

平成5年（行ウ）第4号再処理事業指定処分取消請求事件

原 告 大下由宮子 外157名

被 告 原子力規制委員会

令和3年（行ウ）第1号六ヶ所再処理事業所再処理事業変更許可処分取消請求事件

原 告 山田 清彦 外105名

被 告 国（処分行政庁 原子力規制委員会）

準 備 書 面（193）

世界の再処理の潮流と現状、そして六ヶ所再処理工場

2022年（令和4年）10月7日

青森地方裁判所 民事部 御中

原告ら訴訟代理人

弁 護 士 浅 石 紘 爾

弁 護 士 内 藤 隆

弁 護 士 海 渡 雄 一

弁 護 士 伊 東 良 徳

弁 護 士 中 野 宏 典

目次

1	はじめに.....	4
2	再処理を国策とする意図（軍事・平和利用の両側面から）.....	4
2.1	プルトニウム増殖（原爆から平和利用へ）の夢.....	4
2.2	増殖炉の不都合な点.....	5
2.3	予想より多く発見されたウラン、少なかった需要.....	7
2.4	発電用原子炉使用済燃料の再処理.....	8
2.5	インドの核実験の警鐘.....	9
2.6	軽水炉用のプルトニウム燃料.....	11
2.7	放射性廃棄物管理のための再処理？.....	14
2.8	悪夢.....	15
2.9	日本——再処理プログラムを持つ唯一の非核兵器保有国.....	17
2.10	再処理を正当化するための論理.....	21
2.11	日本が再処理を許されている理由.....	22
2.12	再処理と濃縮の権利を求める韓国などの主張.....	23
3	再処理の炉型.....	24
3.1	世界の増殖炉・再処理プロジェクトの現状と稼働状況.....	24
3.2	増殖炉・再処理プロジェクトが生き延びている原因.....	27
3.3	使用済燃料の種類による区別.....	29
3.4	燃料別の世界の再処理工場.....	32
4	再処理の現状と中止の理由.....	39
4.1	再処理の基本的な問題.....	39
4.2	民生用再処理の執拗な継続と中止.....	41
4.3	フランス：軽水炉でのプルトニウム・リサイクル.....	44
4.4	英国：再処理プログラムがついに閉幕へ.....	47
4.5	日本——再処理プログラムを持つ唯一の非核兵器保有国.....	51

4.6	ロシア：増殖炉開発の継続	58
4.7	原子炉級プルトニウムの兵器利用の可能性	61
4.8	再処理と核拡散	63
4.9	再処理の危険性	65
4.10	結論	70
5	使用済燃料プールの火災事故の危険と汚染	70
5.1	使用済燃料プールの構造と稠密貯蔵の危険性	70
5.2	使用済燃料プールにおける火災の懸念	72
5.3	セシウム 137 による地表の汚染	73
5.4	米国における規制の検討	77
5.5	韓国における使用済燃料プール火災の影響予測	82
6	再処理撤退（衰退）の理由（民生用プルトニウムの分離）	83
6.1	フランス	84
6.2	イギリス	84
6.3	日本	84
6.4	ロシア	85
6.5	再処理衰退の理由、その 1 技術問題	85
6.6	再処理衰退の理由、その 2 再処理の経済性	98
6.7	再処理衰退の理由、その 3 危険性 人体・環境に与える影響（汚染）	100
7	まとめ	105
7.1	日本はただちに核燃サイクル政策を放棄すべき	105
7.2	六ヶ所再処理工場の中止と廃止措置	106
7.3	使用済燃料を全量直接処分すべき	107
7.4	日本は原子力政策を根本から見直すべきとき	108

1 はじめに

フランク・フォンヒッペル、カン・ジョンミン、田窪雅文（以下、「著者ら」という）による『プルトニウム 原子力の夢の燃料が悪夢に』（甲 A 第 584 号証）の中で、著者らはプルトニウム経済の危険性に関する考え方を明確、簡潔に示し、「民生用核燃料サイクルにおけるプルトニウムの分離と使用の禁止」を提唱した。「核拡散及び核セキュリティ上のリスクと経済的な正当性の欠如」をその大きな理由としている。著者らは、代案として、「使用済燃料を数年間プールで冷却した後乾式貯蔵し、深地下の地層処分場が準備できた段階で、直接処分する」ように提唱している。

本陳述では、著者らの提唱に則り、再処理をめぐる世界の状況となぜ再処理を中止しなければならないか、再処理（六ヶ所再処理工場の稼働）を国策とする日本の愚行を明らかにする。

2 再処理を国策とする意図（軍事・平和利用の両側面から）

2.1 プルトニウム増殖（原爆から平和利用へ）の夢

2.1.1 プルトニウムの増殖

1945 年、ワシントン州ハンフォードの原子炉で、消費されるウラン 235 の 10 個の原子に対し、約 7 個のウラン 238 が中性子を吸収することによって、連鎖反応を起こす人工核種プルトニウム 239 に変わることが発見された。そして、プルトニウム 239 の核分裂で放出される中性子は、もっと多くのウラン 238 をプルトニウム 239 に変えることができることも発見された。

2.1.2 シラードの夢

レオ・シラードは、核分裂するプルトニウム原子 1 個に対し、1 個以上のプルトニウム原子をウラン 238 から生産することはできないだろうかと考えた。それができれば、原子力の基盤は、ウラン 238 となり、同じ量の

ウランから約 100 倍のエネルギーを生み出すことができることになる。

2.1.3 高速中性子による核分裂連鎖反応

シラードはウラン 238 の中にプルトニウムを 15%以上の割合で混ぜた混合物を燃料としている場合は、高速中性子で連鎖反応を維持することができることも証明した。

2.1.4 原子炉の冷却材

原子炉は、核分裂で生じた熱をその炉心から取り除くために冷却材を必要とする。ほとんどの原子炉で冷却材として使われている水は水素を含有している。水素は中性子を非常に効率良く減速する。

2.1.5 溶融ナトリウムが増殖炉の冷却材

もっと重い原子核を持つ冷却材を探し求めたシラードは、最終的に溶融ナトリウムを選んだ。ナトリウムの原子核は水素の原子核の 23 倍の重さで、比較的中性を吸収しにくい。金属なので熱伝導率が高く、ナトリウムの融点は、摂氏 98 度と比較的低い。原子炉がそれ以上の温度に保たれば、原子炉が運転されていなくとも、冷却材は液体のままに留まる。液体ナトリウムは、その後の増殖炉開発計画のほとんどにおいて冷却材として選ばれた。

2.2 増殖炉の不都合な点

2.2.1 プルトニウムを動力源とする懸念

シラードは 1947 年のスピーチで、増殖炉を使うことによって活用できる膨大なエネルギー資源について、「残念ながら、プルトニウムは重要な原子力燃料であるだけでなく、原子爆弾の主成分でもある。原子爆弾の心配がなくならない場合、原子力発電を利用できるだろうか。そして、平和を確信できない場合、原子爆弾の心配をしないで済むだろうか」と述べた。

2.2.2 プルトニウム増殖炉開発の世界の動き

原子力関係者の間では、シラードの警告をよそに、プルトニウム増殖炉を開発しようという試みが世界中で始まった。

① アメリカ

「増殖実験炉（EBR-I）」が 1951 年に米国原子力委員会（AEC）の「国立原子炉実験場（NRTS）」（現アイダホ国立研究所）で臨界に達した。

② イギリス・フランス・ソ連

その後に、英国のドーンレー高速炉（1959 年）、フランスのラブソディー（1967 年）、そして、ソ連の BOR-60（1969 年）へと続いた。

2.2.3 ナトリウム冷却炉の技術問題

ナトリウム冷却炉の重要な技術的問題は、ナトリウムは空気または水と接触すると燃えることである。したがって、増殖炉の燃料交換の際に空気が混入しないようにするための非常に複雑な仕組みが必要となる。原子炉内あるいは配管内の修理に時間がかかる。原子炉あるいは配管を開ける前に、わずかな量のナトリウムも一切残らぬよう、完全に除去してしまわなければならない。発電所の蒸気発生器で、高温の液体ナトリウムと水を隔てている薄い金属の「壁」に漏れが生じれば、それによって起きた火災により蒸気発生器が破壊されてしまう。

2.2.4 高速中性子炉の安全性

高速中性子炉には、もう一つの原子炉の安全性の問題がある。プルトニウムを燃料とする増殖炉では、高速中性子が連鎖反応を維持している。ナトリウムが沸騰して密度が下がると、中性子の速度が上がり、一回の核分裂当たりの中性子発生数が増え、出力が上がる。次いで、炉心溶融が発生してさらに反応度の高い形状になり、結果、小規模の核爆発が生じて原子炉の閉じ込め機能が破壊され、炉心の放射能が大気中に放出される事態に至る可能性がある。

2.2.5 高速中性子炉の部分的炉心溶融

世界で初めての高速中性子炉 EBR-I は、部分的炉心溶融を起こした。電力会社が運転する増殖炉の第 1 号となった小型のフェルミ 1 号炉（デトロイトから 40 キロメートルに位置）も、1966 年に部分的炉心溶融を起こした。フェルミ 1 号炉は、あまりにも多くの問題を抱えていたため、運転許可のあった 9 年間で発電できた電力量は、全出力で運転した場合の 1 ヶ月分にも満たなかった。

2.3 予想より多く発見されたウラン、少なかった需要

2.3.1 潜水艦用の原子炉開発が軽水炉（シッピングボート）へ

米国で最初の原子力発電所シッピングポート（ペンシルバニア州オハイオ川沿い岸、ピッツバーグ市の下流に位置）は、元々、原子力空母用に設計された軽水炉で 6 万キロワット（60MWe）の発電容量で 1957 年に運転を開始した。同発電所は、今日原子力発電の主流となっている 100 万キロワット級の軽水炉のモデルで、このタイプの原子炉は、カナダが開発した「重水(heavy water)」炉と区別するために「軽水炉 (light water reactor=LWR)」と呼ばれる。

2.3.2 ウラン・コストの低下とスリーマイル島原発事故

1970 年頃までに、ウランの既知（推定）資源量は 1000 倍に増え、短期的なウラン不足についての懸念は遠ざかる。さらに、米国における 1979 年のスリーマイル・アイランド原子力発電所 2 号機の部分的炉心溶融事故の後、安全性要件が強化され、発電用原子炉の資本コストと運転コストの両方が高くなった。このため、原子力発電のコストにおけるウラン価格の相対的割合が下がることになり、2018 年現在、ウラン・コストは、原子力発電コストの数パーセントにしかない。

2.3.3 原子力発電ウラン燃料需要の低下（100 万キロワット 400 基分）

原子力発電のウラン燃料需要も予測よりずっと少なかった。2018 年末

現在、世界の総原子力発電容量は、電気出力 100 万キロワット（1 ギガワット=1GWe=1000 メガワット）の原子炉約 400 基分である。この総数は、40 年前に米国「原子力委員会（AEC）」と「国際原子力機関（IAEA）」が予測したものと比べてずっと少なく、その構成は相当異なっている。

2.3.4 1975 年 IAEA 原発・増殖炉予測の下方実績

1975 年、IAEA は、2000 年の世界の原子力発電容量は約 2000GWe（100 万kW級 2000 基分）に達し、その約 10 パーセントは、増殖炉になるだろうと予測した。IAEA は、それより先の将来については予測しなかったが、米国 AEC が 1974 年に示した予測は、2010 年には米国だけで 2300GWe（100 万kW級 2300 基分）の原子力発電容量に達し、その容量の約 70 パーセントは増殖炉で占められるというものだった。

2.3.5 2018 年米国・世界・ロシア・印・中の実績

実際には、2018 年末現在、米国の軽水炉発電容量は約 100GWe（100 万kW級 100 基分）、増殖炉はゼロである。IAEA によると、世界全体では「運転状態」の発電用原子炉の数が 454 基、総発電容量が 402GWe（100 万kW級 402 基分）となっている。そのうち、2 基がロシアのナトリウム冷却増殖原型炉である。インドには完成間近の増殖原型炉があり、中国には小型の高速実験炉（電気出力 2 万キロワット=20MWe）があるが、中国の実験炉が運転を始めてから 5 年半の間に発電したのは 1 時間の電力に過ぎない。

2.4 発電用原子炉使用済燃料の再処理

2.4.1 増殖炉燃料用のプルトニウム生産（軽水炉燃料の再処理）

1960 年代から 70 年代にかけて、いくつかの主要工業国が増殖炉の初期炉心用のプルトニウムを取得するためのプログラムを開始した。これは、軽水炉の使用済燃料を化学的に「再処理」というものである。使用済燃料には約 1 %のプルトニウムが入っている。電気出力 100 万キロワット

(1GWe) の増殖炉では最初と 2 番目の炉心用に合計約 10 トンのプルトニウムが必要である。

2.4.2 仏・独・ロ・英・米そして日本で大型再処理工場を建設

フランス、ドイツ、ロシア、英国、米国の 5 カ国は、すべて、大型の民生用再処理工場の建設を始めた。日本は、1990 年代にこれらの国々に加わった。しかし、実際に完成までに至ったのは、仏・日・英の 3 カ国の工場だけである。日本の原子力規制委員会は 2020 年 7 月 29 日、六ヶ所再処理工場の安全審査の合格を正式に決定し、日本原燃は 2022 年上期に完工するとしているが、本格操業への道は未だしである。

2.5 インドの核実験の警鐘

2.5.1 アメリカの再処理再考のきっかけ

米国が再処理について再考したのは、1974 年 5 月 18 日に行われたインドの最初の核実験だった。それまで、米国のプログラムでは、インドが近代化へのカギとして原子力に焦点を合わせるのを支援し、インドの増殖炉及び再処理計画に対し技術的アドバイスを提供していた。

2.5.2 インドの核実験の目的

インド政府は、核実験「スマイリング・ブッダ（微笑む仏陀）」は「平和利用核爆発装置」の実験だと主張し、「装置」は石油採取用の破砕その他の目的に使われることになるとした。この考えは、米国の核兵器研究所が核実験禁止の提案に反対する中で提唱したものだ。しかし、米国政府は、インドは民生用再処理という名目のプログラムを核兵器開発計画の立ち上げのために使ったと結論付けた。

2.5.3 軍事政権下の再処理工場購入交渉（ブラジル・韓国・パキスタン・台湾）

米国はブラジル、韓国、パキスタン、台湾が再処理工場の購入交渉をし

ているという事実に気づき、ジェラルド・フォード政権は、これらの購入を阻止することを決定した。

2.5.4 カーター政権が増殖炉開発計画の見直し

1977 年、ジミー・カーターが米国の大統領になり、米国の増殖炉開発計画の論理的根拠の見直しに着手し、米国の原子力研究・開発推進体制派（エスタブリッシュメント）や彼らを支持する議会内や外国の勢力の反対にもかかわらず、増殖炉は不必要かつ非経済的との結論を下した。不必要（米国内も含め、以前よりずっと多くのウランが発見されている）、非経済的（液体ナトリウム冷却炉が水冷却炉と比べた場合、コストが高く、信頼性が低い）であった。

2.5.5 バーンウェル再処理工場の許可作業中断と中止

カーター政権は、南部のテネシー州におけるクリンチ・リバー増殖原型炉の工事と、サウス・カロライナ州バーンウェルで完成間近となっていた大型の民生用再処理工場の許可関連作業を中断した。同再処理工場は、核兵器用プルトニウム生産のための第二サイトとして 1950 年代初頭に作られた「エネルギー省（DOE）」サバンナリバー・サイトに隣接していた。議会は、増殖炉プロジェクトの中止に反対したが、最終的にカーターが退任した後、これを中止した。コストが上昇し続けたからである。

次のロナルド・レーガン政権は、商業用再処理計画の継続を許可する意向だったが、政府による助成金は出さないという条件だった。米国の電力会社は、迅速に結論を出した。分離済みプルトニウムの需要のない状況では、使用済燃料は深地下処分場で処分した方が再処理よりも安くつくというものだった。こうしてバーンウェル再処理工場は未完成のままに終わった。

2.5.6 ドイツ・バッカースドルフ再処理工場の建設断念

ドイツとオーストリアでは、1986 年のチェルノブイリ事故で活発にな

った反原発運動が、両国の国境に近いドイツのバイエルン州バッカースドルフ村に隣接する大型再処理工場建設サイトを包囲した。ドイツの原子力電力会社は 1989 年に、使用済燃料を英仏両国で再処理してもらう方が、問題が少なくコストも低くなるとの結論に達した。

2.5.7 ドイツ 使用済燃料を英・仏に再処理委託

ドイツの電力会社は、自国の増殖炉計画が崩壊した 1991 年以降も、その使用済燃料を再処理のために外国に送り続けた。ほかに使用済燃料の送り先がなかったのである。しかし、再処理契約のほとんどは、再処理で生じたプルトニウムと高レベル廃棄物はその所有国に返還されると明記していた。

2.5.8 旧ソ連 クラスノヤルスク再処理工場の建設中止とオジョルスク小工場操業

旧ソ連では、シベリアのクラスノヤルスクの近くに位置する軍事用プルトニウム生産センターにおける民生用再処理工場建設工事が資金難により 1990 年代に中止となり、代わりにパイロット再処理工場が建てられた。原子力発電の使用済燃料の再処理は、ウラル山脈のオジョルスクにある軍事用再処理施設を改造した小規模工場で続けられた。

2.5.9 2019 年のロ・印・中国の増殖炉開発計画

2019 年現在、ロシアとインドの原子力推進体制派は、その増殖炉開発計画をゆっくりと進め続け、中国では、政府所有の「中国核工業集团公司 (CNNC)」が、小規模の民生用再処理施設と増殖炉の実験施設を完成させた。

2.6 軽水炉用のプルトニウム燃料

2.6.1 フランス スーパーフェニックスを 12 年で閉鎖 (1998 年)

1998 年、フランスはスーパーフェニックスを閉鎖した。最大の電気出

力を誇る増殖炉である（120 万キロワット）。12 年間で発電した電力は、フル出力で運転した場合の 3 分の 1 年（4 カ月）分相当にしかない。

2.6.2 増殖炉用プルトニウムの蓄積と再処理

増殖炉用として分離されながら、その増殖炉が建設されるに至っていないために蓄積しているプルトニウムはどうなっているのだろうか。

① フランス

フランスの原子力推進体制派は「高速増殖炉はいずれ建設されるから、再処理は続けるべきで、余剰分離済みプルトニウムを通常の軽水炉でリサイクル（プルサーマル）すればいい」と主張し、プルトニウムと劣化ウランの酸化物を混ぜた「混合酸化物（MOX）」燃料の製造を始めた（劣化ウランは、ウランの濃縮過程で出てくる廃棄物）。1995 年、フランス南東部のマルクール・サイトで大型のメロックス MOX 燃料製造工場の運転を開始した。MOX 燃料を軽水炉で使用することによってフランスの低濃縮ウランの必要量は 10%ほど減少した。

② 日本

日本の原子力推進体制派は、フランスと同様の政策を採用することに決め、使用済燃料の再処理をフランスと英国に委託し、分離されたプルトニウムは MOX 燃料にして日本に送るという方法に頼った。しかし、英国で製造された最初の MOX 燃料の品質管理データがねつ造されていたとの事実が 2000 年に明らかになったことで MOX 燃料の日本での使用は、住民の反対によって 10 年ほど遅れた。2011 年の福島第一原発事故は、MOX 使用計画を更に遅らせることになった。

2.6.3 MOX 燃料の経済性は低濃縮ウランの 5 倍

いずれにせよ、MOX 燃料の経済性はひどいものである。フランスが実施した厳格な評価で、2000 年に下された結論は、再処理コストも含めると、MOX 燃料の製造費用は、低濃縮ウランの 5 倍に達するというものだった。

2.6.4 日・独・ス・ベ・オとの再処理契約で外貨獲得（英・仏）

英仏両国にとって、再処理計画は外貨獲得という点での利点があった。日本、ドイツ、スイス、ベルギー、オランダの各国は、使用済燃料の再処理と、回収されたプルトニウムを使った MOX 燃料製造とを英仏両国に委託する契約を結んだ。

① 英国

英国は、外国の軽水炉の使用済燃料を再処理するのが、THORP（ソーブ：酸化物燃料再処理工場）とセラフィールド MOX 工場の建設の根拠のすべてだった。THORP では英国の改良型ガス冷却炉の使用済燃料も再処理したが、分離されたプルトニウムは保管に回されただけであった。

② ドイツ

ドイツは 2000 年に、原子力発電の段階的廃止という、重大な政策決定の一環として、その再処理契約を更新しないことを決めた。

③ 日本

日本も、英仏との再処理契約を更新しなかった。国内で大型再処理工場（六ヶ所再処理工場）の建設を始めていたからだ。

④ フランス

英国にとって主要な再処理の顧客はフランスの電力会社「フランス電力（EDF）」だった。EDF は、英国の改良型ガス冷却炉と、英国唯一の軽水炉の所有権を獲得していたが、その EDF も、英国との契約更新を拒否した。

