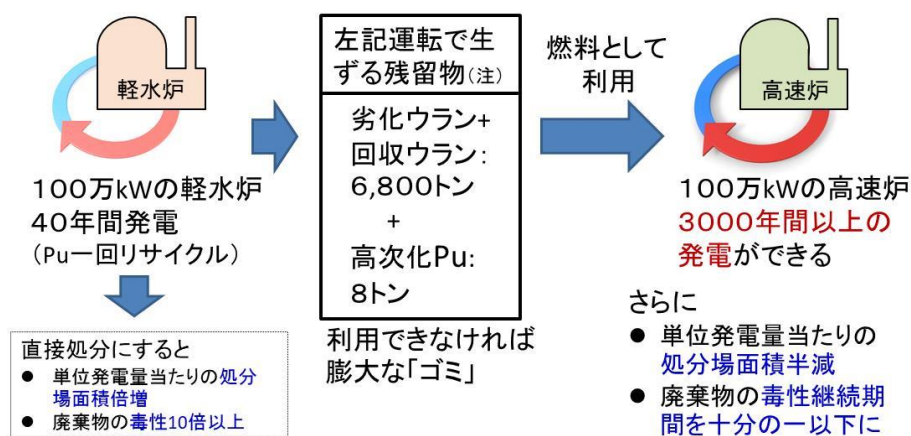


図20 高速増殖炉は「究極のゴミ焼却発電炉」

参考文献

- 1) E. Fermi, “No.211, Discussion on Breeding”, Enrico Fermi Collected Papers (Note E Memories) Vol. II United States 1939 - 1954, The University of Chicago Press (1965)
- 2) NUREG-0002, Final Generic Environment Statement on the Use of Recycle Plutonium in Mixed Oxide Fuel in Light Water Cooled Reactors, August 1976
- 3) 原子力は、いま 日本の平和利用 30 年、日本原子力産業会議、1986 年 11 月発行
- 4) 日米再処理交渉 <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1980/sb2040202.htm>
- 5) INFCE の成果 <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1980/sb10301.htm>
- 6) 我が国におけるプルトニウム利用の基本的考え方（原子力委員会決定）、平成 30 年 7 月 31 日
- 7) 国際原子力機関（IAEA）による「2019年版保障措置声明」の公表について、原子力規制庁、令和 2 年 7 月 1 日 <https://www.nsr.go.jp/data/000316281.pdf>
- 8) Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository, ANDRA (2005)
- 9) SAFIR2 : Safety Assessment and feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS (2001)
- 10) R. A. Wigeland et al., “Repository Impact of Limited Actinide Recycle”, Proc. GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, October 2005
- 11) 河田東海夫、サイクル・廃棄物屋は、原子力の持続性を保証するために何をなすべきか？ 日本原子力学会誌、Vol. 52, No.1 (2010)
- 12) 河田東海夫、軽水炉から高速炉への移行期にそなえて、日本原子力学会誌、Vol. 49, No.6 (2007)
- 13) J. CARSON MARK, “Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium,” *Science & Global Security*, **4**, 111 (1993)
- 14) Proceedings of NATO Advanced Research Workshop, London, January 1994
- 15) Protection and Management of Plutonium, Special Panel Report, American Nuclear Society, August 1995
- 16) Glenn T. Seaborg, Nuclear Recycling No.2, February 1996