2.6.5 英国の THORP 再処理工場の廃止

英国内外の顧客が再処理契約の更新をしない以上、英国にとって、再処理プログラムを中止する以外の選択肢はなくなり、「原子力廃止措置機関（NDA）」を設立した。既存の契約を完遂した後、セラフィールドのプルトニウム生産・再処理サイトの除染を実施するため、2018 年のこの除染

費用の見積は、910 億ポンド(約 13 兆 2000 億円) である。THORP は、2018 年末に閉鎖された。NDA は、THORP の廃止措置費用を 37 億ポンドと見積もっている。2020 年半ばの予定では、英国の閉鎖済みの第一世代マグノックス炉の使用済燃料の再処理をしている古い工場の運転は、2021 年に終了することになっている。

2.6.6 フランスのアレバの倒産とオラノへの再編

フランスでは、外国の再処理の顧客がいなくなったにもかかわらず、政府が EDF に対し再処理契約を維持するよう強制した。政府所有の会社（アレバ）は、原子炉建設とウラン採掘事業で多額の損失を出し、2018 年 1 月に、規模を縮小して、ウラン濃縮及び使用済燃料再処理専門会社（オラノ）として再編成された。

2.6.7 増え続ける民生用プルトニウム（300 トン）

世界全体で見ると、民生用プルトニウムの分離（生産）量は、燃料としてのプルトニウムの利用（消費）量を大幅に上回っている。世界の分離済みプルトニウムの量は増え続け、民生用プルトニウムの量は 2018 年に約 300 トンに達した。

2.7 放射性廃棄物管理のための再処理？

2.7.1 再処理のコストは巨大

軽水炉でのプルトニウム・リサイクルは、低濃縮ウラン燃料よりずっとコストが高いため、巨大なコストを伴う再処理プログラムの維持を正当化するのは以前にもまして難しくなっている。

2.7.2 再処理の継続理由 核廃棄物の量と放射性毒性の低減

再処理の推進派は、経済性以外の継続理由を持ち出している。核廃棄物の量と放射性毒性の低減である。再処理推進派は、もしプルトニウムが、周期表でウランより重い方に並んでいる他の超ウラン元素を分離して核分

裂させることができれば、廃棄物の長期的放射性毒性と量を相当低減できるだろうと主張する。

2.7.3 ナトリウム冷却炉の超ウラン元素焼却炉への転用

この主張は、ナトリウム冷却炉の正当化論をも提供する。水冷却炉の低速中性子と異なり、ナトリウム冷却炉の高速中性子は、理論的にはすべての超ウラン核種を核分裂させる。このように、プルトニウム増殖炉として発明されたナトリウム冷却炉は、超ウラン元素燃焼炉として喧伝されている。

2.7.4 超ウラン元素の核分裂効果は使用済燃料の処分場漏洩の影響より小さい

米、仏、日その他の国々の放射性廃棄物専門家らは、使用済燃料の処分場からの漏洩によってもたらせられる被曝線量は、再処理と高速炉でのリサイクルの何回もの繰り返しに伴う経済面及び環境面のコストを正当化するには当たらないとの結論に達した。

2.8 悪夢

2.8.1 再処理がもたらす直接的・間接的危険

プルトニウムの分離とリサイクルは、非経済的で環境面のベネフィットがない。著者らが甲 A 第 584 号証を書いたのは、再処理が生み出して来た直接的及び間接的危険のためである。

2.8.2 直接的危険 プルトニウムは核兵器の材料

直接的危険は、プルトニウムが核兵器の材料だという事実。プルトニウムを使用済燃料の中の猛烈な放射能を持つ核分裂生成物から分離することは、国家やテロ組織が核兵器の製造や「ダーティー・ボム（放射性物質散布装置）」での使用のためにこれを入手するのを容易にする。

2.8.3 日本（他の非核兵器保有国）のプルトニウム核兵器化への誘惑

日本、そしておそらく他の非核兵器保有国が、プルトニウムを核兵器用

に使うという誘惑にかられることは決してないと言い切れない。分離されたプルトニウムがテロリストや外国の工作人員によって盗まれることは決してないと言い切れない。2003年のイランの秘密ウラン濃縮工場の発覚は核不拡散体制が崩壊しつつあることを意味している。再処理の場合には、再処理は危険だけでなく、不必要かつ非経済的であるから、これを完全に放棄することがまず第一に必要である。

2.8.4 軽水炉使用済燃料貯蔵プールの安全性上の悪夢

軽水炉の使用済燃料はすべて再処理されるとの想定がその通り進んでいないことにより間接的に起こされた原子力安全性上の悪夢がある。使用済燃料は、元々の設計の際の想定を数倍超える密度で原子炉の貯蔵プールに詰め込まれている。その結果、高貯蔵密度により連鎖反応が起きるのを防ぐために、一つ一つの燃料集合体を、中性子吸収用の壁に囲まれた「箱」に入れることが必要になった。オープン・フレームのラックと異なり、これらの「箱」では水位が下がって燃料が部分的に露出する状態になった場合、空気冷却が効かなくなるという問題が生じる。

2.8.5 2011.3.11 福島原発事故の4号機の燃料プールの大事故の可能性

2011年の福島第一原子力発電所での事故の際、4号機の稠密貯蔵プールの冷却水が流れ出してしまったのではないかと危惧された。米国原子力規制委員会のコンピューター・シミュレーションは、炉から取り出されて間もない使用済燃料では、中にある比較的短寿命の核分裂生成物の放射性崩壊熱によりジルカロイ（ジルコニウム合金）の被覆管が燃え出す温度まで燃料が加熱した。火災はプール内の古い燃料にまで広がり、その結果、2011年3月に実際に起きた3基の炉心溶融によって放出された量の100倍の長寿命の放射性物質が大気中に放出されたと推測される。

風向きによっては、風下で生じる放射能汚染のために何千万もの人々が自宅や職場から避難しなければならないことになっていた。

2.8.6 使用済燃料5年冷却後、空冷式の乾式貯蔵（危険回避策）

この危険を減らすために、使用済燃料は、使用済燃料プールで約5年間冷却した後、空冷式の乾式貯蔵に移すべきである。そのころには、使用済燃料は水冷却が必要のない程度に冷えている。

2.8.7 核拡散、核テロリズム、使用済燃料火災の高まる危険

プルトニウム増殖炉の夢は、経済的失敗に終わっても、いくつかの国々では政府の支援を得て生き続け、その結果、核拡散、核テロリズム、そして使用済燃料火災の危険が高まっている。再処理と稠密貯蔵の使用済燃料プールの両方をやめることによって、これらの危険を減らすことが可能である。

2.9 日本——再処理プログラムを持つ唯一の非核兵器保有国

2.9.1 日本のプルトニウム保有 46 トン（英 22、仏 15.5、国内 8.5）

非核兵器国の日本は 1969 年から 2001 年にかけて約 7100 トンの使用済燃料を再処理のために英仏に送った（ガス冷却の東海第一原子力発電所からの 1500 トンと軽水炉からの 5600 トン）。2018 年末までに、日本の分離済みプルトニウムは約 46 トンに達した。そのうち英国保管が 22 トン、フランス保管が 15.5 トンである。

2.9.2 六ヶ所再処理工場（年間 800 トン、プルトニウム分離 8 トン）の建設

日本は、1980 年代に、年間約 8 トンのプルトニウム分離能力を持つ大型再処理工場計画（年間 800 トン使用済燃料を処理）を開始した。本州の最北端に位置する青森県の六ヶ所村に建設することが計画された。IAEA の計算方法だと、分離されるプルトニウム 8 トンは、長崎型核兵器 1000 発分に十分な量である。

2.9.3 六ヶ所再処理工場 1993 年着工 2022 年 3 月までで 2.9 兆円

六ヶ所再処理工場の建設が 1993 年に始まり、97 年に完成する予定だった。費用は 7600 億円との見積もり。運転開始は、技術的な問題で遅延を繰り返した。2011 年以後は、福島事故後の安全性強化という課題のためである。2022 年末 3 月末現在、運転開始は 2022 年度上期の予定で、2022 年 3 月までの設備投資は約 2.9 兆円に超えている。2022 年 9 月 7 日日本原燃は六ヶ所再処理工場の 2022 年度上期としていた竣工時期を延期した（26 回目）。

2.9.4 再処理は電力会社の意思ではなく、政府の強制で全量再処理

日本の原子力委員会は、日本の原子力発電所を持つ電力会社が自らの意思で再処理することを決めたと主張し、日本政府は、フランス政府と同じく、実質的に、再処理を強制的なものとして、使用済燃料の全量再処理政策を維持してきた。

① 原子炉等規制法（1957 年）の規定

1957 年「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」は、新しい原子力発電用原子炉の建設の申請に当たっては、使用済燃料の「処分の方法」を明記することと定め、使用済燃料管理方法としては、「原子力の開発及び利用の計画的な遂行に支障を及ぼすおそれがないこと」とした。

② 日本の原子力長期計画（再処理と高速炉を両輪とする）で再処理を義務化

政府の原子力長期計画は、日本の原子力の将来は再処理と増殖炉に基づくことになるというもので、これは再処理を義務化するものであった。

③ 1980 年電事連が再処理工場の建設運転の会社設立、1992 年日本原燃に改組。

④ 2000 年「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」によって、再処理は依然として黙示的に強制された。同法は、日本の地層処分施設に入れ

ることができるのは、再処理と MOX 燃料製造過程で生じた高レベル廃棄物及び「超ウラン元素 (TRU)」廃棄物のみと定め、使用済燃料はそのまま入れられないということである。

2.9.6 2016 年「使用済燃料再処理機構 (NuRO)」設立で再処理を保証

日本政府は 2016 年に「使用済燃料再処理機構 (NuRO)」を設立し、たとえ、日本の電力市場の自由化の中で原子力発電所を持つ電力会社が倒産しても、使用済燃料が着実に再処理されることを保証するとした。 (「東京電力ホールディングス」(東電) は福島第一原発事故の結果、実質的に破産し、政府の資金に依存している)。

日本の原子力発電所を持つ電力会社は再処理機構に対し、燃料がまだ炉内にあるうちに、将来の再処理コストを支払わなければならない。法律が変わらない限り、この資金を中間貯蔵や直接処分に使うことはできない。

2.9.7 軽水炉使用済燃料の再処理はプルトニウム増殖炉初期装荷炉心用

日本はプルトニウム増殖炉の初期装荷炉心用のプルトニウムを提供するために軽水炉の使用済燃料の再処理が必要だと考えていた。少なくとも原子力に関して、燃料の輸入からほぼ自由になれるとのアイデアを日本は受け入れている。

2.9.8 高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム火災事故 (1995 年)

1995 年、日本の増殖炉計画は電気出力 25 万キロワットの高速増殖原型炉「もんじゅ」がナトリウム火災を起こし、大きな痛手を負うことになる。日本原子力研究開発機構 (JAEA) の前身の動力炉・核燃料開発事業団 (動燃) による事故の大きさのもみ消しを巡るスキャンダルが事態をさらに悪化させ、その後 20 年間、動燃、その直後の後継機関、そして、JAEA は「もんじゅ」の運転再開を試みた。

2.9.9 2015 年 原子力規制委員会、「もんじゅ」の廃炉を決定

2015 年、日本の原子力規制委員会は、JAEA は「もんじゅ」を安全に運

転する資質を有していないと宣告し、一年後（2016 年）、政府は、もんじゅの廃炉を決定した。

① もんじゅ廃炉決定後の再処理推進理由の方針転換

「増殖炉」という言葉は、2014 年に閣議決定した「エネルギー基本計画」で姿を消す。代わりに、日本の高速炉推進派は、フランスの高速炉推進派に仲間入りし、再処理、そして、分離済みプルトニウム他の超ウラン元素の高速炉での使用の目的は、地下の処分場に送る廃棄物の量と危険性を減らすことにありと主張した。このため、使用済み MOX 燃料を再処理する第二再処理工場、それに、回収したプルトニウム他の超ウラン元素を核分裂させるための一群の高速中性子「燃焼炉」の建設を必要とした。このプログラムの科学的根拠の欠如は明らかである。

② 2018 年、高速炉開発のための国際協力（アメリカとフランス）

2018 年末、「高速炉開発会議」が高速炉開発のための「戦略ロードマップ」を策定し、政府がこれを決定した。フランスと米国は、この試みにおける国際協力の可能性のある相手とされている。フランスの ASTRID プロジェクトは消えつつあるが、米国エネルギー省のアイダホ国立研究所は、同研究所の将来の確保に役立つ高速中性子試験炉建設を提唱して議会の支持を得ている。

③ 1997 年 プルサーマル計画発表（2018 年末で累積 4.3 トン装荷）

1997 年、日本はフランスに倣って、プルトニウムの一部を MOX 燃料として使用する具体的な計画（プルサーマル）を発表した。計画によると、2010 年までに、年間約 9 トンのプルトニウムが 16～18 基の発電用原子炉に装荷されることになっていた。2009 年に、目標年が 2015 年に延期され、2018 年末現在、日本の軽水炉に装荷された累積の合計は約 4.3 トンに過ぎない。

2.10 再処理を正当化するための論理

2.10.1 原発受入れ自治体への約束（使用済燃料・追加貯蔵施設は敷地外）

2005 年原子力委員会は、再処理を正当化するためにもう一つの論理を使い始めた。この論理は、日本の原子力発電所の敷地が選ばれた際、電力会社は受け入れ県及び市町村に対し、使用済燃料は敷地外に運び出され、追加的使用済燃料貯蔵施設は敷地内に作られないとの暗黙の約束をした。これによって、受け入れ自治体は、放射性廃棄物は原子炉の敷地内に無期限に貯蔵されることはないと安心できた。

2.10.2 使用済燃料の搬出先（六ヶ所再処理工場 3000 トンプール）

英仏と再処理契約を更新しないことにより、日本の使用済燃料の搬出先は六ヶ所再処理工場だけとなった。六ヶ所再処理工場の運転開始が遅れ続け、その使用済燃料受け入れプールは満杯になっている（3000 トンの受入プールには 2021 年 7 月末現在、約 2968 トン保管されている）。搬出先がなくなると、日本の原子力発電所の使用済燃料プールも満杯になる。炉から取り出される使用済燃料のためのスペースがなくなると、日本の原子力発電所は運転停止とならざるを得ない。

2.10.3 六ヶ所再処理工場プール満杯になれば搬出先がなくなる

六ヶ所再処理工場のプールの使用済燃料はできるだけ早く再処理しなければならない。原発のプールから使用済燃料を受け入れるため貯蔵スペースを作るためである。

2.10.4 青森県知事の脅し「再処理やめれば使用済燃料は返還」

問題を複雑にしているのが青森県知事の「脅し」である。知事は、中央政府がその再処理政策を放棄するなら、六ヶ所のプールに貯蔵されている使用済燃料は、元の原子力発電所に送り返すべきと主張している。使用済燃料の原子炉（元の原子力発電所）への搬出は、原子力発電所立地県が敷地内の容量不足で受け入れることができなければ、あるいは、拒絶すれば、

起こりえない。青森県知事の「脅し」は、日本の再処理プログラムの必要性を最終的に正当化する根拠として使われている。

2.10.5 日本に再処理中止の障害はなし、政策の実効あるのみ

日本の再処理中止の障害は、政府がその意志を持てば対処することが可能である。米国を始め、発電用原子炉を持つ国は、使用済燃料プールが満杯になると、空冷式の貯蔵キャスクを取得し、プール内での冷却期間の一番長いものをそこに移している。日本でもこの解決策の可能性が高まっている。

2.10.6 日本で広まりつつある敷地内乾式貯蔵

日本の原発の受入県・市町村で敷地内乾式貯蔵の支持が広まりつつある一つの理由は、2011年の福島第一の事故の際に使用済燃料プール火災に関連した安全性上の懸念である。日本の原子力規制委員会は、プールで5年程度以上冷却した使用済燃料について、乾式貯蔵をプール貯蔵より安全として推進した。2018年12月、規制委は、この方式の貯蔵を推進するために新しい規則を発表した。パブリック・コメントを経て、新規則が2019年に確定した。

2.10.7 日本の分離済みプルトニウム蓄積にたいする批判（米・中）

日本の分離済みプルトニウムの蓄積について、米中両国の批判が高まっている（もっとも、中国は、自身が民生用再処理工場と高速増殖炉の建設計画を進めている）。日本の再処理推進派は、なぜ非核兵器保有国の日本が核兵器何千発分もの分離済みプルトニウムをため込んでもいいのか、の理由について、様々な主張を展開している。

2.11 日本が再処理を許されている理由

日本が日米原子力協定によって核兵器をもたない国のなかで唯一、使用済燃料の再処理を認められた国である。日本が再処理してプルトニウムをため

込んでいることにたいする国内外の批判をかわす理由は以下の3点である。

(1) 軽水炉によって生み出される「原子炉級」プルトニウムの同位体組成は、核兵器に適さない。

(2) 「日本で行う再処理は、ウランとプルトニウムを〔50 対 50 の割合で〕混合して酸化物に転換する混合転換方式が採用されている。したがって、プルトニウム酸化物を単体保有することはない。混合酸化物（MOX）はそのままでは核兵器に用いることはできず、核拡散抵抗性がある。」実際は、混合酸化物では、使用済燃料からのプルトニウム分離を難しくするガンマ線放出放射性核分裂生成物を取り除かれてしまっており、簡単なグローブ・ボックスを使えば、プルトニウムを容易に分離することができる。

(3) 日本は核兵器を製造する意図を持っていない。実際、日本は約 50 年間にわたって、核武装をするのに十分なプルトニウムを持ちつつ、その方向に動いていない。しかし、日本の近隣諸国や米国（核兵器と通常兵器の両方を含むあらゆる軍事的能力を使って日本を防衛するとのコミットメントを表明している）は、日本は脅威を感じれば迅速に核兵器を製造できることを知っている。2018 年に、日本の元経済産業省原子力政策関係高官の田中伸男がバーチャル核抑止の重要性を主張している。「原子力は安全保障、国防上の理由からも必要である。広島・長崎を経験した日本は核兵器を持つつもりは毛頭ないが、北朝鮮の核ミサイルが頭上を飛ぶ時代に核能力を放棄することは彼の国からなめられることになる。」

2.1.2 再処理と濃縮の権利を求める韓国などの主張

日本の先の例は、核兵器国における民生用プルトニウム・プログラムとともに、核不拡散体制を脅かす。潜在的核兵器能力の保有に関心を持つ国々が日本のような再処理能力を取得するのを正当化する。国民の多数が、北朝鮮とのバ

ランスを確保するために核兵器の保有を支持している。韓国では「韓国原子力研究所 (KAERI)」が、長年日本と同じく韓国も使用済燃料を再処理したり、ウランを濃縮したりする「権利」を持つべきだとの主張を展開している。

3 再処理の炉型

3.1 世界の増殖炉・再処理プロジェクトの現状と稼働状況

今日、5 つの核兵器保有国（中国、フランス、インド、ロシア、そして英国）と一つの非核兵器保有国（日本）が民生用再処理プログラムを持っている。

(1) 英国（核兵器保有国）

英国は、この6カ国のうち、原子力発電所を持つ電力会社に再処理を放棄することを許してもいい、と考える唯一の国である。英国は「酸化物燃料再処理工場(THORP)」(ソープ)を2018年末に閉鎖した。古い方の再処理工場B205は、2020年に、すでに退役した第一世代のマグノックス炉の残っている使用済燃料の再処理が終わった時点で閉鎖される予定となっている。

(2) フランスと日本の増殖原型炉の閉鎖

再処理放棄を決めていない5カ国のうち、フランスと日本は、増殖原型炉スーパーフェニックスと「もんじゅ」をそれぞれ1998年と2017年（決定は2016年）に閉鎖した。フランスは、再処理で分離したプルトニウムを軽水炉でMOX燃料として使っている。日本はこれに倣おうとしている。

(3) フランスと日本の違い

2018年、フランスは実際に再処理しているが、日本はしていない。日本の六ヶ所再処理工場の運転は、1997年に開始の予定だったが、様々な技術的及び安全性の問題によって、25回延期された。日本原燃は六ヶ所再処理工場が原子力規制委員会の新規制基準適用合格をうけ2022年度上期に竣工するとしているが、また延期されることは確実である。実際、日本原燃は2022年9月7日、26回目の延期を正式に表明した。新たな完成時期は不明。

(4) ロシア・インド・中国の増殖炉計画

増殖炉開発プログラムは、残りの三つの国（ロシア、インド、中国）で追求されている。フランスと日本は現在、原子力研究開発推進体制派（エスタブリッシュメント）の活動を、主として、超ウラン元素を核分裂させるための高速中性子炉の設計研究に限定している。

(5) ロシアの増殖炉開発計画

ロシアは、最も積極的な増殖炉開発計画を持っていて、2基の原型炉が運転中である。古い方のBN600は、電気出力56万キロワット（560MWe）の高速中性子炉で1980年に臨界に達した。前述の通り、この炉はプルトニウムではなく濃縮ウランを燃料としている。初期に何度ものナトリウム火災に見舞われたが、その後、他のどの増殖炉よりも信頼性の高いものとなっている。ほとんど平均的な軽水炉なみである。

(6) ロシアのBN600

BN600は、経済競争力を持っておらず、2015年に2基目の増殖原型炉、BN800(電気出力82万キロワット=MWe)を完成させ、運転を開始するまでに、ソ連とロシアは20基の大型軽水炉を建設している。BN800の完成と同時に、BN1200の建設を開始することになっていたが、建設開始は延期された。最近では、建設決定がなされるとしても、運転開始予定は2036年以降に延期されることになるだろうと報じられている。

(7) インドの増殖炉プログラム

インドの増殖炉プログラムは、ロシアのものと同じぐらい古い。2018年末現在、重水炉と軽水炉が合わせて22基の建設を終えている。一方で、本格的な高速増殖原型炉（47万kWe=470MWe）を完成させようとしている段階である。2018年3月、インドのエネルギー省（DAE）は、向こう15年の間に、さらに6基の増殖炉が建設されると発表。

(8) 中国の増殖炉計画

中国は、増殖炉研究開発クラブの最新メンバーである。「中国原子能科学研究院（CIAE）」——政府所有の「中国核工業総公司（CNNC）」の核分裂エネルギー研究部門——が、出力 2 万 5000 キロワット（25MWe）の「中国高速試験炉（CEFR）」の運転を開始したのは 2011 年である。CEFR は、その後の 5 年間ほとんど運転されていない。2016 年、CNNC は、同炉の累積発電量は、全出力での 1 時間の運転に相当すると発表した。CNNC は、2017 年、電気出力 60 万キロワット（600MWe）の中国高速原型炉（CPFR）の基礎工事を始めた。

(9) CNNC（中国）の再処理工場

CNNC は、また、その増殖炉プログラム用のプルトニウムを回収するために、パイロット再処理工場を建設した。同工場は、年間約 50 トンの軽水炉使用済燃料を処理する設計能力を持つ。この処理能力だと、分離済みプルトニウムの発生量は年間約 500 キログラムとなる。2010 年末に運転を開始したが、2016 年末現在、プルトニウムの累積回収量はわずか 41 キログラムである。

(10) 中国の大型再処理工場計画

「中国核工業総公司（CNNC）」は二つの大型再処理工場の建設を計画している。

「中国原子能科学研究院（CIAE）」設計の工場は、設計年間処理量は、軽水炉使用済燃料 200 トン。この工場のためのサイト準備活動が 2015 年に内陸部のパイロット再処理工場の近くで始まったと報じられている。

フランスのオラノ社設計の工場は、年間処理能力は、フランス設計の六ヶ所再処理工場と同様の 800 トンである。2018 年 1 月、中仏両政府首脳隣席の下、CNNC はオラノ社と、設計サービスと部品に関する 100 億ユーロ（約 1 兆 2000 億円）の契約に関する覚書に署名した。オラノ社の CEO は、建設は 2018 年に始まるだろうと述べたが、2019 年末現在、実際の契約署名

はなされていない。CNNC は再処理工場の敷地を見つけられていない。

(11) 中国の 800 トン再処理工場

CNNC は、フランス設計の工場を海岸地帯に建設したいと考えている。中国の原子力発電所（すべて海岸線に立地）からの船舶輸送が可能となるからである。中国の海岸地帯は人口密集地で、2016 年 8 月に北京と上海の間にある連雲港市が新しい再処理工場の建設候補地となっていると明らかになった際、数千人がデモ抗議を行い、市当局は急いで、同市での CNNC の敷地選定作業の中断を発表した。

(12) 中国政府の憂慮

福島事故の結果、中国の民衆は原子力に関して敏感になっており、中国政府は、チェルノブイリ事故の後、ソ連の不安定化をもたらすのに一役買ったような反原発運動が中国で起きることを心配している。

3.2 増殖炉・再処理プロジェクトが生き延びている原因

増殖炉・再処理プログラムが実際の経済的な成功も、将来の成功の展望もないにもかかわらず生き延びているのはなぜか。関連の研究開発関係者が他に生き残り戦略を持たず、また、彼らに資金を提供している強力な官僚機構が自分たちの誤りを認めたくないからだ。回収不能の埋没コストを増やし続けると、失敗を認めることがますます難しくなる。

(1) 日本

日本では、経済産業省が全量再処理政策を維持し、原子力発電所を持つ電力会社に再処理を強制し続けている。

(2) ロシア

ロシアの政府所有の世界的競争力を持つ原子力複合企業ロスアトム社は、ロシア政府の資金援助の下、開発途上国に軽水炉を輸出している。

(3) フランス

フランスには、原子力産業に対する強大な過去の投資があり、世界第2位の原子力発電容量は、電力の 70 パーセントを生み出している。原子炉は老朽化し、原子炉建設・核燃料サイクル産業は大きな経済的問題を抱えているが、フランスの原子力産業は今も政治的に大きな影響力を持つ。

(4) インド

1998 年、5 個の核爆発装置実験で初めて核兵器保有国となったインドは、核兵器推進体制派と原子力推進体制派が、今も、大きな政治力を持つエネルギー省で団結している。

(5) 中国

中国は、政府所有の「中国核工業総公司 (CNNC)」が発電用軽水炉の建設で成功を収め、大きな力を持つ。

(6) アメリカ

日・ロ・仏・印・中の 5 カ国のどれも、再処理の決定を市場に任せていない。米国は 1980 年代に市場に委ね、米国の電力会社は再処理のコストを払いたくないとの決断を下した。

(7) イギリス

英国は 2005 年に米国と同じ結果となった。政府所有の「英国核燃料公社 (BNFL)」の倒産を阻止せず、BNFL の負の遺産処理の「原子力廃止措置機関 (NDA)」を設立した後のことである。

(8) ドイツ

ドイツはもう少し複雑で、ドイツによる増殖炉及び再処理の拒絶は、原子力全体を拒絶する過程の一端だった。

(9) 中印ロ

中印ロの三国は、増殖炉プログラムを研究開発プログラムとして維持しているに過ぎない。これらの国々は、向こう数十年のうちに魔法のように出現すると国内の増殖炉推進派が期待し続けている何十基、何百基もの増殖炉

建設には投資していない。

3.3 使用済燃料の種類による区別

3.3.1 再処理技術開発の歴史

1945 年、アメリカのハンフォードで原子爆弾の製造を目的としてプルトニウム生産炉で照射した燃料を化学分別沈殿法で再処理し、プルトニウムを分離することに成功した。1940 年代末までに、湿式および乾式の各種の再処理法が研究され、安定性と経済性に優れたピューレックス（溶媒抽出）法が多く用いられるようになった。

1950 年代以降、発電用原子炉の増加に対応して、ピューレックス法を採用した再処理工場が建設された。経済性の向上のため、軽水炉原発の稼働率と燃焼度向上に応じ、使用済燃料中の比放射能およびプルトニウムの含有量が増加し、これに対応するため再処理技術の改良が試みられたが、十分な成果をあげていない。

3.3.2 プルトニウム生産炉燃料の再処理

再処理技術は、アメリカが 1944 年に原子爆弾製造を目的にプルトニウム生産炉の燃料からプルトニウムを回収することから始まった。再処理技術は、核拡散防止の観点からウラン濃縮技術とならび、国際的にも軍事機密に属する技術であった。その後、原子力の平和利用を目的として、発電用原子炉開発に呼応し、民生用の再処理技術の開発が進んだ。

3.3.3 化学分別沈殿法（1940 年代）

1945 年プルトニウム爆弾製造目的でハンフォードのプルトニウム生産炉（ガス炉）で照射した天然の金属ウランから、プルトニウムを回収する施設の運転が開始された。照射燃料の燃焼度は 500MWd/t 程度で、プルトニウムの含有量は僅か 100ppm 程度であった。ウランを回収する必要はなく、高品位のプルトニウム 239 を単独分離することを目的として化学分別沈殿法が

採用された。この化学分別沈殿法は、リン酸ビスマスを沈殿担体としてプルトニウムを共沈分離し、さらにフッ化ランタンを沈殿担体として、プルトニウムの沈殿精製を繰り返す方法である。この方法は処理操作が複雑で、薬品の多量の添加とウランを回収しないことによる放射性廃棄物量の増大が難点であった。

3.3.4 溶媒抽出法（1950～1960 年代前半）

化学分析沈殿法に代わる再処理技術として種々の溶媒抽出法が米国原子力研究所で開発研究された。ハンフォードにおいてヘキソンを抽出剤とするレドックス法、サバンナ・リバーにおいてはジブチルカルビトールを抽出剤とするプテックス法、さらにはオークリッジにおいて燐酸トリブチル（TBP）を抽出剤とするピューレックス（PUREX）法が開発され、それぞれ、パイロット・プラントでの試験が行われた。

3.3.5 乾式再処理法等その他の再処理法（1950～1960 年代前半）

液体金属抽出法、熔融塩抽出法、熔融塩電解法、高温化学法、ハロゲン化物揮発法、等の再処理法が米国を中心に研究された。工程上の装置、機器に使用する材料の耐腐食性が不十分であったり、製品の純度、安全性にも問題があったりで、これらの研究はいずれも中断された。

3.3.6 軍用ガス炉にピューレックス法が採用（1950 年代後半～60 年代前半）

イギリスとフランスは、軍用ガス炉を改善して、燃焼度を向上（3000MW 日／トン）させ、軍用プルトニウムを回収しながら発電する方法が実用化された。発電用黒鉛ガス炉の使用済燃料の再処理に溶媒抽出法が採用され、フランスで 1958 年、イギリスで 1964 年にガス炉燃料の再処理工場が稼働を開始した。

3.3.7 軽水炉燃料の再処理もピューレックス法（1960 年代後半～現在）

軍事用の兵器用プルトニウムの生産を考えず、原子力発電の経済性向上

のみを目的とした軽水炉がアメリカで開発され、カナダでは重水減速冷却炉が実用化された。現在では軽水炉が世界における発電用原子炉の主流となった。軽水炉の使用済燃料から回収されるウラン、プルトニウムを再利用する核燃料サイクルが可能となり、同時に、再処理が核燃料サイクル政策上で重要な位置をしめることになった。

3.3.8 軽水炉使用済燃料のピューレックス法による再処理

軽水炉燃料は3%程度の濃縮ウランが用いられ、天然ウランを燃料とするガス炉に比べ、燃焼度は約10倍の30000MW日/トン程度で、プルトニウムおよび核分裂生成物の含有量も1桁増大した。ガス炉の使用済燃料の再処理に採用されたピューレックス法が、軽水炉原発の使用済燃料の再処理にも引き継がれた。1966年にベルギー、1971年にドイツ、1976年にフランス、1981年に日本で、軽水炉原発の使用済燃料の再処理工場が建設され、操業を開始した。

3.3.9 軽水炉使用済燃料の再処理の問題点

発電用軽水炉の使用済燃料は、原発の経済性の理由から稼働率と燃焼度の上昇を図った結果、使用済燃料の比放射能とプルトニウム含有量の著しい増加によって、ガス炉の使用済燃料では問題のなかったピューレックス法の再処理工程に次々に難点が現われ、それぞれの再処理工場でトラブルが多数発生し、実際の稼働率も低下することになり、工程および装置や機器に関して、問題点が浮き彫りになった。

① 不溶性核分裂生成物の増大

ルテニウム、パラジウム、ロジウム等の白金族元素の増大に伴うトラブルの発生。効率的な分離機（パルスフィルター、遠心清澄器）の開発が必要。

② 抽出溶媒の放射線劣化

比放射能の増大に伴い、抽出溶媒の放射線劣化が避けられなくなり、

その防止のため、接触時間の短い溶媒抽出器（パルスカラム、遠心抽出機）の開発が必要。

③ 溶解工程の臨界制御

プルトニウムの濃度が高くなると、溶解工程における臨界制御の制約が特に厳しくなり、中性子吸収材の改良開発と採用および連続溶解槽の開発が必要。

④ 揮発性核分裂生成物の分離とガラス固化体処理技術の改善

ヨウ素などの揮発性の核分裂生成物をいかに効率的に分離するか、ガラス固化施設の技術問題の解決など、放射性廃棄物に関する技術開発が必要。

3.3.10 発電用軽水炉原発使用済燃料の再処理の今後

軽水炉使用済燃料は、さらに燃焼度が高くなり、プルトニウム含有量も増加する傾向は続く。高速炉の実用化も難しい中、燃焼度が高く、プルトニウム富化度も高くなった使用済燃料の再処理にピューレックス法を適用するには、溶媒の放射線劣化防止に難点がある。難点を再処理工程および工程内の装置の改善により克服するか、湿式法を避けて乾式再処理法を開発するか、いずれ今後の技術開発が必要。

3.4 燃料別の世界の再処理工場

3.4.1 世界の再処理工場の概観

世界では、この 60 年の間に約 20 の再処理工場が建設された。原子力発電の黎明期に天然ウラン金属燃料を使用したイギリスおよびフランスでは、発電量当たりで多量に排出される使用済燃料の再処理のために大型再処理工場を建設・運営した。世界的に原子力発電においては軽水炉が主流になるにつれ、軽水炉使用済燃料の再処理が計画され、米国、イギリス、フランス、日本、ドイツ、ベルギーで実証プラントが建設、運転され、商業規模の工場

の基礎が築かれた。

米国では再処理を行わない政策に転換したものの、イギリス、フランスおよび日本は第二世代の大型商業用酸化物燃料再処理工場を計画し、THORP（イギリス）、UP3（フランス）、UP2-800（フランス）、日本の六ヶ所再処理工場が建設された。UP3、UP2-800 および THORP は稼働したが、六ヶ所再処理工場は 2022 年度上期に操業開始を予定しているが、実現の見通しはたっていない。

THORP 工場は、福島第一原発事故後の 2012 年に廃止を決定し、計画通り 2018 年 11 月に操業を中止した。

世界の再処理工場のなかには、すでに運転を中止したものや稼働中のものの、改造等により当初の目的が変わったもの、いまだに完工していないもの、完工したもののホット運転には至らず閉鎖されたもの等がある。

3.4.2 原子炉型での再処理工場の実用化

原子炉型のうち使用済燃料の再処理が実用化・工業化の段階まで進んだのは、米国型軽水炉である。世界各国で広く用いられており、軽水炉酸化物燃料を対象とする再処理工場としては 6 工場が操業している。

3.4.3 天然ウラン燃料（炭酸ガス冷却炉燃料）の再処理工場

イギリスおよびフランスは、第二次大戦末期から軍事用の核兵器級プルトニウム生産を目的に研究を開始し、プルトニウム生産炉とプルトニウム回収工場をイギリスのウィンズケール（現在のセラフィールド）およびフランスのマルクールに建設した。ガス冷却炉は数千 MW 日／トンの燃焼度であり、発電量当たりの使用済燃料が多い（ウラン量で軽水炉の 10 倍）ので、必要な再処理工場の規模（ウラン取扱量）が大きくなる。再処理工場は大型とならざるを得ず、千トンウラン／年級の処理能力をもつ。代表的な再処理工場は、イギリス・セラフィールドの B205 工場とフランス・ラアーグの UP2 工場である。これらの再処理工場は、軽水炉に比べ、燃焼度がはるか

に低いので、取り扱うウラン 235 やプルトニウム等の核分裂性物質や核分裂生成物の量と濃度がはるかに少なく、低いので、再処理の技術的難度は低いという利点がある。

① イギリス

イギリスでは、コールダーホール炉で始まる一連のマグノックス被覆燃料炉が開発され、世界で 37 基建設され、輸出も行われた。セラフィールドに建設された B205 再処理工場は、現在もマグノックス炉の使用済燃料が残っている限り稼働している。

② フランス

フランスは、フランス電力庁（EDF）が同系列のアルミニウム被覆の燃料炉を開発し、シノンに発電炉を建設して以来、いくつかの地にガス冷却炉が建設された。ラ・アーグの UP2 再処理工場は、1987 年から UP2-400 として軽水炉燃料専用再処理工場に改造されて稼働中である。

③ ガス炉燃料の再処理工場が軽水炉燃料再処理の先駆け

再処理の基本プロセスは、使用済燃料を硝酸で溶解し、溶媒抽出でウラン、プルトニウム、核分裂生成物にそれぞれ分離・精製する工程である。これはガス冷却炉燃料でも軽水炉燃料でもほぼ類似したプロセスである。その意味では、B205 や UP2 のガス炉燃料処理の大型再処理工場は、技術の伝承とサイトの定着という意味で、軽水炉燃料の再処理工場の先駆けとなった。

3.4.4 軽水炉燃料の再処理工場の展開（技術開発の 3 要点）

濃縮ウランの利用を前提として米国で開発された軽水炉原発が、世界的に大規模な市場を獲得して建設されていくにつれ、軽水炉原発の使用済燃料の再処理技術の開発が開始された。技術開発の要点は次の 3 項目である。

- (1) プルトニウム生産炉、天然ウラン金属燃料ガス炉等での低燃焼度燃料の再処理で培った溶媒抽出法を軽水炉の燃焼度レベルまで高め、適用可能

とするプロセス、装置等の改良を可能とすること。

(2) 軽水炉燃料集合体の燃料部分を露出させて硝酸溶解液にする前処理工程を確立すること。

(3) 放射性物質の取扱量の増大に配慮して環境影響の低減化を図ること。

3.4.5 軽水炉燃料再処理技術の研究開発 その1

① アメリカ（ウェストバレー再処理工場）

米国では、オークリッジ国立研究所が中心となって技術開発が進められ、NFS 社のウェストバレー再処理工場（WVRP）として結実し、燃料集合体の剪断・溶解（チョップアンドリーチ方式）＋（プラス）ピューレックス法溶媒抽出という軽水炉燃料の再処理方式の原型が確立した。

② ヨーロッパ（ベルギーのモル再処理工場）

ヨーロッパでは、ヨーロッパ連合としてユーロケミック社が設立され、1955 年のジュネーブ国際会議で公開された米国の再処理技術の発展と実用化が図られた。米国からの技術援助（情報提供等）もあり、同社はベルギーのモルに再処理工場を計画し、1966 年に完成した。モル再処理工場は、1974 年までの運転を通して、ヨーロッパの再処理技術に貴重な経験をもたらした。モル再処理工場は、その後、主要なパートナーであるフランス、ドイツがそれぞれ自国の再処理工場計画を持ち、サイトの大規模化にも限界があったため、同年に運転が中止された。

③ アメリカ（ミッドウェスト再処理工場）

米国では、1960 年代から 70 年代にかけて GE 社によって新しい設計概念のミッドウェスト再処理工場（MFRP）が建設されたが、コールド試験運転中にウランの脱硝フッ素化工程での技術的難点を解決できなかったために計画は 1974 年に中止となった。

3.4.6 軽水炉燃料再処理技術の研究開発 その2

1960 年代中頃より、発電用原子炉の大部分が低濃縮ウラン酸化物燃料に

移行するのが明確になったことで、イギリスとフランスでは天然ウラン金属燃料炭酸ガス炉路線で構築されていた核燃料サイクル関連技術の見直しが必要となった。

① イギリスとフランス

イギリスは稼働中の B205 再処理工場に、フランスは UP2 再処理工場の前段部に付加するかたちで、酸化物燃料用の前処理施設（イギリスでは退役した B204 工場の建屋に前処理施設等を設け、フランスは HAO を新設）を自国技術で建設し、運転した。HAO（高放射性酸化物のフランス語頭文字）は幾多の改良を経て、UP2-400 再処理工場の前処理施設として 1995 年まで稼働を続けた。

② 日本（動力炉・核燃料開発事業団）

動力炉・核燃料開発事業団（核燃料サイクル開発機構を経て現在は日本原子力研究開発機構）の東海再処理工場は、時間軸ではフランスの UP2-400 に対応している。ともにフランスの SGN 社によって設計された。燃料集合体の剪断と回分式溶解方式の前処理施設が採用されているが、両者の機器、配置、工程設計はかなり異なっている。

東海再処理工場（210 トン／年）は、1971 年に着工され、1977 年に完成し、1985 年までで 179 トン再処理した。東海再処理工場は、処理能力を 0.7 トン／日とし、年間処理量を最大 120 トンと修正した。2006 年 3 月で再処理を終了し、日本原子力研究開発機構（JAEA）が原子力規制委員会に対し、2016 年 9 月廃止に向けた計画を申請し、原子力規制委員会は 2017 年 6 月に廃止措置計画を認可した。東海再処理工場は 2014 年末現在、軽水炉燃料を 1020 トン受け入れ、1020 トン再処理した。東海再処理工場では、2004 年 6 月にプルトニウムを用いた乾式再処理プロセスの試験を行っている。

③ アメリカ（WVRP 再処理工場の拡張更新、バーンウェル再処理工場）

米国では、この時期に、NFS 社の WVRP の拡張・更新計画（3 トン／日＝1095 トン／年）があり、また AGNS 社のバーンウェル再処理工場（BNFP、5 トン／日＝1825 トン／年）の建設があったが、ともに稼働には至らなかった。1977 年、カーター政権により核不拡散政策の一環としての商業用（民生用）再処理の禁止が策定された。

④ ドイツ（カールスルーエ再処理工場）

ドイツ（当時西ドイツ）では、カールスルーエ原子力研究所に隣接してカールスルーエ再処理工場（WAK）を建設し、小規模ながら広範囲に再処理技術の高度化研究が続けられた。

3.4.7 軽水炉燃料再処理技術の研究開発 その3

発電用軽水炉原発から排出される使用済燃料の再処理の受託を目的として、再処理事業の国際合弁会社としてユナイテッドリプロセッサーズ（URG）社が 1971 年に設立された。URG 社は、イギリス BNFL の THORP 再処理工場とフランス COGEMA 社（その後、AREVA NC 社）の UP3 を使用したが、後に合併は解消され、BNFL、COGEMA との個別契約となった。

① イギリス（THORP 再処理工場）

THORP は、本来、自国の改良型ガス冷却炉（AGR、低濃縮ウラン酸化物燃料、黒鉛減速炭酸ガス冷却炉）の使用済燃料を再処理の対象としていたが、上記の軽水炉燃料の受託分を考慮して、規模を 1200 トン／年（実際の再処理が遅れ、処理能力 850 トン／年に修正）とし、コストの低減を図った。THORP 再処理工場は、1992 年に建設を完了、1994 年 1 月に操業を開始し、2001 年までの累積再処理量は 3900 トン（2005 年で約 5000 トン）である。THORP は、2018 年 11 月に 24 年間の操業に幕を閉じた。それまで、9 カ国 30 の顧客から 9000 トン以上の使用済燃料を受け入れた。THORP 再処理工場は日本（2674 トン委託）など再処理を委託する海外顧

客が主に拠出した約 2700 億円の総工費で建設された。顧客の多くがその後、再処理よりも使用済燃料を当面貯蔵（乾式貯蔵・直接処分）する方向で管理することになったため、契約作業量が完了した時点で停止廃止した。今後は、2070 年代まで使用済燃料の貯蔵施設として継続活用される予定である。THORP 再処理工場の操業停止により、世界で稼働する商業用・民生用の再処理工場は、フランスのアレバ社から引き継いだオラノ社のラ・アーク再処理工場（UP2-800 と UP3）のみとなった。

② フランス（ラ・アーク再処理工場、UP2-800 と UP3）

COGEMA 社の UP3 再処理工場（800 トン／年）は、国外から受注した使用済燃料の処理が建前であるが、1989 年末より部分的ホット試験運転を開始し、1990 年夏より全面的なホット運転に入った。引き続いて自国内の使用済燃料の処理を目的とする UP2-800 が 1994 年に運転を開始し、2002 年までの累積処理量は両施設あわせて 18000 トンに達する。

UP2-800 と UP 3 はともに 2003 年に年間処理量を 1000 トン／年に増強したが、両工場の年間最大処理量を 1700 トン／年と定められた。処理実績では、1996 年に 1600 トンに達し、2001 年から 2005 年は 900 トンから 1100 トンの間で推移している。両施設の累積再処理実績は、2006 年までで 20000 トンに達している。

③ 日本（六ヶ所再処理工場）

日本は、軽水炉の使用済燃料再処理について、イギリスとフランスの再処理工場に委託する一方、全量再処理政策のもと、増加する再処理需要に対応するため、日本原燃（株）が六ヶ所村に再処理工場（800 トン／年）を建設中であるが、2010 年の運転開始の予定が大幅に遅れている。2011 年 3 月の福島原発事故後、原子力規制委員会に対し新規制基準に関する適合性審査を 2014 年に申請し、2020 年 7 月に合格して、2022 年度上期の竣工としているものの、原子力規制委員会の設計・工事計画の認可（設工認）

の見通しは立っていない。

④ ドイツ（バッカースドルフ再処理工場）

ドイツでは、WAW（WA-350）という再処理工場をバッカースドルフに建設することになっていた。しかし、再処理コストなどの経済的理由により、この計画は1989年に中止となった。

⑤ 中国（蘭州再処理工場）

中国は、商業再処理用多目的パイロットプラント（RCP）を甘粛省の蘭州核燃料サイクル施設にピューレックス法の蘭州再処理工場を建設し、2005年に50トン／年（0.4トン／日）の処理能力で運転開始した。この再処理工場の建設にはフランスが協力した。また、甘粛省嘉峪関に年間800トン規模の商業用再処理工場（MRF）の建設をフランス AREVA の技術支援を得て計画している。この工場は、2025年ごろからホット試験を行いたいとしている。

4 再処理の現状と中止の理由

4.1 再処理の基本的な問題

4.1.1 高速中性子増殖炉の問題

液体ナトリウム冷却「高速中性子増殖炉（FBR）」は、コストの高さと技術的問題のため、発電用原子炉として広範に利用されるには至らなかった。

「プルトニウム経済」というビジョンは、現実のものとはならなかった。いくつかの国々では再処理が続いた。規模は小さいが、潜在的な核兵器の数で測れば、巨大なものだった。

4.1.2 フランスのプルトニウム利用

フランスでは、分離済みプルトニウムは普通の軽水冷却原子炉用のプルトニウム・ウラン「混合酸化物（MOX）」燃料の製造に使われるようになった。この目的のためにプルトニウムを分離するのは非経済的だが、フランス

政府は、あたかもフランスにおける電力コストの増大は、何千人もの雇用を意味する巨大な再処理工場の維持のために許容できる代価と考えているかに見える。

4.1.3 イギリスの場合

英国で再処理が続けられ、拡大したのは、政府所有の英国核燃料公社（BNFL）をフランスのコジエマ社と競合する国際的再処理サービスの提供者として確立するためである。英国自身の分離済みプルトニウムのストックは、使用計画のないまま増え続けた。

4.1.4 日本の事情

日本は、東海村のパイロット再処理工場の運転を続け、産業規模の六ヶ所再処理工場の建設する計画を変えなかった。増殖炉がない（もんじゅの廃炉）ため、フランスの例に倣って、余剰プルトニウムを軽水炉の燃料に（プルサーマルでの使用）することを決めた。

4.1.5 ロシアの原子力推進

ロシアの原子力研究開発（R&D）推進体制派は、頑固に増殖炉の開発を追求し続けた。BN-600 増殖原型炉の燃料はプルトニウムではなく濃縮ウランであるにもかかわらず、その増殖炉構想を支えるために再処理を続けた。

これら4カ国が保有する未照射の民生用プルトニウムの量は増え続け、2018年には合計約300トンに達している。

4.1.6 プルトニウム管理指針（仏・日・ロ・英の4カ国とベ・中・独・ス・米の5カ国）

1997年、最大量の民生用分離済みプルトニウムを持つ4カ国（フランス、日本、ロシア、英国）は、他の高度な原子力プログラムを持つ5カ国（ベルギー、中国、ドイツ、スイス、米国）とともに、「核拡散のリスクの増大をもたらすことを避ける必要性」を認識し、「プルトニウム管理指針」に合意した。この指針の一つは「可能な限り早期に受給バランスを達成することの

重要性」であった。さらに、各国がこのバランスをどの程度達成しているかを世界が監視できるように、9カ国はそれぞれ、「国際原子力機関（IAEA）」に対し、民生用未照射プルトニウムの量に関する公開年次報告を提出することを約束した。

4.1.7 未照射プルトニウム保有量

フランス、日本、ロシア、英国は、未照射プルトニウムの保有量を合理的な作業在庫レベルにまで減らすことに成功していない。

4.2 民生用再処理の執拗な継続と中止

今日、5つの核兵器保有国（中国、フランス、インド、ロシア、そして英国）と一つの非核兵器保有国（日本）が民生用再処理プログラムを持っている。

4.2.1 英国 電力会社に再処理の放棄を許す

英国は、この6カ国のうち、原子力発電所を持つ電力会社に再処理を放棄することを許してもいいと考える唯一の国である。英国は「酸化物燃料再処理工場(THORP)」（ソープ）を2018年末に閉鎖した。古い方の再処理工場B205は、2020年に、退役した第一世代のマグノックス炉の残っている使用済燃料の再処理が終わった時点で閉鎖される予定となっている。

4.2.2 再処理放棄を決めていないフランスと日本

再処理放棄を決めていない5カ国のうち、フランスと日本は、増殖原型炉スーパーフェニックスと「もんじゅ」をそれぞれ1998年と2017年（決定は2016年）に閉鎖した。フランスは、再処理で分離したプルトニウムを軽水炉でMOX燃料として使っている。日本はこれに倣おうとしている。2018年、フランスは実際に再処理していたが、日本はしていなかった。日本の六ヶ所再処理工場の運転は、1997年に開始の予定だったが、様々な技術的及び安全性問題によって、延期が繰返えされてきた。日本原燃は六ヶ所再処理工場が2020年7月に原子力規制委員会の新規制基準適用審査の合格をうけ

て 2022 年度上期に竣工するとしていたが、2022 年 9 月に 26 回目の延期を行った。竣工時期は明らかにしていない。

4.2.3 増殖炉の追求（ロ・印・中）

増殖炉開発プログラムは、残りの三つの国々（ロシア、インド、中国）で追求されている。フランスと日本は現在、主として、超ウラン元素を核分裂させるための高速中性子炉の設計研究に限定している。

4.2.4 ロシアの増殖炉計画

ロシアは、2 基の原型炉が運転中である。BN600 は、電気出力 56 万キロワット（560MWe）の高速中性子炉で 1980 年に臨界に達した。この炉はプルトニウムではなく濃縮ウランを燃料としている。初期に何度ものナトリウム火災に見舞われたが、その後、他のどの増殖炉よりも信頼性の高いものとなっている。平均的な軽水炉なみである。BN600 は、経済競争力を持っておらず、2015 年に 2 基目の増殖原型炉、BN800(電気出力 82 万キロワット＝MWe)を完成させ、運転を開始するまでに、ソ連とロシアは 20 基の大型軽水炉を建設している。元の計画では、BN800 の完成と同時に、BN1200 の建設を開始するとしていたが、建設開始は延期され、最近では、建設決定がなされるとしても、運転開始予定は 2036 年以降に延期されることになるとされる。

4.2.5 インド

インドの増殖炉プログラムは、ロシアと同じくらい古い。2018 年末現在、重水炉と軽水炉合わせて 22 基の建設を終えている。一方、最初の本格的な高速増殖原型炉（47 万 kWe＝470MWe）を完成させようとしている段階である。2018 年 3 月、インドのエネルギー省（DAE）は、向こう 15 年の間に、さらに 6 基の増殖炉が建設されると発表している。

4.2.6 中国の増殖炉研究開発

中国は、増殖炉研究開発クラブの最新メンバーである。「中国核工業総公

司（CNNC）」の核分裂エネルギー研究部門の「中国原子能科学研究院（CIAE）が、出力 2 万 5000 キロワット（25MWe）の「中国高速試験炉（CEFR）」の運転を開始したのは 2011 年。それまでに、電気出力 100 万キロワット（1000MWe）級の軽水炉を 14 基建設し終えた。高濃縮ウランを使った二つの初期装荷炉心はロシアから購入された。

4.2.7 増殖炉・再処理プログラムが生き延びる理由

増殖炉・再処理プログラムが実際の経済的な成功も、将来の成功の展望もないにもかかわらず生き延びているのはなぜか。関連の研究開発関係者が他に生き残り戦略を持たず、また、彼らに資金を提供している強力な官僚機構が自分たちの誤りを認めたくないからだ。しかし、回収不能の埋没コストを増やし続けると、失敗を認めることがますます難しくなる。

4.2.8 電力会社に再処理を強制し続ける経済産業省

日本では、強大な力を持つ経済産業省が再処理プログラムを維持し、原子力発電所を持つ電力会社に再処理を強制し続けている。

4.2.9 ロシアのロスアトム社及びフランスの原子力産業への強大な投資

ロシア政府所有の原子力複合企業ロスアトム社は、同国の非採取産業として唯一、世界的競争力を持つ。ロスアトムは、ロシア政府の資金援助の下、開発途上国に軽水炉を輸出している。

フランスには、原子力産業に対する強大な過去の投資があり、その世界第 2 位の原子力発電容量は、同国の電力の 70 パーセントを生み出している。その原子炉は老朽化してきており、原子炉建設・核燃料サイクル産業は大きな経済的問題を抱えているが、フランスの原子力産業は今も政治的に非常に大きな影響力を持つ。

4.2.10 インドの核兵器推進派と原子力推進派の団結

1998 年に行った 5 個の核爆発装置実験で初めて核兵器保有国となったことを認めたインドでは、核兵器推進体制派と原子力推進体制派が、今も、大

きな政治力を持つ一つの機関—エネルギー省—の中で団結している。

4.2.1.1 中国核工業総公司

中国では、政府所有の「中国核工業総公司（CNNC）」は、発電用軽水炉の建設で成功を収め、大きな力を持つ。

4.2.1.2 再処理の決定を市場に任せる（米・英）か、否（5カ国）か

仏・日・ロ・印・中の5カ国のどれも、再処理の決定を市場に任せてはいない。米国は1980年代に市場に委ね、米国の電力会社は再処理のコストを払いたくないとの決断を下した。英国は2005年に同じことをし、同じ結果となった。政府所有の「英国核燃料公社（BNFL）」の倒産を阻止せず、BNFLの遺産を処理する「原子力廃止措置機関（NDA）」を設立した後である。ドイツは、もう少し複雑である。ドイツによる増殖炉及び再処理の拒絶は、原子力全体を拒絶する過程の一端だった。

4.2.1.3 中印ロの選択

中印ロの三国は、その増殖炉プログラムを研究開発プログラムとして維持しているに過ぎない。この国々は、向こう数十年のうちに魔法のように出現すると国内の増殖炉推進派が期待し続けている何十基、何百基もの増殖炉建設には投資していない。

4.3 フランス：軽水炉でのプルトニウム・リサイクル

4.3.1 新しい高速中性子炉への関心

フランス原子力庁（CEA）は、現在、ナトリウム冷却炉が発電用に経済的だとは言っていない。しかし、新しい高速中性子炉の建設に関心を持ち続けている。

4.3.2 日本 新世代原子炉、ASTRID プログラムへの参加

2012年、CEAは、ASTRIDの建設を提唱し、ナトリウム冷却高速炉のアイデアを復活させたが、2016年にCEAが示すことができたのは、詳細設計

の作業を 2020 年に開始することを想定した「討議用プラン」だけだった。日本は、失敗に終わった原型炉もんじゅの廃止措置について決定した際、高速炉研究プログラムは、ASTRID プログラムへの参加を通じて続けられると説明した。

4.3.3 ASTRID 計画の遅れ

ASTRID の計画は遅れ続けた。2018 年 1 月、見積りコストが高すぎるとして、CEA は ASTRID の電気出力を 60 万キロワットから 10～20 万キロワットに縮小すると提案した。

4.3.4 ASTRID プロジェクトの凍結

2018 年 11 月 28 日、『日経新聞』が、フランスは日本に対し、ASTRID プロジェクトの凍結意向を伝達、と報じ、政府はこのニュースを否定したが、1 年後、CEA はこれを認めた。

4.3.5 ASTRID（ナトリウム冷却高速炉）正当化論への異論

ASTRID の正当化論に対する異論は、2012 年の段階でフランス「放射線防護原子力安全研究所（IRSN）」、13 年には、フランス「原子力安全局（ASN）」から出された。両者とも、使用済燃料の中の長寿命放射性核種を破壊しようという経費のかさむプログラムは、地下深くに埋設された使用済燃料に起因する元々小さな危険性をさらに減らすための「必要性」では正当化できないとした。「米国科学アカデミー（NAS）」も、1996 年に同じ結論に達した。「被曝線量の減少はどれをとってみても、それだけでは、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。」

4.3.6 軽水炉燃料でのリサイクル用プルトニウム分離の継続

軽水炉燃料でのリサイクル用のプルトニウム分離は、フランスの巨大な総額 200 億ドル（約 2 兆 2000 億円）の再処理施設群で続けられた。再処理工場がフランス西北部のノルマンディー地方の田舎にあるラ・アークで 5000 人の労働者を雇用しているという事実が考慮された点である。もう一

つは、フランスにおける再処理の中止は、中国に再処理工場を売ろうとしているフランス政府所有企業アレバ社の企みの障害になるという点である。

4.3.7 再処理で分離した MOX 燃料のコストは低濃縮ウラン燃料の 5 倍

ラ・アークで分離されたプルトニウムは、陸路でフランス南部に運び、マルクール・サイトで劣化ウランを混合し、軽水炉用の MOX 燃料を製造する。この MOX 燃料は、フランスの軽水炉が使う燃料の約 10 パーセントを提供する。2000 年にフランスの研究によると、MOX 燃料の製造には、それによってとって代わられる低濃縮ウラン燃料の 5 倍のコストがかかる。

4.3.8 フランスの流量適切性原則（プルトニウム在庫の蓄積を防ぐ）

2003 年にフランスは「イーコール・フロー」政策（後に、「流量適切性原則」と呼ばれる）を発表した。目的は「使用不能の分離済みプルトニウム在庫の蓄積を防ぐ」ということだったが、フランスの年次公開報告書で「原子炉サイトその他の場所で未照射 MOX 燃料あるいは他の製造品の中に入っている」として発表されている未照射プルトニウムの量は、20 年間にわたって、平均して毎年 1 トン以上の割合で増え続け、主として、使用不能の MOX 燃料の蓄積の理由は、製造の際に装荷対象となっていた原子炉がもう存在しない（フランスとドイツの増殖炉）か、MOX 燃料が品質管理基準を満たしていないか、である。その結果、フランスの未照射民生用プルトニウムの総量は、1995 年の約 30 トンから 2016 年の 65 トンへと、2 倍以上に増えている

4.3.9 MOX 燃料の使用済燃料は軽水炉では効率的にリサイクルできない

軽水炉で MOX 燃料を 1 回照射しただけでは、含まれるプルトニウムの量は 3 分の 1 程度しか減らない。フランスは、軽水炉での 2 番目のリサイクルのためにプルトニウムをまた分離するということはしていない。MOX 燃料を 1 サイクル使用すると、プルトニウム 239 とプルトニウム 241 が約 60 パーセント減ることによって、同位体組成が、軽水炉では効率的に核分裂させ

ることはできないプルトニウム 238、240、242 の方に移動するからである。したがって、使用済み MOX 燃料は、将来、高速炉が建設された場合に再処理すべく、貯蔵されている。

4.3.10 MOX 燃料の再処理して分離したプルトニウムのコストは

フランスが、ナトリウム冷却炉のコストはそのベネフィットを上回るとの判断に至りつつある。結論として、使用済み MOX 燃料は地下処分場に入れて直接処分しなければならない。これは、超ウラン元素を地下に埋めるのは許容できないから再処理が必要との CEA の主張を土台から崩すことになる。

4.4 英国：再処理プログラムがついに閉幕へ

「この工場は、元々、建設されるべきではなく、また、計画通り運転できたことはなく、誰にもどうしていいか分からない大量の〔回収〕ウランとプルトニウムを遺産として残した。」マーティン・フォーウッド「放射能の環境に反対するカンブリア人(CORE)」

4.4.1 英国 増殖炉を放棄した後も、民生用プルトニウム分離を続ける

英国は、増殖炉プログラムを放棄した 1994 年以降も、別の利用計画のないまま、長期に亘って民生用プルトニウムの分離を続けた。元の所有者ブリティッシュ・エナジーが倒産した後、2010 年に「フランス電力 (EDF)」が英国の第二及び第三世代の発電用原子炉の所有権を得た。EDF はフランス政府の官僚機構によって、その使用済燃料をラ・アーグで再処理することを余儀なくされているが、英国政府は EDF に対し、同社が英国で保有する原子炉から出る使用済燃料の再処理契約の更新を拒否することを許した。しかし、英国は 1994 年から 2010 年まで再処理を続けていた。

4.4.2 1957 年 軍事用プルトニウム分離再処理工場で火災事故

英国は、1952 年に核兵器用のプルトニウムを分離するためイングランド

北西海岸のウインズケールで再処理プログラムを開始した。ウインズケール・サイトは、後にセラフィールドと改名される。同サイトで建設された最初の 2 基のプルトニウム生産炉のうちの 하나가 1957 年に火災を起こし、大量の揮発性の放射性核分裂生成物ヨウ素 131 を放出し、風下の広範な地域の牧草地を——そしてそれによって牛乳を——汚染した。

4.4.3 核兵器用プルトニウムの需要がないのに再処理が続けられた理由

英国の核兵器用プルトニウムの需要は、1995 年頃にはすでに満たされていた。それにもかかわらず再処理が続けられたのには、二つの理由がある。

- (1) 英国の第一世代のマグノックス炉で使われた金属ウラン燃料は水の中では腐食しやすい。マグノックス燃料の乾式貯蔵方法が開発されたが、10 カ所以上のサイトの 1 カ所で活用されただけだった。
- (2) 1970 年代末、政府所有の「英国核燃料公社 (BNFL)」が、英国は外国の軽水炉用の再処理サービス提供者としてフランスと競合するために「酸化物燃料再処理工場 (THORP)」(ソープ) を建設すべきだと提案した。英国の第二世代の「改良型ガス冷却炉 (AGR)」のセラミック燃料は、軽水炉の燃料のように水の中で無期限に保管することが可能だが、英国政府は BNFL を支援するために、国営の「中央電力庁 (CEGB)」の解体の結果設立された 2 社 (ニュークリア・エレクトリック及びスコティッシュ・ニュークリア社) に対し、AGR の燃料を THORP 工場で再処理する契約を結ぶよう圧力をかけた。

4.4.4 AGR の使用済燃料を THORP 再処理工場で再処理する裏事情

AGR の使用済燃料は、マグノックス炉の燃料と同じく、英国の高速増殖炉プログラムのために必要だとされたが、英国は 1994 年に高速炉プログラムを放棄したにもかかわらず、AGR 炉の燃料の再処理契約は実行に移された。まさに THORP 工場が運転を開始した年のことである。

1993 年、ビル・クリントン大統領科学顧問のジョン・ギボンズが、英国

側担当者のウィリアム・ウォルドグレイブ公共サービス・科学大臣に電話で読み上げた。

ギボンズは、英国は THORP の運転により分離済みプルトニウムの保有量を増やすとともに放射能を帯びた施設を追加して除染作業を増やす代わりに、「バーチャル再処理」により、外国の顧客との再処理契約を履行することができる」と指摘した。つまり、顧客に対し、使用済燃料と引き換えに、マグノックス炉燃料再処理工場ですでに生じている分離済みプルトニウムと高レベル廃棄物を提供するのである。後に判明したのだが、この電話の数か月前に、英国の内閣府において同様の提案が議論されていたとのことである。

4.4.5 BNFL の負債がかさみ、原子力廃止措置機関（NDA）を設立

2001 年までに、THORP 工場の建設費用を賄うのに使われた「ベースロード」契約の他は新たな契約が得られそうにない状況の中で、BNFL の負債が予想される収入よりもずっと大きいことが明らかになった。2004 年、政府は、新しい政府所有組織「原子力廃止措置機関（NDA）」を設立することを決めた。再処理工場を含む BNFL の負債を引き継ぎ、契約を履行し、そして、セラフィールド・サイトを閉鎖・除染するためである。

4.4.6 THORP 工場の技術的問題

THORP 工場は、数々の技術的問題の上、2005 年には高レベル廃液の漏洩を起こした。その結果、二つの再処理ラインのうちの 하나가 永久的に閉鎖された。2012 年、NDA は、現存の契約が終了した時点で THORP 工場を閉鎖すると決めた。最終的に、THORP 工場は 2018 年、フィニッシュ・ラインを超え、完全に閉鎖された。NDA は、将来発生する AGR の使用済燃料の責任を負う。だが、NDA の計画は、深地下処分場が使えるようになるまで、閉鎖された再処理工場の受け入れプールを使って保管するというのである。

4.4.7 2020 年まで続く B205 再処理工場でのマグノックス炉燃料の再処理

2018 年現在、THORP と同じセラフィールド・サイトにある古い方の再

処理工場 B205 におけるマグノックス燃料の再処理は、後 2 年続けられることになっている。第一世代のマグノックス型原子力発電所の最後となるウエールズのウィルファ発電所は 2015 年に閉鎖されたが、未処理の使用済燃料が残された。この再処理が 2020 年に完了するということである。

4.4.8 英国保管の分離済民生用プルトニウム総量（136 トン内他国分 23 トン）

英国保管の分離済み民生用プルトニウムの総量は、2017 年末で他国保有の 23 トンを含めて 136 トンに達した。この総量は、セラフィールドにおける再処理が終了するまでに約 140 トンに増えると推定された。

4.4.9 BNFL の他国顧客会社との軽水炉再処理契約（MOX 燃料化）

BNFL は、外国の電力会社顧客との間で、その分離済みプルトニウムをそれぞれの会社の軽水炉用の MOX 燃料にする契約を結んだ。パイロット・プラント、続いて、産業規模のセラフィールド MOX 工場がこの目的のため建設された。MOX の製造は 2001 年に始まったが、設計上の欠陥のため、9 年間で平均して設計上の 1 パーセントでしか運転できなかった。

4.4.10 セラフィールド MOX 燃料工場の閉鎖（NDA の契約不履行）

NDA は、MOX 燃料製造契約の大半を履行できなかったため、そのほとんどをフランス＝ベルギー共同 MOX 製造ベンチャーのコモックス（COMMOX）に委託した。2010 年 5 月 12 日、NDA は、日本の原子力発電電力会社 10 社と、そのプルトニウムを使った MOX 燃料をセラフィールド MOX 工場で製造することで合意したと発表した。NDA は、この 1 年後、福島事故を経て、「商業的リスク・プロファイルの変化」に鑑み、セラフィールド MOX 工場を閉鎖すると発表した。

これにより、20 トン以上の日本の分離済みプルトニウムが英国で足止め状態となった。

4.4.11 英国保管の日本の 20 トンのプルトニウムの移管と処分

2011 年 12 月、英国は、代価は交渉になるが、外国のプルトニウムの所有を英国に移し、英国のプルトニウムとともに処分してもいいと申し出た。17 年 1 月現在、英国政府は、英国にある外国のプルトニウム 8.5 トンの所有を引き受けている。18 年 11 月、日本はついに、両国のプルトニウム処分についての話し合いを始めた。議題には日本のプルトニウムの所有の英国への移転というアイデアも含まれているかもしれない。

4.4.1 2 2018 年現在 英国のプルトニウム処分は未定

2018 年末現在、英国は、そのプルトニウムの処分方法について決めていない。英国は、2014 年に、優先オプションはプルトニウムを燃料として使うことだと発表した。しかし、2016 年、MOX 燃料の使用について国内電力会社の関心がないため、最終決定は、2025 年よりそれほど早い時期に下されることはないだろうとし、比較的溶解度の低い母材の中に固定化した後、地下に埋めることも検討されていることを明らかにした

4.4.1 3 再処理サイトの廃止措置費用 13.2 兆円（もう一つの負の遺産）

英国の再処理プログラムのもう一つの負の遺産は、再処理サイトの廃止措置の膨大な費用である。2018 年現在、セラフィールドのプルトニウム生産・再処理サイトの除染コスト見積りは、約 910 億ポンド(約 13 兆 2000 億円)に達している。

4.5 日本——再処理プログラムを持つ唯一の非核兵器保有国

4.5.1 日本の分離済プルトニウム量（46 トン、内英 22 トン、仏 15.5 トン）

非核兵器国の日本は 1969 年から 2001 年にかけて—国内でのパイロット再処理工場（東海再処理工場）運転に加え—約 7100 トンの使用済燃料を再処理のために英仏に送った（ガス冷却の東海第一原子力発電所からの 1500 トンと軽水炉からの 5600 トン）。その結果 2018 年末までに、日本の分離済

みプルトニウムは約 46 トンに達した。そのうち英国保管が 22 トン、フランス保管が 15.5 トンである。

4.5.2 1997 年完成予定だった六ヶ所再処理工場（年間 800 トン再処理）

日本は、1980 年代に、年間約 8 トンのプルトニウム分離能力を持つ大型再処理工場計画を開始した。青森県の六ヶ所村に建設することが計画された。IAEA の計算方法だと、プルトニウム 8 トンは、長崎型核兵器 1000 発分に十分な量である。

4.5.3 六ヶ所再処理工場 増え続ける建設費用 7600 億円が 2.6 兆円に

六ヶ所再処理工場の建設が 1993 年に始まった頃には、97 年に完成する予定だった。費用は 7600 億円との見積もりだった。運転開始は、遅延を繰り返した。原因は、技術的な問題だった。2011 年以後は、福島事故後の安全性強化という課題のためである。2019 年末現在、運転開始は 2022 年初頭の予定で、19 年 3 月までの設備投資（建設費）は約 2.6 兆円（2022 年迄約 2.9 兆円）に達していた。

4.5.4 日本政府は電力会社に再処理を実質的に強制

日本の原子力委員会の委員長らは、日本の原子力発電所を持つ電力会社は自らの意思で再処理することを決めたと主張してきたが、日本政府は、フランス政府と同じく、実質的に、再処理を強制的なものとしてきた。1957 年「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」では、新しい原子力発電用原子炉の建設の申請に当たり、使用済燃料の「処分の方法」を明記することと定め、その使用済燃料の管理方法を日本の「原子力の開発及び利用の計画的な遂行に支障を及ぼすおそれがないこと」としていた。政府の長期計画は、日本の原子力の将来は再処理と増殖炉に基づくことになるというものだった。これは再処理を義務化するものだった。このため、日本の原子力発電所を持つ電力会社は、1980 年に商業用再処理工場の建設・運転のための会社を共同で設立した。この会社は、別の会社と

合併して、1992 年に日本原燃となった。

4.5.5 2012 年 原子炉等規制法を改正し使用済燃料の直接処分可能に

福島事故後の 2012 年、新しい独立の機関として原子力規制委員会を設立するために原子炉等規制法が改正された際、原子力発電所を持つ電力会社が日本の再処理政策に従うことを定めた文言は削除された。理論上は、将来建設される原子炉に関しては使用済燃料の直接処分の選択が可能となった。しかし、2000 年「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」によって、再処理は依然として黙示的に強制されている。同法は、日本の地層処分施設に入れることができるのは、再処理と MOX 燃料製造過程で生じた高レベル廃棄物及び「超ウラン元素 (TRU)」廃棄物のみと定めている。つまり、使用済燃料はそのまま入れられないということである。

4.5.6 使用済燃料再処理機構設立で使用済燃料の再処理を保証

日本政府は 2016 年に「使用済燃料再処理機構 (NuRO)」を設立した。たとえ、日本の電力市場の自由化の中で原子力発電所を持つ電力会社が倒産したとしても、使用済燃料が着実に再処理されることを保証するためである。(「東京電力ホールディングズ (東電)」は福島事故の結果、実質的に破産し、政府の資金に依存している。) 日本の原子力発電所を持つ電力会社は機構に対し、燃料がまだ炉内にあるうちに、将来の再処理コストを支払わなければならない。法律が変わらない限り、この資金は中間貯蔵や直接処分に使うことはできない。

4.5.7 軽水炉再処理はプルトニウム増殖炉の燃料用

日本は他の工業国と同様、元々は、プルトニウム増殖炉の初期装荷炉心用のプルトニウムを提供するために軽水炉の使用済燃料の再処理が必要だと考えた。これにより少なくとも原子力に関しては、燃料の輸入からほぼ自由になれるとのアイデアを日本は受け入れたのである。

4.5.8 増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム火災事故 (1995 年)

1995年、日本の増殖炉プログラムは大きな痛手を負う。電気出力25万キロワットの小型の増殖原型炉「もんじゅ」がナトリウム火災を起こした。運転者の動力炉・核燃料開発事業団—日本原子力研究開発機構（JAEA）の前身—による事故の大きさのみ消しを巡るスキャンダルが事態をさらに悪くした。その後の20年間、動燃、その直後の後継機関、そして、JAEAはもんじゅの運転再開を試みた。2015年、日本の原子力規制委員会は、JAEAはもんじゅを安全に運転する資質を有していないと宣告し、一年後、政府は、もんじゅの廃炉を決めた。

4.5.9 再処理、高速炉の目的は地下処分場の廃棄物の減量と危険性の低減

実は、「増殖炉」という言葉は、2014年に閣議決定した「エネルギー基本計画」で姿を消した。日本の高速炉推進派は、フランスの高速炉推進派に仲間入りし、再処理、そして、分離済みプルトニウム他の超ウラン元素の高速炉での使用の目的は、地下の処分場に送る廃棄物の量と危険性を減らすことにありと主張した。このためには、使用済みMOX燃料を再処理する第二再処理工場、それに、回収したプルトニウム他の超ウラン元素を核分裂させるための一群の高速中性子「燃焼炉」の建設が必要である。この想像上のプログラムの科学的根拠の欠如については明らかである。

4.5.10 高速炉開発会議が高速炉開発のロードマップ策定（2018年末）

2018年末、「高速炉開発会議」が高速炉開発のための「戦略ロードマップ」を策定し、政府がこれを決定した。フランスと米国は、ともに、この試みにおける国際協力の可能性のある相手国として言及されている。フランスのASTRIDプロジェクトは消えつつあったが、米国エネルギー省のアイダホ国立研究所は、同研究所の将来の確保に役立つ高速中性子試験炉建設を提唱して議会の支持を得た。

4.5.11 再処理して分離したプルトニウムをMOX燃料として消費する計画

1997 年、日本はフランスに倣って、そのプルトニウムの一部を MOX 燃料として使用する具体的な計画を発表した。計画によると、2010 年までに、年間約 9 トンのプルトニウムが 16～18 基の発電用原子炉に装荷されることになっていた。2009 年に、目標年が 2015 年へと延ばされた。2018 年末現在、日本の軽水炉に装荷されたプルトニウムは累積合計約 4.3 トンに過ぎない。

4.5.1.2 原発立地自治体への使用済燃料の敷地外への搬出の約束

2005 年発表の長期計画を皮切りに、原子力委員会は、再処理を正当化するためにもう一つの議論を使い始めた。この議論は次のようなものである。日本の原子力発電所の敷地が選ばれた際、日本政府は、受け入れ県及び市町村に対し、使用済燃料は敷地外に運び出され、追加的使用済燃料貯蔵施設は敷地内に作らせないと暗黙の約束をした。これにより、受け入れ自治体は、放射性廃棄物は原子炉の敷地内に無期限に貯蔵されることはないと安心できるはずだった。

4.5.1.3 英仏への再処理委託終了で使用済燃料の搬出先は六ヶ所再処理工場のみ

英仏との再処理契約を更新しないとの決定により、日本の使用済燃料の搬出先は六ヶ所再処理工場だけとなった。この工場の運転開始が遅れ続け、その使用済燃料受け入れプールはまもなく満杯になる。搬出先がなくなると、日本の原子力発電所の使用済燃料プールも満杯になる。炉から取り出される使用済燃料のためのスペースがなくなると、日本の原子力発電所は運転停止とならざるを得ない。

4.5.1.4 六ヶ所再処理工場プールの使用済燃料の再処理を急ぐ理由

六ヶ所再処理工場の貯蔵プールの使用済燃料はできるだけ早く再処理しなければならないとしている。各地の原子炉のプールからの使用済燃料を受け入れるための貯蔵スペースを作るためである。

4.5.15 再処理の放棄は再処理工場の使用済燃料を返還するという「脅し」

問題を複雑にしているのが青森県知事の「脅し」である。知事は、中央政府がその再処理政策を放棄するなら、六ヶ所のプールに貯蔵されている使用済燃料は、元の原子力発電所に送り返すことになる」と主張している。使用済燃料の原子炉への搬出は、原子力発電所立地県が敷地内の容量不足で受け入れることができないことを理由に拒絶すれば、起こりえないのだが、青森県知事の「脅し」は、日本の再処理プログラムの必要性を最終的に正当化する根拠として使われている。

4.5.16 再処理中止の障害は空冷式貯蔵キャスクでの貯蔵で解消

日本の再処理中止の障害は、政府がその意志を持てば解消することが可能だということである。米国を始め、発電用原子炉を持つほとんどの国では、使用済燃料プールが満杯になると、空冷式の貯蔵キャスクを取得して、プール内での冷却期間の一番長いものをキャスクに移している。日本でもこの解決策の可能性が高まっている。

4.5.17 原発受入れ自治体の敷地内乾式貯蔵で使用済燃料プール火災事故予防

日本の原子力発電所受入れ県・市町村で敷地内乾式貯蔵の支持が広まりつつある一つの理由は、2011年の福島第一の事故の際にもう少しで起きるところだった使用済燃料プール火災に関連した安全性上の懸念である。日本の原子力規制委員会は、プールで5年程度以上冷却した使用済燃料について、乾式貯蔵をプール貯蔵より安全として推進してきた。そして、2018年12月、規制委は、この方式の貯蔵を推進するために新しい規則を発表した。パブリック・コメントを経て、最終的新規則が2019年初頭に確定した。

4.5.18 日本の分離済みプルトニウム蓄積への米中の批判

日本による分離済みプルトニウムの蓄積について、米中両国の批判が高

まっている。日本の再処理推進派は、なぜ非核兵器国の日本が核兵器何千発分もの分離済みプルトニウムをため込んでもいいのかについて、様々な主張を展開している。

- ① 軽水炉によって生み出される「原子炉級」プルトニウムの同位体組成は、核兵器に適さない。
- ② 「日本で行う再処理は、ウランとプルトニウムを [50 対 50 の割合で] 混合して酸化物に転換する混合転換方式が採用されている。したがって、プルトニウム酸化物を単体保有することはない... 混合酸化物 [MOX] はそのままでは核兵器に用いることはできず、核拡散抵抗性がある。」実際は、混合酸化物では、使用済燃料からのプルトニウム分離を難しくするガンマ線放出放射性核分裂生成物を取り除かれてしまっており、簡単なグローブ・ボックスを使えば、プルトニウムを容易に分離することができる。
- ③ 日本は核兵器を製造する意図を持っていない。実際、日本は約 50 年間にわたって、核武装をするのに十分なプルトニウムを持ちつつ、その方向に動いていない。しかし、日本の近隣諸国や米国—核兵器と通常兵器の両方を含むあらゆる軍事的能力を使って日本を防衛するとのコミットメントを表明している—は、日本は脅威を感じれば迅速に核兵器を製造できることを知っている。2018 年に、日本の元経済産業省原子力政策関係高官の田中伸男がバーチャル核抑止の重要性を主張している。
- ④ 原子力は安全保障、国防上の理由からも必要である。広島・長崎を経験した日本は核兵器を持つつもりは毛頭ないが、北朝鮮の核ミサイルが頭上を飛ぶ時代に核能力を放棄することは彼の国からなめられることになる。

4.5.19 韓国、日本同様の使用済燃料の再処理とウラン濃縮の権利保有の主張

日本の先例（再処理実施国）は、核兵器国における民生用プルトニウム・プログラムとともに、核不拡散体制を脅かす。潜在的核兵器能力の保有に関心を持つ国々が日本のような再処理能力を取得するのを正当化することからである。国民の多数が、北朝鮮とのバランスを確保するために核兵器の保有を支持している（2017 年）韓国では、「韓国原子力研究所（KAERI）」が、長年、日本と同じく韓国も使用済燃料を再処理したり、ウランを濃縮したりする「権利」を持つべきだとの主張を展開している。

4.6 ロシア：増殖炉開発の継続

4.6.1 ソ連時代の再処理工場（RT1）

ソ連は、1977 年、冷戦時代の最初の秘密プルトニウム生産サイトにおいて、その軍事用再処理工場の一つを、第一世代の軽水炉（VVER400）の使用済燃料の再処理ができるように改造した。同サイトは、当時は郵便受けの番号チェリャビンスク 40 としてのみ知られていた（現在のオジョルスク）。

「RT1」というこの工場の公称設計容量は、年間 400 トンの使用済燃料の処理というものだったが、これまで発表されている民生用プルトニウムの年間分離量で見ると、平均してこの処理能力の約 3 分の 1 で運転された。

RT1 で再処理される使用済燃料の一部は、ソ連が東欧諸国とフィンランドに輸出した原子炉から来ていた。稼働中の VVER400 の基数が減少していく中、RT1 は 2017 年に第二世代の VVER1000 からの使用済燃料も再処理できるように改造された。RT1 が運転される一方で、分離済み民生用プルトニウムが全く使われなかった結果、2017 年末現在、ロシアの民生用プルトニウム保有量は 59 トンに達している。これは、英仏両国に続く世界第三位の量で、しかも年間 1.5 トンの割合で増加している。

4.6.2 ソ連時代の第二再処理工場（RT2）

ソ連は 1976 年、RT-1 よりずっと大きな設計容量の第二再処理工場を、シベリア中央部にあるもう一つの秘密都市クラスノヤルスク 26（現在ジュレズノゴルスク）で建設することに決めた。この工場—RT-2—は VVER1000 の使用済燃料を年間 1500 トン再処理する設計能力を持つことになっていた。その建設は 1990 年代に中止となった。資金不足のためである。建設が終了していた RT-2 の受け入れプールは、後に、8600 トンの容量を持つ中間貯蔵プールに改修された。そして、それに近接して、設計貯蔵容量 3 万 7785 トンの巨大な使用済燃料乾式貯蔵施設の建設が始まった。

4.6.3 ロシアの再処理工場（ジュレズノゴルスク再処理工場）

ロシアは、今も、ジュレズノゴルスクに再処理工場を建設する意向で、様々な技術の実験をしている。2018 年 3 月、ジュレズノゴルスク・パイロット実証センターで最初の軽水炉使用済燃料集合体が再処理された。この工場は、年間 250 トンの使用済燃料を再処理する設計容量を持っている。さらに、同工場に第二ラインを導入するという計画が発表されている。

4.6.4 ロシアの高速炉（BN350 と BN600）

ロシアは、軽水炉 MOX 燃料を使用するプログラムを持っておらず、このため、分離済みプルトニウムをほとんど使っていない。ソ連が建設した二つの高速炉—カザフスタンの BN350（1973～1999 年）とウラル地方の BN600—の燃料は、17～26 パーセント濃縮のウランであって、プルトニウムではない。

4.6.5 高速中性子原型炉 BN800

2015 年末、ロシアは、BN600 に隣接して建設された新しい高速中性子原型炉 BN800 の運転を開始した。BN800 の初期装荷炉心の 16 パーセントだけが MOX 燃料で、残りは、濃縮ウランだった。計画は、燃料取り替え

の際には原子炉級プルトニウムの入った MOX 燃料を使い、全炉心での MOX 使用を達成するというものだった。たとえ、同炉の使用済燃料が再処理されないとしても、一基の増殖炉でのプルトニウム使用だけでは、軽水炉の使用済燃料の再処理によるプルトニウムのさらなる増大を相殺することは出来ない。ロシアは、米国とともに、冷戦で引退となった核弾頭から回収した核兵器用プルトニウム 34 トンを余剰と宣言しており、さらに多くを余剰と宣言しうる。

4.6.6 米・ロ「プルトニウム管理・処分協定 (PMDA)」

米ロの 2000 年「プルトニウム管理・処分協定 (PMDA)」の下では、ロシアは 34 トンの核兵器用余剰プルトニウムを BN800 と BN600 で消費することになっていた（一方、米国はその核兵器用余剰プルトニウム 34 トンを軽水炉で MOX 燃料として処分するとの内容だった）。これで期待されるそれぞれの国のプルトニウム照射量は、少なくとも年間 1.3 トンということだった。BN800 は、80 パーセントの設備利用率で運転し、また、燃料装荷を経済的に最善のものよりも早いペースで行った場合、プルトニウム 239 の含有率約 94 パーセントの兵器級プルトニウムを最大で年間 1.8 トンを非兵器級プルトニウムに転換することができる（その結果得られるものは、プルトニウム 239 を 84 パーセント含有する核兵器利用可能プルトニウムである）。この炉を増殖炉として運転し、炉心の周囲に配置した劣化ウランの「ブランケット」を再処理すればロシアの分離済み兵器級プルトニウムの保有量はまた増大することになる。

4.6.7 オバマ政権の MOX プログラム停止提案

2014 年、オバマ政権はコストの高騰のため、米国の MOX プログラムの停止を提案した。同プログラムは、ジョージ・W・ブッシュ政権が米国の 34 トンの軍事用余剰プルトニウムの処分方法として選んだものである。オバマ政権は、コストのもっと低いオプションの検討を始めた。この米国の

政策変更が始まった時期は、米ロの間の緊張が高まっていた時期と重なり、ロシアのウラジミール・プーチン大統領に協定順守停止を正当化する根拠を与えるものとなった。2016年のことである。結局、米国のMOXプログラムは、2018年、トランプ政権によって中止された。同政権は、また、米国の余剰プルトニウムを酸化物に変え、特殊な化学粉末と混ぜて分離を難しくした上で、ニュー・メキシコ州の地層処分場「廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）」に埋めるというオバマ政権の提案を支持した。

4.7 原子炉級プルトニウムの兵器利用の可能性

4.7.1 アメリカのプルトニウムの分離及び燃料としての使用断念

インドの1974年の核実験の後、米国の政策は、プルトニウムの分離及び燃料としての使用の支持から反対へと変わった。

4.7.2 民生用プルトニウムの兵器利用

プルトニウム経済推進派は、「民生用」プルトニウムをインドの場合のように核兵器に使うことができるという見解に反論を試みた。

彼らの主張の一つは、核兵器用に作られるプルトニウムは、プルトニウム239を約94パーセント含有しているのに対し、発電用軽水炉で作られるプルトニウムは、一般的にプルトニウム239の含有度が50パーセントを少し超えるに過ぎないというものである。

4.7.3 プルトニウムの同位体

「原子炉級」プルトニウムに大きな割合で含まれる他のプルトニウム同位体の一部は、確かに、軽水炉の使用済燃料から回収されたプルトニウムを、「兵器級」プルトニウムほど兵器用としては望ましくないものにする。

- ・プルトニウム238——原子炉級プルトニウムの約2パーセントを占める——は、プルトニウム239と比べ寿命がずっと短く、その半減期は、後者の場合が2万4000年であるのに対し90年でしかない。崩壊速

度の速さのため、プルトニウム 238 は、キログラム当たりプルトニウム 239 よりずっと大きな放射性熱を発生する。

- ・プルトニウム 240——原子炉級プルトニウムでは、やはり、兵器級のものに比べずっと大きな割合で存在する（25 パーセント対 6 パーセント）——は、自発的核分裂を起こす。これによって生じる中性子は、爆縮過程の超臨界のプルトニウムにおいて連鎖反応が早期に生じる確率を高める。この場合、爆発は、想定よりも低威力のものとなる。
- ・プルトニウム 241——兵器級プルトニウムでは 1 パーセント以下であるのに対し原子炉級では約 15 パーセント存在する——は半減期 14 年で崩壊してアメリシウム 241 となり、原子炉級プルトニウムからなる核兵器の「ピット（芯）」の寿命を縮める可能性がある。

これらは実際の違いであるため、核兵器設計者らは兵器級プルトニウムの方を好むのである。

4.7.4 原子炉級プルトニウムは核兵器になりうるか

1970 年代以来、米国の核兵器設計者らは、これらの違いは、原子炉級プルトニウムを核兵器用に使えなくするほど大きなものではないと述べている。核兵器設計者らは、秘密保持上の制約のために、設計の詳細について触れることができない。再処理推進派は、制約されずに、自分たちの主張を展開した。その声はフランスと日本において特に大きかった。フォンヒッペルは、1995 年にフランスの原子力庁（CEA）に行って、同庁の核兵器設計者らが原子炉級プルトニウムの核兵器用使用問題について、フランスの再処理会社——当時はコジェマ——はなんと言っているのかと尋ねた。答えは単純明快で、「彼らが言っている（原子炉級のプルトニウムは核兵器用には使えない）こととは違う」というものだった。

4.7.5 原子炉級プルトニウムの核兵器使用の可能性

1997 年に米国の核兵器設計者らは、原子炉級プルトニウムの核兵器用使用の可能性について、もっと一般的な非機密扱いのステートメントを発表した。

洗練度が最も低いレベルでは、潜在的核拡散国家あるいは非国家集団は、第一世代の核兵器 [つまり、長崎レベルの設計] で使われた設計及び技術程度の洗練度のものを使って、原子炉級プルトニウムから、1 キロトンないし数キロトンの確実な信頼性のある出力を有する核兵器を作ることができる (蓋然性の高い出力はこれより相当大きいものとなる)。その対極では、米ロのような先端核兵器国は、現代の設計を使って、兵器級プルトニウムでできた核兵器に大体において匹敵する信頼性のある爆発出力、重量その他の特性を有する核兵器を原子炉級プルトニウムから作ることができる。

再処理推進派の一部は、いまだに原子炉級プルトニウムは核兵器に使えないと主張し続けている。米国の小説家で社会改革派のアプトン・シンクレアの有名な発言にあるように「あることを理解しないことによって給料を得ている人にそれを理解させるのは難しい。」

4.8 再処理と核拡散

4.8.1 再処理推進派の最後の理由

(1) 環境面での必要性 (体積・毒性の低減)

多数のプルトニウム増殖炉の初期装荷用にプルトニウムが必要という再処理を正当化するよりどころが消え、軽水炉でのプルトニウム・リサイクルも経済的でないという状況のなかで、再処理・高速増殖炉推進派は、今度は、いずれにしても、使用済燃料から超ウラン元素を分離し、これを核分裂させるために高速中性子炉を使用することが、環境面から必要だと主張している。

推進派は、自分たちのプログラムは廃棄物が地下処分場に送られる前にその体積と毒性を減らすのに必要だと断言する。

(2) 環境面の利点より費用、核兵器拡散、核事故のリスクが大

このとてつもなく費用のかかるプログラムから得られる環境面での利点は小さい。負になる可能性すらある。いずれにしても、このプログラムに伴う核兵器拡散や核事故のリスクの増大の方がはるかに重要な問題である。

(3) 増殖炉の商業化はすべて失敗

増殖炉を商業化しようとする政府の支援は、すべての主要工業国で失敗に終わっている。にもかかわらず、高速中性子炉の推進派は、研究開発の政府支援を要求し続けている。しかし、増殖炉は研究開発レベルでさえ、核不拡散に関心を持つ人々にとって心配の種である。インドが示したように、小規模の増殖炉研究開発プログラムでも、核兵器を作るのに十分な量のプルトニウムが分離される。

(4) 再処理は核不拡散を悪化させないのか

インドの実例にもかかわらず、再処理推進派は、再処理は核不拡散問題を悪化させることはないと主張する。

① 日本

日本では、推進派は今も、発電用原子炉の使用済燃料を再処理して得られた原子炉級プルトニウムは、核兵器の製造に適さないと主張している。

② 韓国

韓国では、「韓国原子力研究所（KAERI）」の関係者らがパイロプロセス—再処理の一種—は、純粋なプルトニウムを生み出さないので核拡散抵抗性を持つと主張している。2009年に出された米国の6つの核兵器関連国立研究所の委員らによるパイロプロセスの核拡散面についての共同研究報告は、「標準的なピューレックス

(PUREX) 再処理技術と比べた場合の核拡散リスク低減面での改善はわずかであり、それらのわずかな改善は主として非国家アクターに関するものだ」と述べている。

(5) 再処理推進派の主張（使用済燃料直接処分は核拡散が悪化）

再処理推進派の中には、再処理をしないで使用済燃料を深地下に直接処分すると核拡散問題が悪化すると主張する者さえいる。例えば、2004 年、日本の原子力委員会が設置した新計画策定会議は次のように主張した。

使用済燃料中のプルトニウムに対する転用誘引度が高まる処分後数百年から数万年の間における国際的に合意できる効果的で効率的なモニタリング手段と核物質防護措置を開発し、実施する必要があることを踏まえると、核不拡散性に関してこれらの再処理及び直接処分のシナリオ間に有意な差はない。

これは、「プルトニウム鉱山論」で、分析に値するものではある。しかし、今日大規模な商業利用のためにプルトニウムを分離することを正当化するために、何世紀、何千年も先の将来、どこかの国が使用済燃料の入った容器を回収しようとして半キロメートルの地下まで掘って行くリスクを持ち出すというのは、再処理正当化論がどれほど突飛なこじつけになってしまっているかを示すものと言えよう。

4.9 再処理の危険性

4.9.1 高レベル廃液の危険性

再処理推進派は、深地下処分場に入れられた使用済燃料から漏れ出す放射能の潜在的な長期的危険性に焦点を合わせる。しかし、再処理の高レベル廃液は地上で作られる。それが地上に置かれている間にもたらす潜在的危険性の方がずっと大きい。

六ヶ所再処理工場では、2006 年 4 月から 2008 年 10 月までの期間、ア

クティブ試験で 425 トンの使用済燃料が再処理され、ガラス固化されていない高レベル廃液 211 立方メートル (m³) が溶解槽の地下のタンクに保管されたままになっている。

4.9.2 高レベル廃液貯蔵タンク爆発事故（ソ連・1957 年）

実際、広範な地域からの避難を必要とした最初の大きな核事故は、1957 年にソ連の再処理工場で起きた高レベル廃液貯蔵タンクの爆発である。この事故はあまり知られていない。20 年間にわたって秘密にされていたためである。1976 年にソ連の反体制派の科学者で歴史家のジョレス・メドベージェフが明らかにした時には、すでに過去の出来事となっていて、ニュースではなかった。2018 年の時点では、これは、なお、歴史上最悪の再処理工場の事故だった。

西側の諜報機関がこれを公表しなかったのは、西側の核兵器プログラムにおけるプルトニウム分離に対する反対を助長することを危惧したためではないか。情報機関の危惧は正しかった。30 年後、チェルノブイリ事故が起きた際、このソ連の原子炉の設計が、ソ連の軍事用プルトニウム生産炉から派生したものであり、その生産炉の元になったのが、米国の軍事用プルトニウム生産炉だったため、その時点まで米国に残っていた 2 基のプルトニウム生産炉が停止されるという結果を招いた。その理由は主として、これらの炉も、最新の安全システムを備えていなかったからである。

1957 年の事故は、ウラル地方のキシュティムという村の近くに位置するソ連の最初の再処理工場で起きた。すべての再処理施設と同じく、キシュティム再処理工場には、巨大なタンクが複数あって、その中には、使用済燃料を溶かしてウランとプルトニウムを抽出した後に残る核分裂生成物その他の放射性核種を含有する濃縮液が入っていた。

1957 年 9 月、高レベル廃液タンクの一つの冷却システムが故障した。この故障が気づかれないまま、廃液が沸騰して水分がなくなってしまった。

照射済みのウランを溶かすのに使われた硝酸の残留物と、溶液からプルトニウムとウランを分離するのに使われた有機溶剤の残留物とが合わさって、爆発性の混合物が形成された。その爆発は、TNT火薬にして最大 100 トンに匹敵するエネルギーを放出し、大量の放射性物質を飛散させた。これには、5 メガキュリー（185 ペタベクレル（PBq））のストロンチウム（半減期 30 年）が含まれていた。

爆発は、風下の約 1000 平方キロメートルの地域で平方キロメートル当たり 2 キュリーを超えるレベルの汚染をもたらした。これは、2011 年の福島事故がもたらした住民の長期的避難地帯の面積に匹敵する。幸い、細長い汚染地帯（長さ約 140 キロメートル）には付近の都市や町は入っていなかった。それでも、「ウラル放射能汚染の道」に入った村々から約 1 万人が避難させられた。ストロンチウム 90 は、福島の避難の主たる原因となったセシウム 137 と比べると外部被曝の危険は小さいが、食べ物に入ったものを経口摂取すると、内部被曝の面でより大きな危険を伴う。ストロンチウム 90 は、化学的にカルシウムに似ていて、「向骨性物質」として振る舞う。そのため、体内での生物学的半減期が長く、その分、大きな放射線被ばくを骨髄にもたらす。

4.9.3 ドイツの決定（再処理工場に高レベル廃液を貯蔵しない）

キシュティム事故が西側で知られるようになってから 3 年後の 1979 年、ドイツのニーダーザクセン州のエレンスト・アルブレヒト首相は、独立のアナリストの国際的グループを招集した。ドイツの電力会社が同州のゴアレーベンの町の近くで建設を計画している再処理工場の設計について評価するためである。国際的グループによる批判を咀嚼・消化したうえでアルブレヒトは、工場の建設に同意した。ただし、二つの条件を付けた。サイトに「受動的安全性」を備えた使用済燃料貯蔵施設を設けることと、高レベル廃液を貯蔵しないことである。電力会社は、再処理工場を建設しない

ことに決め、このサイトは最終的に、使用済燃料と、英仏でのドイツの使用済燃料の再処理で生じた高レベル廃棄物ガラス固化体とを置く中間貯蔵サイトとなった。

4.9.4 高レベル廃棄物ガラス固化体施設の故障

高レベル廃棄物のガラス固化用機器は、しばしば故障する。故障が起きた際にプルトニウムの分離プロセスを止めてしまうことは避けたいと、膨大なコストを伴う再処理工場の運転者らは考える。現存する再処理工場はすべて、非常に大量の高レベル廃棄物を液状で保管するタンクを備えた設計になっている。日本の六ヶ所再処理工場には、高レベル廃液用のタンクが 2 基ある。炉から取り出し後 5 年の使用済燃料を再処理して出た高レベル廃液を容量満杯になるまで入れた場合、これらのタンクには、それぞれ、1000 ペタベクレル (PBq) のセシウム 137 が入っていることになる。稠密貯蔵の使用済燃料プールの場合と同等の量である。チェルノブイリ事故のセシウム 137 の放出量は約 85PBq だったから、じつに 10 倍以上の量である。

4.9.5 レッド・オイルの爆発

高レベル廃液タンクの乾固は、再処理工場における爆発をもたらす唯一のシナリオではない。核分裂生成物からの強烈な放射線の影響の下では、硝酸が有機溶媒と反応して「レッド・オイル」の層が形成され、これが加熱して爆発する可能性がある。レッド・オイルはまた、溶解した使用済燃料からプルトニウムとウランを分離するために溶媒が注入されるプロセス・タンク、あるいは、高レベル廃液の体積を減らすために廃液を濃縮する蒸発器でも形成され得る。

実際、再処理工場ではレッド・オイルの爆発が何度も起きている。2018 年現在、最も深刻な爆発は、1993 年に、やはりロシアの西シベリアのトムスク市に近いセベルスク軍事用再処理工場で起きたものである。爆発は、

再処理建屋の側面を吹き飛ばした。幸い、タンク内の放射性物質の濃度は低く、セシウム 137 の放出量は福島原発の放出量の約 0.003 パーセントに過ぎなかった。

4.9.6 ハンフォード核施設の事故

ハンフォード核施設は、アメリカ合衆国ワシントン州のシアトルから南東約 350 キロのところにある。第二次世界大戦から冷戦末期まで、兵器用プルトニウム生産工場としてアメリカの核戦略体制を支えてきた。

1944 年、マンハッタン計画の一環で B 原子炉（プルトニウム生産炉）の建設が始まった。大戦中にさらに 2 基完成した。大戦後も、ソ連との冷戦が続く中で、1963 年の N 原子炉まで増設された。大戦中のピーク時には約 5 万 1 千人の労働者が雇用され、3 基の原子炉をはじめ、ウラン濃縮工場、再処理工場も完成させ、工場規模で世界最初のプルトニウム生産に成功した。ここで生産分離されたプルトニウムが長崎の原爆として投下された。1987 年に全面的に生産停止するまで、約 55 トンの兵器級プルトニウムが生産された。

1989 年から約 20 億ドルの予算で、40 年以上に及び生産活動で生まれた放射性物質や化学物質による膨大な汚染除去作業に取り組んでいる。

1962 年 4 月、軍事用（兵器級）プルトニウム改修工程において、装置洗浄中、床水溜めに漏れていたプルトニウム溶液が非安全形状の一時貯留タンクへ移送され、プルトニウム 36kg を含む溶液 40ℓ が臨界を起こす事故となった。

1973 年、再処理施設の地下貯蔵タンクから液漏れ事故が発生し、大量の放射性物質の放出事故が起こった。この事故で大気が汚染され、付近を流れるコロンビア川に廃液が流れ込んだ。

4.10 結論

たとえ事故が起こらないとしても、再処理による環境面での便益は、わずか、あるいは、ゼロである。そして、再処理工場で実際に起きた一つの事故が、将来、深地下の使用済燃料処分場の破損による漏れによって影響を受け得る地帯の面積より何桁も大きな広さの地域の汚染をすでにもたらしている。

5 使用済燃料プールの火災事故の危険と汚染

高速増殖炉の夢が破れたにもかかわらず再処理を続けた結果もたらされたのは悪夢だった。何万発もの核兵器に相当する分離済みプルトニウムの蓄積である。増殖炉の夢が破れたもう一つ悪夢が、原子力安全性に関わるものである。使用済燃料プールにおける火災の危険である。再処理計画の多くがキャンセル・遅延延期された結果、使用済燃料の搬出先がなくなってしまった。その結果、使用済燃料プールの稠密化（デンス・パッキング）をもたらした。プール火災が起きると、生じる汚染のため、福島事故の場合の 100 倍に至る地域からの住民の避難が必要となる可能性がある。以下に稠密貯蔵のプールの危険性に焦点を当てる。再処理と稠密貯蔵プールの両方の代替策は乾式貯蔵である。

5.1 使用済燃料プールの構造と稠密貯蔵の危険性

5.1.1 軽水炉燃料貯蔵プール

軽水炉（LWR）は、世界の原子力発電容量の約 90 パーセントを占める。軽水炉の約 70 パーセントは、1960 年代から 70 年代にかけて設計された。軽水炉の使用済燃料プールは、ほとんどすべての使用済燃料が数年の冷却の後、再処理工場に送られ、増殖炉の初期装荷燃料用にプルトニウムが回収されるとの前提の下に設計された。軽水炉の 1 炉心あるいは 2 炉心分の量の使用済燃料をラック（収納棚）に収める設計になっている。

5.1.2 使用済燃料プールのラック貯蔵

使用済燃料プールのラック貯蔵のアプローチを現在も固守しているのは、フランスだけである。2013 年末現在、フランスの原子炉の使用済燃料プールには、平均して 1 炉心分以下の燃料しか入っていなかった。原子力発電所を抱えるフランスの発電会社「フランス電力（EDF）」は、使用済燃料の貯蔵量を増やせるようにと、稠密化のための「リラッキング」（燃料ラックの改造による稠密配置）の許可を仏「原子力安全局（ASN）」に求めたのだが、この要請は 2013 年に安全性上の理由から却下された。

5.1.3 原子炉使用済燃料プールのリラッキング

原子力発電所を持つほとんどの国は現在、使用済燃料の搬出先となる集中型の中間貯蔵施設、地層処分場、再処理工場などを持っていない。

① アメリカ

米国では、原子力発電所の運転期間全体を通して炉から取り出されたほとんどすべての使用済燃料が敷地内にとどまっている。使用済燃料に対処するために米国の原子力発電所を持つ電力会社は、最初はプールのラックの間隔を詰めて貯蔵の密度を上げた。最終的には、その密度はほとんど運転中の原子炉の炉心ようになった。連鎖反応を防ぐために、使用済燃料集合体は、中性子吸収材の壁で囲まれた箱の中に収められ、米国のプールは、平均して、7 炉心分を収容できるようになっている。このようなリラッキングを施したプールを「デンス・パケット（稠密貯蔵）」プールと呼ぶ。

② 日本

日本における商業規模の六ヶ所再処理工場の運転開始が四半世紀に亘って遅れ続けている日本でも、原子炉の使用済燃料プールのリラッキングが進められ、平均 7 炉心が収容できるようになっている。2017 年末現在、平均して 5 炉心が収容されている。

③ 韓国

韓国も、使用済燃料プールでのリラッキングによる稠密貯蔵を行っている。2017 年末現在、1995 年以前に運転開始となった発電用軽水炉のプールは、平均して 7.4 炉心相当を収納している。1985 年と 1986 年に運転を開始した古里 3 号及び古里 4 号のプールは、それぞれ 12 炉心分以上を収納している。

5.1.4 使用済燃料プール満杯時の燃料交換

最終的には、原子炉の運転開始から 20～30 年後、リラッキングにより稠密貯蔵にしたプールでさえ満杯になると、燃料交換時に、新しく取り出した使用済燃料用のスペースを作るため、最も冷却期間の長い使用済燃料をプールから出さなければならなくなる。

ほとんどの国では、冷却プールから出された燃料は、空冷式の乾式貯蔵キャスクに移される。稠密貯蔵ラックを使って乾式貯蔵への移送を遅らせると、電力会社はキャスク用の支出を遅らせることができる。稠密貯蔵後は、何十年間もの冷却の結果、使用済燃料の発熱量が下がっているため、キャスク当たりの燃料集合体装荷数を多くしても、キャスク中央部の燃料の温度が基準値以上に上がらないようにすることができる。

5.2 使用済燃料プールにおける火災の懸念

使用済燃料プールの壁は、厚さ 1 メートル以上の鉄筋コンクリート製で、溶接した鋼板で内張がしてある。極端な激変的現象—近くでの強力な地震、100 トンのキャスクの落下、大型航空機の墜落、指向性爆薬によるテロ行為など—があった場合にのみ、非常用給水源から大容量ポンプでくみ上げて注入しても解消できないような漏れが発生しうる。

5.2.1 東京電力福島第一原発のプール

東京電力の福島第一原子力発電所のプールは、2011 年 3 月の地震後、漏れを起こさなかった。しかし、3 基の炉心溶融のため、使用済燃料プール

付近の放射能汚染がひどく、プールは長期間にわたってアクセス不能となり、その間、蒸発によって水位が下がって行った。4 号機のプールの水位は、使用済燃料が露出する寸前まで低下した。

5.2.2 福島第一原発 4 号炉燃料プールの推移と温度

4 号機のプール内には、圧力容器内での作業ができるようにするために炉心から一時的な予定で取り出された燃料集合体が置かれていた。米国「原子力規制委員会 (NRC)」のためにシミュレーションを行う米国エネルギー省サンディア国立研究所のグループの計算によると、4 号機のプールの燃料が露出していれば、これらの燃料集合体の放射性発熱のために、燃料棒のジルカロイ（ジルコニウム合金）被覆管の温度は摂氏 1000 度以上に達していたであろうと推定している。

5.2.3 燃料の露出と被覆管の酸化損傷そして核分裂生成物の大気中に放出

1000℃以上になると、ジルカロイ被覆材のジルコニウムは、プール内に残っている水から生じた水蒸気の中で $\text{Zr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO} + \text{H}_2$ 反応による急速な酸化を始める。この反応は水素ガスとさらなる熱を放出する。これが、フィードバックして反応を加速させ、被覆管は損傷し、燃料中の揮発性の核分裂生成物がプールの上の空気中に放出される。

4 号機の燃料プールの位置していた建屋上部の屋根と壁は、隣接する 3 号機の炉心溶融で生じて漏れてきた水素の爆発によってすでに破壊されていた。したがって、揮発性の核分裂生成物はすべて、プール内に存在する膨大な量のセシウム 137 のほぼ全量を含め、外の大気中に出ていっただろうと考えられる。

5.3 セシウム 137 による地表の汚染

セシウム 137 は、1986 年のチェルノブイリ事故と 2011 年福島事故でそれぞれ風下地帯の約 10 万人の長期的避難をもたらした放射性核分裂生成物であ

る。半減期 30 年、強力な地表汚染物質である。その放射性崩壊の 95 パーセントが透過力の強いガンマ線（高エネルギーのエックス線）の放出を伴う。

5.3.1 4号機プール燃料の放射能

福島第一 4 号機のプールには、炉心を取り囲むステンレス製の円筒型構造物「シュラウド」の取り換えのために 10 週間前に原子炉から取り出したばかりの炉心一体の燃料が入っていた。プールには、さらに、それより古い炉心一体分相当強の燃料が入っていた。したがって、4 号機のプールのセシウム 137 の総量は、炉心溶融前の 1 号、2 号、3 号の炉心を合計した量にほぼ相当した。

5.3.2 福島第一原発 1 から 3 号機のセシウム 137 の放出は 1 ～ 3 %

1 号機から 3 号機までの 3 基の炉心にあったセシウム 137 のち、大気中に放出されたのは 1 ～ 3 パーセントだけだった。原子炉を囲む巨大な鉄筋コンクリートの格納容器は、漏れを起こしたが、破裂はしなかった。ベクレル (Bq) で表すと、セシウム 137 の推定放出量は、6 ～ 20 ペタベクレル (PBq = 10^{15} Bq = 千兆 Bq) だった。

5.3.3 チェルノブイリ事故後の汚染地域の避難

チェルノブイリ事故の後、原子炉から半径 30 キロメートルの避難地域に加えて、平方メートル当たり約 1.5 メガベクレル (1.5 MBq/m²) を超えるセシウム 137 に汚染された地域からの避難が義務付けられた。（この汚染レベルでは、1 平方メートルの土地から、毎秒 1.5 百万個のセシウム 137 の原子が崩壊しガンマ線を放出する。）これより低い汚染レベルの地域では、下限は 0.5 MBq/m² の汚染地域まで、厳格な放射線被ばく線量管理措置が講じられることになった。にもかかわらず、これらの「放射線管理」地域の住民は、相当の割合で自主的に避難した。ウクライナでは、これらの地域からの避難が強制された。福島でも、当初の半径 20 キロメートル避難地域に加えて、1.5 MBq/m² に類似した基準が使われた。

5.3.4 福島第一原発4号機でプール火災が起きていたら

プール火災が4号機で起きて、総量900 PBqのセシウム137が放出されていれば、それは、1～3号機の炉心溶融から大気中に放出された6～20 PBqの約100倍の量に達するところだった。

福島事故の実際の汚染地域と、地震から1カ月以内に発生した二つの天候条件の下で4号機のプール火災が起きていた場合に想定される汚染地域を比較した。使用済燃料プール火災が2011年4月9日に始まった場合の汚染地域の計算結果では、この日は、卓越風が東に向かって吹いており、セシウム137のほとんどは海に吸収されていただろう。最悪ケースの汚染に近いものを示すと、2011年3月19日に放出が始まった場合で、風は北から海岸線を東京の方に向かって吹いていた。強制避難の汚染レベルは、1.5～4.5 MBq/m²のレベルの汚染地域となる。福島県では、数年間の除染作業の後、一部の地域では線量率が3分の1程度に低下した。これは、1.5 MBq/m²以下のレベルまで除染が可能であることを意味している。そうなれば、避難住民の帰郷の早期化を実現できることになる。

1986年のチェルノブイリ事故の後、厳格な放射線被ばく管理措置をもたらししたレベルは0.5 MBq/m²～1.5 MBq/m²である。これらの管理措置にもかかわらず、1995年までに元の人口の27万3000人のうち約12万3000人が避難した。

5.3.5 福島第一原発事故での風向きによる避難者数想定

福島県では、事故後14カ月以内に約16万5000人が避難した。2018年12月現在、4万3000人がまだ政府提供の仮設住宅に住んでいた。このうち、2万1000人は放射線レベルが下がって帰郷してもよいということになっている除染地域からの人々だった。4万3000人に加え、2万6000人の自主避難者がいた。自主避難者に対する住宅支援は2017年3月に停止された。

2011年4月9日に起きたような海の方に吹く風は、福島県では一般的なものである。これは、事故の影響を低減するが、仮想使用済燃料火災では放出量が膨大なため、それでも約100万人の避難が必要となっただろう。2011年3月19日に起きたように風が南の方に吹いていれば、約3000万人が、首都圏の一部を含む地域から避難しなければならなくなっていただろう。人口のこのような大きな部分の避難がもたらす膨大な経済的影響を考えれば、避難措置の基準となる汚染レベルを上げることの是非について苦渋の議論が巻き起こっていたかもしれない。

5.3.6 米国 環境保護庁「放射線防護マニュアル」による帰還基準

米国では、環境保護庁のマニュアル「放射性事象のための防護アクション・ガイド及び計画指針」が、汚染地帯に戻るかどうかの決定は、影響を受けた集団に委ねるとしている。これらの決定は、健康保護と、地域社会の通常の生活を再開したいという希望との間のバランスをとる能力である。放射線防護の面での検討事項は、健康、環境、経済、社会、心理、文化、倫理、政治、その他の面での検討事項と合わせて考慮されなければならない。

チェルノブイリの事故の後、世論の圧力は、通常の生活に戻るという観点から放射線防護基準を弱めるのではなく、強化の方向に働いた。ウクライナでは、強制的避難の閾値は、 0.56 MBq/m^2 に下げられた。福島事故の後には、年間20ミリシーベルト（ほぼ 1.5 MBq/m^2 に相当）の避難閾値が高すぎるか否かについて国内外で議論があった。そして、学校周辺での放射能レベルを低減するために追加的措置を取るよう要求する世論があった。

5.3.7 2011.3.11 福島原発事故 近藤原子力委員長の被害シナリオ

2011年3月11日の地震と津波の後、福島第一の3基の原子炉が炉心溶融を起こし、三つの原子炉建屋の上部が水素爆発により破壊された際、菅直人首相は、原子力委員会の近藤駿介委員長に、状況はどれほど悪くなり

得るのか尋ねた。近藤委員長の答えは、4号機のプールでは使用済燃料火災があり得、もし、そのセシウム 137 が大気中に放出されれば、風下の汚染レベルは、170 キロメートルまでが 1.5 MBq/m²以上に、そして、250 キロメートルまでが 0.5 MBq/m² 以上になり得るというものだった。東京の北側の人口密集地帯と東京の中心部は、それぞれ、福島第一の南方約 100 キロメートルと 225 キロメートルに位置する。

5.3.8 悪魔のシナリオを教訓に5年冷却後、乾式貯蔵が必要

悪夢のシナリオは現実ものとならなかったが、この恐怖体験は日本における使用済燃料についての考え方に影響をもたらした。2012 年 9 月 19 日、福島事故後に設立された原子力規制委員会の田中俊一初代委員長は、就任記者会見で、次のように述べた。「強制冷却が必要でないような燃料については乾式容器に入れて保管すると。それを管理していく...5年くらいは水冷却をする必要があります...そういうことをするように求めていきたいと思います。」

これは、命令ではなく、要請の形態をとったが、原子力発電所を抱える日本の市町村や県の多くが敷地内乾式貯蔵施設の建設受け入れに向かって動いている。

5.4 米国における規制の検討

(稠密貯蔵プールの使用済燃料火災事故の可能性)

2011 年の福島第一の事故のずっと前から、米国原子力規制委員会（NRC）を支援する米国国立研究所の技術的研究グループの間で、稠密貯蔵プールにおける使用済燃料火災の可能性が懸念されていた。しかし、NRC の規制スタッフは、このような事故の確率は規制措置の導入に値するような高さのものではないとの結論を繰り返し出していた。

5.4.1 2001.9.11 テロ攻撃後、原発の破壊活動に対する脆弱性の検討

2001 年 9 月 11 日のテロ攻撃の後、米国議会は、「米国科学アカデミー (NAS)」による独立の研究を要請した。2006 年に発表された報告書は、米国内の一つ一つの原発における破壊活動に対する脆弱性について NRC が検討することを提言し、その検討結果によっては、NRC が「一部の商業用原子力発電所のプールでは、テロリスト攻撃の潜在的影響を低減するために、使用済燃料の乾式貯蔵への早期移動が賢明だとの決定があるだろう」と述べている。

5.4.2 NRC 福島原発事故の教訓について研究

2011 年の福島事故の後、NRC は、福島「教訓」についての研究を行った。その中には、5 年間のプール冷却の後、空冷式の乾式貯蔵への「迅速移行」に関する規制措置の可能性についての公式な検討が含まれていた。日本の原子力規制委員会の田中委員長が日本で奨励していた案である。2013 年、NRC のスタッフは、迅速移行の「費用・便益」分析を発表した。

5.4.3 使用済燃料プールにテロの脅威は存在しない (NRC 分析)

2006 年の「米国科学アカデミー (NAS)」報告書で表明された懸念にもかかわらず、NRC のスタッフによる分析は、使用済燃料プールに対するテロの脅威は存在しないと想定した。この分析の結果、プール内の使用済燃料の量を減らすことによる大きな利点が見いだされた。プール内のジルカロイ被覆材の量が少ないと、それだけ、冷却水喪失事故の際に発生する水素の量が少なくなるというものである。

5.4.4 古い燃料をプールから除去でプール上の水素濃度は爆発限度に達せず

実際 NRC が選択したコンピューター・シミュレーションの結果によると、古くなった燃料がプールから除去されていれば、プール上の水素濃度は 10 パーセントという爆発限界には達しない。その結果、プールを覆っ

ている建屋は破壊されずにすみ、燃料から放出されたセシウム 137 のほとんどは、内側の表面に凝縮・沈着する。その結果、稠密貯蔵プールの火災から大気中に放出されるセシウム 137 の量と比べ 98 パーセント以上の減少をもたらすことになり（平均 1600PBq から 23PBq への低下）、事故の影響もそれに応じて減少する。

5.4.5 稠密貯蔵使用済燃料プールの火災爆発による建物破壊で 350 万人避難

米国の稠密貯蔵使用済燃料プールでの火災における水素爆発でプール上方の建物が破壊された場合について、NRC のスタッフは、3 万平方キロメートルの地帯から平均 350 万人の避難が必要になるとの結果を得た。

一方、プール内の燃料の量が、原子炉から取り出された最近 5 年間のものだけに減らされると、建屋が破損せず、その結果、避難地帯と避難人口は約 100 分の 1 に減少することになるとスタッフの計算結果は示していた。

だが、スタッフが発表したのは、不明確な費用・便益分析だけで、その結論は使用済燃料を 5 年間のプール冷却の後、乾式貯蔵キャスクに移すのにプール当たり約 5000 万ドル（約 55 億円）かかると見積もられるが、それは、事故の影響の低減によって公衆が得る確率荷重便益を上回る、というものだった。

この結論は、いくつもの間違った非現実的想定をすることによって得られたものだった。そのうちの一つは、テロリストによる攻撃の成功確率はゼロというものである。他の三つの想定は、使用済燃料プール火災による潜在的な経済的損失について甚だしい過小評価をもたらした。

50 マイル（80 キロメートル）を超える事故の影響は、事故の影響に関する計算における NRC の標準的想定に従って除去された。小規模の事故では、避難地帯が 50 マイルを超えて広がるとは考えない。福島事故の避難地域は、大体、風下約 30 マイル（48 キロメートル）までだった。しかし、

稠密貯蔵使用済燃料プールの火災からの膨大な量の放出による避難地帯は、風下数百キロメートルにも及びうる。

また、事故の影響に関する計算における NRC の標準的な想定に従い、スタッフは、セシウム 137 の汚染レベルは、1 年以内に 15 分の 1 に低減できると想定した。しかし、ニューヨーク市の近くにあるインディアン・ポイント原子力発電所での原子炉仮想事故の影響に関する計算でこの想定を使ったことについてニューヨーク州政府の弁護士に聞かれた際、スタッフは、この想定根拠を提示することができなかった。

福島で達成できた広範な地域の汚染の低減は、最大が 3 分の 1 で、これには 5 年間かかっている。NRC の除染達成期間についての想定だけを変え、それ以外は NRC の損失算出方法に従って計算すると、避難期間が 4 年を超えた場合、住民避難コストと放棄された土地・建物の利用喪失のコストの合計は、元々の土地・建物の価値を超えるとの結果が得られた。つまり、この時点で避難者に対し、一人当たり 20 万ドル（約 2200 万円）（土地・建物の価格）を払って、新しい生活の地を探すようにと言った方が安くなるということである。

フォンヒッペルは、福島後に NRC による見直しの結論について独立した検証を行うようにという米国議会の依頼に応じて NAS が組織した委員会のメンバーだった。NAS による検証は 4 年に渡ったが、NRC のスタッフがその費用・便益研究において想定した強制避難の閾値が、福島及びチェルノブイリ周辺住民に対して実際に使われ、米国環境保護庁も推奨している 1.5 MBq/m^2 の 3 倍の 4.5 MBq/m^2 だったことをフォンヒッペルが知ったのは、検証が終わった後のことだった。避難の閾値を 1.5 MBq/m^2 にして NRC の計算をし直すと、避難を必要とする住民数の平均は、350 万から 820 万に増えた。算出された住民数の値の「範囲（レンジ）」は、風向きにより、120 万～4150 万だった。

NRC のスタッフによる分析のこれら三つの誤りを訂正しただけで、NRC の費用・便益分析の結論は覆る。ただし、結果はそれでも、非常に不確かなものとなる。NRC のスタッフが想定した使用済燃料プール火災の確率の不確実性と、個々の原発の間のばらつきのためである。

5.4.6 避難指示のための汚染閾値

NRC のスタッフによる避難指示のための汚染閾値設定の問題点と低密度プールに関する分析結果との関係を要約すると、サリー原子力発電所におけるプール火災がもたらす避難人口・面積に関する分析において、NRC スタッフが使った汚染閾値が重要な結論を見えなくしていることが分かる（サリーは、事故の影響に関する計算において NRC が使っている「平均的サイト」である）。NRC スタッフによる分析結果で、対象は高密度プール、閾値として使われたのは 4.5 MBq/m^2 である。著者らによる再計算結果で、閾値を 1.5 MBq/m^2 にして高密度プールと低密度プールを比較したものである。放出規模は、高密度プールが平均 1600PBq 、低密度プールが平均 23PBq という NRC の推定値をそのまま使用している。閾値を 1.5 MBq/m^2 にして再計算して比較を見ると、使用済燃料の貯蔵を高密度から低密度に変えることによって、避難人口・面積が劇的に縮小することが分かる。

	避難人口 (単位：100 万)	避難面積 (単位：平方 km)
NRC スタッフ：高密度プール 避難閾値 4.5 MBq/m^2	3.5 (1.3 – 8.7)	30,000 (13,000 – 47,000)
避難のセシウム 137 汚染閾値 1.5 MBq/m^2		
高密度プール	8.2 (1.2 – 41.5)	44,000 (10,000 – 83,000)
低密度プール	0.14 (0 – 0.4)	900 (0 – 3,200)

5.5 韓国における使用済燃料プール火災の影響予測

著者らは、韓国の南東部の海岸地帯に位置する古里原子力発電所における仮想使用済燃料プール火災の影響に関する評価も行った。

5.5.1 古里発電所の3号機使用済燃料プールからのセシウム 137 の放出

2015 年末現在、韓国で運転中の発電用軽水炉の 20 基の使用済燃料プールには、平均して 340 トンの使用済燃料が置かれていた。韓国第二の都市、釜山の近くにある古里発電所は、韓国の最も古い軽水炉を有しており、その 4 つのプールは稠密貯蔵状態にあつて、それぞれ約 600 トンの使用済燃料を収納していた。古里 3 号機の使用済燃料プール内のセシウム 137 の放射能は約 2570PBq と推定する。加圧水型原子炉の稠密貯蔵プールにおける火災から放出されるセシウム 137 に関する NRC のミッドレンジ（範囲の中央）推定値は、75 パーセントである。古里 3 号のプールにおける火災の場合、これは、約 1925 PBq の放出に相当する。

5.5.2 古里 3 号機プールの火災事故による避難想定（400 万人～2100 万人）

古里原子力発電所からのこの規模の仮想放出が 2015 年の毎月一日に始まると想定された。その結果生じる避難地帯を計算するに当たっては、実際の気象データが使われた。

図 5.8 は古里 3 号機のプールにおける火災が 2015 年の 1 月 1 日、4 月 1 日、9 月 1 日に起きた場合の結果を示している。これらのケースは、この地域における使用済燃料プール火災は、隣接する国々でも大きな影響をもたらしうることを示している。これはまた、ヨーロッパにおける使用済燃料プール火災についても言えることである。

古里 3 号機の仮想使用済燃料プール火災による放出が 12 の実際の気象条件の下で起きた場合に推定される韓国及び近隣諸国における平均及び最大避難面積・人口を示している。韓国にとっての影響について言うと、計

算された平均及び最大避難面積は、それぞれ、8000 及び 5 万 1000 平方キロメートルである。避難人口は、それぞれ、約 400 万人と 2100 万人である。古里原発は韓国の南東部の海岸線に位置し、卓越風が日本に向かって吹いているため、日本における平均及び最大の影響は、韓国におけるものに匹敵する。また、計算によると、2015 年 4 月 1 日に始まる火災の場合、気象条件は北朝鮮と中国に大きな影響をもたらすものだった。

国名	避難人口（単位 100 万）		避難面積 (km ²)	
	平均	最大	平均	最大
韓国	4.2	21	8,000	51,000
北朝鮮	0.9	11	4,000	51,000
日本	7.8	27	22,000	58,000
中国	0.7	8	2,000	23,000

本項で議論した日本、米国、韓国における稠密貯蔵使用済燃料プールの仮想火災事故がもたらしうる結果は、その国の再処理に関する政策にかかわらず、使用済燃料を早期に乾式貯蔵キャスクに移すことの重要性を劇的に示している。

6 再処理撤退（衰退）の理由（民生用プルトニウムの分離）

液体ナトリウム冷却「高速中性子増殖炉（FBR）」は、コストの高さと技術的問題のため、発電用原子炉として広範に利用されるには至らなかった。したがって、核兵器何十万発分に相当するプルトニウムが毎年米国その他の国々のハイウェイを通して運ばれるようになることを伴う米国原子力委員会の「プルトニウム経済」のビジョンは、現実のものとはならなかった。再処理もそれにしたがって衰退ないし、撤退が相次いだ。しかし、いくつかの国々では、マグノックス炉や軽水炉使用済燃料の再処理が続いた。その規模は元々想定されていたものよりは小さいが、潜在的な核兵器の数で測れば、それでも巨大なものだっ

た。

6.1 フランス

フランスでは、分離済みプルトニウムは高速増殖炉の燃料として使用されなくなったため、普通の軽水冷却炉用のプルトニウム・ウラン「混合酸化物(MOX)」燃料として使われるようになった。この目的のためにわざわざ使用済燃料を再処理してプルトニウムを分離するのはまったく非経済的であったが、それでもフランス政府は、あたかもフランスにおける電力コストの増大は、何千人もの雇用を意味する巨大なラ・アーク再処理工場を維持するためには許容できる代価と考えている。年間 1600 トンの軽水炉使用済燃料を商業用に再処理 (UP3 と UP2 - 800) している唯一の国である。

6.2 イギリス

英国で再処理が続けられ、拡大したのは、政府所有の英国核燃料公社 (BNFL) を、フランスのコジェマ社と競合する国際的再処理サービスの提供者として確立するためであった。英国自身の分離済みプルトニウムのストックは、使用計画のないまま増え続けた。しかし、海外顧客用の再処理工場として建設された THORP 工場は軽水炉使用済燃料の再処理委託の更新がなかったため、2014 年に操業を中止し、2018 年 11 月より廃止措置に入っている。

6.3 日本

日本は、カーター政権の反対をよそに、東海村のパイロット再処理工場の運転を続け、産業規模の再処理工場を建設する計画を変えなかった。そして、増殖炉がない（原型炉「もんじゅ」の事故・廃炉）ため、フランスの例に倣って、余剰プルトニウムを軽水炉の燃料にすること（プルサーマル計画）を

決めた。東海再処理工場に替わる六ヶ所再処理工場は 2022 年度上期の竣工予定が 9 月 7 日、26 回目の延期が公表されたばかりである。

6.4 ロシア

ロシアの原子力研究開発（R&D）推進体制派は、頑固に増殖炉の開発を追求し続けた。そして、その増殖炉構想を支えるために、再処理を続けた。BN-600 増殖原型炉の燃料はプルトニウムではなく濃縮ウランであるにもかかわらずである。

6.5 再処理衰退の理由、その 1 技術問題

民生用プルトニウム分離のための再処理工場の衰退の第一の理由は、高速増殖炉計画の技術的失敗であった。天然ウラン中の核分裂性ウラン 235 はわずか 0.7%にすぎず、99%以上の非核分裂性のウラン 238 はウラン 235 の核分裂によって放出された中性子を吸収してプルトニウム 239 となる。このプルトニウム 239 に中性子を照射して 1 個以上ウラン 238 をプルトニウム 239 にすれば、ウラン 238 を限りなくプルトニウム 239 に増殖できることになる。その目的のために考案されたのが、再処理工場である。そのため、原子力発電所など原子力政策推進の両輪は、高速増殖炉と再処理工場であった。世界の高速増殖炉計画が頓挫すると核燃料サイクル推進のもう一つの車輪の再処理も成り立たなくなる。

6.5.1 高速増殖炉の技術的問題

高速増殖炉計画を放棄せざるを得なかった最大の理由は、その技術的な問題であることはこれまでに述べた。それは、増殖炉のナトリウム冷却材が水や空気に触れると発火し、火災事故を起こすという問題を克服できないからであった。

増殖炉断念の最初の国は、アメリカであった。米国の原子力潜水艦の加

圧水型炉の開発者であるハイマン・リッコーリバーは、1956年、原子力潜水艦シーウルフにナトリウム冷却炉を設置した後、ナトリウム冷却炉は「建設が難しく、運転が複雑で、わずかな故障によっても長期の運転停止になりやすく、そして、修理は困難で時間がかかる」と述べている。リッコーリバーは結局、シーウルフのナトリウム冷却炉を軽水炉に取り替えた。

増殖炉のナトリウム冷却の技術的問題は、生涯設備利用率に直結することになった。生涯設備利用率とは、発電所が実際に生み出した電力を、その発電所がその商業的生涯全体にわたって最大容量で運転された場合に生み出したであろう電力量で除した値のことである。軽水炉の設備利用率は平均約 80%であった。

英国の高速原型炉（1974年～90年）、フランスのスーパーフェニックス炉（1985～98年）、日本の「もんじゅ」（1995～2017年）の生涯設備利用率が、それぞれ、8%、3%、0%であったことが、これらの増殖炉が廃止されることにつながった。

6.5.2 軽水炉用使用済燃料の再処理工場の技術的問題

発電用原子炉として、増殖炉への夢を壊し、競争に勝った軽水炉が主流となり、その使用済燃料を再処理して分離したプルトニウムを MOX 燃料として軽水炉で使用方法が核燃料サイクルとして登場した。

こうして失敗に終わった高速増殖炉の夢が残したものは、大量の分離済みプルトニウム、イギリスとフランスにおける高速増殖原型炉の放棄後に長年にわたった再処理の継続、日本における六ヶ所再処理工場の完成・運転開始にむけた動きなどがある。このうち、六ヶ所再処理工場は、2022年9月現在、福島第一原子力発電所の事故後に定められた新規規制基準の下での安全対策工事を終えていないため、通常運転には至っていない。

(1) 再処理技術の進化（ガス炉燃料から軽水炉燃料へ）

1940年代に、照射済み金属ウランから軍事用プルトニウムのみを分離

回収することを目的に開発された沈殿法は、バッチ法であり「沈殿生成・ろ過・洗浄」といったやっかいな遠隔操作の回数が多く、ウランを含む大量の廃棄物が生じる等、大規模な再処理技術としては問題があった。その後、ウランとプルトニウムの両方を連続方式で回収できる溶媒抽出法が採用された。とくに、耐放射線性、耐硝酸性に優れ、引火点が比較的高いリン酸トリブチル（TBP）をケロシンで希釈した溶媒は、ウランとプルトニウムと核分裂生成物との高い分離が達成でき、また還元剤を用いてプルトニウムの原子価を難抽出性の3価にすることによって、プルトニウムとウランとの相互分離も効率よくできることから、この抽出法（PUREX法）がプルトニウム生産工場の主要なプロセスとして採用された。

PUREX法は、動力炉としてイギリス、フランスで実用化された天然ウラン金属燃料黒鉛減速ガス冷却炉（ガス炉）の使用済燃料（SF）の再処理にも、工業的な規模（英・B205、仏UP-1）で利用された。

ガス炉に続いて低濃縮ウラン酸化物燃料・軽水減速冷却炉（軽水炉）が実用化され世界的に普及していったので、軽水炉使用済燃料の再処理が次の課題となった。

軽水炉の燃料は、酸化ウラン（ UO_2 ）のペレットをジルカロイ（ジルコニウムにスズ・鉄・クロムなどを加えた合金）の管（直径約1 cm、長さ約4 m）に挿入して両端を閉じたもの（燃料棒）数十本～数百本を束ねて燃料集合体に成形したものである。軽水炉の使用済燃料は、ガス炉燃料に比べると燃焼度が高く、使用済燃料の単位重量当たりの核分裂生成物およびプルトニウムの含有量が大きい。その結果、軽水炉使用済燃料は発熱量、放出放射線量、内蔵放射能等もすべて大きいので、それだけ再処理は技術的に難しいといえる。代表的な軽水炉には、PWR（加圧水型）BWR（沸騰水型）の2種類があり、燃料集合体の形状は異なるが、

基本的な再処理法は変わらない。

(2) 軽水炉燃料の再処理技術

軽水炉燃料の再処理法の技術開発は、軽水炉の開発者である米国が最初に行った。使用済燃料を硝酸に溶かした後は、ガス炉燃料の再処理経験から、溶媒抽出法が適用できる見通しがあったことから、軽水炉使用済燃料再処理の最初の目標は、燃料集合体から燃料成分を硝酸水溶液として得ることであった。燃料棒のジルカロイ部分は硝酸では溶けないので、機械的に破ることが考えられた。燃料集合体のまま剪断機で輪切りにして数センチの切断片をつくり、溶解槽の中で燃料部分だけを硝酸に溶解する方法が、オークリッジ国立研究所で開発され、チョップアンドリーチ法と名づけられた。この方式で民間会社 Nuclear Fuel Service 社の再処理工場が West Valley に建設され、1966 年から 72 年まで運転され、約 250 トンの初期の軽水炉燃料が処理された。

現在の代表的な PUREX 法再処理工程は、使用済燃料受入貯蔵、剪断、溶解、精澄、溶媒抽出分離精製、脱硝、高レベル廃液処理（酸性）、中レベル廃液処理（含塩）、低レベル廃液処理、オフガス処理といった工程技術がある。

① 使用済燃料受入貯蔵

この方法には、湿式法と乾式法があり、現在はいずれも用いられている。前者は、プール内に燃料輸送遮蔽容器（キャスク）を沈めて燃料を取り出す。現行の軽水炉側ではこの方法で使用済燃料の集合体をキャスクに装荷するので、技術的な類似性があるが、プール水およびキャスクの汚染が避けられず、キャスクの除染に手間取る。この問題を軽減するため、イギリスの THORP 工場では、キャスク内に燃料密封容器を入れて、複数の燃料集合体をまとめて受入貯蔵する方式を採用した。乾式法は、遮蔽セルの中で燃料を取り出す方式で、湿式法の問題点を避けてい

る。乾式キャスクの受入では特に都合がよい。フランスのUP3にTOと呼ばれる乾式受入施設が新設された。再処理工場の燃料貯蔵では、燃料の取扱い頻度が大きいので、プール内貯蔵方式が適している。

② 剪断、溶解、清澄

燃料集合体単位で、一方の端から剪断する集合体剪断法が主流である。小規模再処理工場では、集合体を解体してから燃料棒を剪断する方式（pin shearing）の例がある。集合体剪断機には、燃料供給方式、剪断刃駆動方式、保守対応設計等についていくつかの方式がある。剪断刃等は消耗部品であり比較的短い期間で交換するので、遠隔保守が可能なように設計されている。剪断燃料は直接溶解槽に装荷する方式が多い。

溶解には回分式（燃料装荷、溶解、溶解液移送、不溶解物取り出しを順次一定量の燃料について行う方式）と連続式がある。連続式は水車型（フランス）、回転ドラム型（アメリカ）、パルス型（イギリス）等々色々な方式が研究開発されてきた。一般に連続式は装置が複雑になり保守に留意が必要であるが、高能率であり溶解液の性状を一定に保てる利点がある。UP3と六ヶ所再処理工場では水車型が採用された。

剪断工程（その後の溶解工程も含めて）で問題になるのは、この工程で排出されるクリプトン 85 等大量の希ガスの問題で、年間管理値でみると、東海再処理工場で 8.9 京ベクレル、六ヶ所再処理工場で 33 京ベクレル（890 万キュリー）に達することから、吸着法による除去・貯蔵が検討されたが、放射能の人体に与える影響とコストとの対比でクリプトン 85 の除去をあきらめ、これが全て大気中にたれ流しにされる結果となったことである。

溶解工程での最大の技術的課題は、軽水炉原発の燃焼度が増す（40000～50000MW 日／トン）につれ使用済燃料の溶解が難しくなり、硝酸溶液の濃度と加熱温度を上げなければならなくなるという問題が生

じる。東海再処理工場では耐食性に優れた高クロム・ニッケル鋼を溶解槽の部材にしようとしたが、再三の穴あきが発生し、その都度、操業がストップした。そのため、ラ・アーグの UP3 再処理工場や六ヶ所再処理工場では、ジルコニウム合金の素材に替えているものの、高燃焼度の使用済燃料の溶解でこの問題が基本的に解消されたとの報告はない。

溶解後の溶液には不溶解残渣が含まれている。燃料の燃焼度が高まるにつれて残渣の量が増えるので、溶解液から残渣を除去（清澄という）することが重要になった。清澄には遠心分離法と濾過法がある。最近の大型施設では遠心式が採用されているが、回転機なので保守に留意がいる。濾過法は、分離性は良いがフィルターが目詰まり等があり処理能率が劣る。複数の単体を併設するほか逆洗浄に工夫が要る。東海再処理工場ではパルスを掛けて目詰まりを抑える工夫がされた。旧ソ連においては濾過助材を使用しているという報告もあった。フィルターの交換は、特殊な遮蔽容器を用いて遠隔操作で行われる。溶解後、溶解槽から取り出された被覆材（ハル）は、一時水中貯蔵されるかセメント固化される。（THORP、UP3、UP2-800 の場合）。

清澄工程で技術的に問題になるのは、日本の軽水炉原発の使用済燃料は燃焼度が 5 万 MW 日／トン以上にも達しているため、燃料中の難溶性の核分裂生成物の存在で、とくにルテニウム、ロジウム、テクネチウム、モリブデンなどの白金族の処理である。硝酸で溶かしきれずに不溶解残渣粒として残る。もちろん燃焼度が高くなれば、使用済燃料中のプルトニウム濃度も増えるはずで、不溶解性の酸化プルトニウムとして残る。これらの不溶解残渣の清澄法としては、遠心分離法が主流であるが、発熱性が強く、溶解槽の溶接部分を損傷させる事故の原因となっている。

この集合体剪断・溶解方式は、日本の東海再処理工場、フランスの HAO（UP2 における酸化物燃料用の前処理施設）、UP3、UP2-800、

イギリスの THORP 等の工場で踏襲されている。剪断機、溶解槽等の設計は、各国の研究開発努力で改良され、問題は残っているものの全体の方式としては定形化された。

③ 分離・精製、脱硝

PUREX 法による分離精製工程およびそれ以降の工程は、以前のガス炉燃料再処理と基本的な構成は変わらないともいえるが、処理対象燃料の変遷と、構成機器、制御技術の進展を反映してはるかに高性能になってきた。

現在、実証され実績のあるリン酸トリブチル (TBP) に替わる抽出溶媒は現われていないので、全ての再処理工場で PUREX 法が採用されている。その共抽出（共除染ともいう）工程においては、TBP がウランやプルトニウムと接触すると、それらの硝酸塩 ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$) はそれぞれ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{TBP}$ と $\text{Pu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2 \text{TBP}$ を形成して有機溶媒中に溶ける。この反応は非常に速く、選択的に起きるので、他の元素からウラン、プルトニウムを抽出分離することができる。通常、水溶液の硝酸濃度が 3 モルの時が最適とされている。次の分配工程においてプルトニウムとウランを分離するために、プルトニウムを 4 価から 3 価に還元する。プルトニウムの還元には、当初はスルファミン酸第一鉄が使われたが、後にウラナス (U^{4+}) または硝酸ヒドロキシルアミン (HAN) 等が用いられるようになり、金属塩廃液は減少した。これらの還元反応も迅速に進むように改善された結果、燃料の高燃焼度化による溶媒の劣化対策として、抽出装置がミキサセトラから、溶媒と水溶液との接触時間の短いパルスカラムへと進み、遠心抽出機へと変わっても問題はなくなったが、大型再処理工場ではまだ遠心抽出機は採用されていない。

分配工程では、硝酸から生じる亜硝酸がウラナスや 3 価のプルトニウ

ムを酸化して上記の還元反応の効率を劣化せる。そのため亜硝酸を分解するヒドラジン (N_2H_4) が還元剤とともに用いられている。

溶媒再生工程では、廃液量をさらに減らすために洗浄剤の塩フリー化、蒸溜リサイクル法の適用も行われている。

ウランの脱硝は硝酸ウラニル硝酸溶液の加熱分解法が一般的だが、プルトニウムに対しては、プルトニウム硝酸溶液の直接加熱分解の他にプルトニウムをシュウ酸塩として沈殿させてから加熱分解して酸化物とする方式も用いられている。

ここで問題になるのは、抽出剤の TBP が放射線に弱く、分解しやすい点である。さらに硝酸によって分解が促進され、溶媒抽出の工程で、プルトニウムとウランが有機相に、他の核分裂生成物が水相に分離されるその度合いが悪くなり、ジルコニウムやルテニウムなどが有機相に混入してきて不溶解残渣の除去率が低下する。

この工程の安全上最大の課題は、最終的に水溶液中に混入した微量の TBP が、使用済の溶媒回収のため濃縮工程で硝酸と反応し、レッド・オイルが形成され、このレッド・オイルは揮発性物質で 155°C の温度で爆発するからである。実例が、1953 年のサバンナ・リバープラントでの有機溶媒の大爆発事故である。

6.5.3 高レベル廃液のガラス固化体製造工程の問題

抽出分離された使用済燃料の大部分を含む高レベル酸性廃液は、蒸発缶で濃縮され、一時貯蔵後ガラス固化される。高レベル廃液ガラス固化の目的は、再処理工程廃液中に含まれるきわめて高い放射能を有し、かつ長寿命の放射性核種などをガラス状の媒体の中に固定化することである。研究開発の結果、固化材としてのガラスはその特性や成形性に優れ、また、経済性及び実績の点からも最良の材料であると考えられており、諸外国において実用規模で操業されている固化施設は、ホウケイ酸ガラス固化プロセ

スによるものである。高レベル放射性廃液は、使用済燃料 1 トン当たり約 500 リットル (0.5 m³) 発生し、その比放射能は約 3.7×10^{13} ベクレル (Bq) (=1000 キュリー) /リットルである。六ヶ所再処理工場が本格稼働すると、年間 800 トンの使用済燃料の再処理により、約 1000 本のガラス固化体が発生すると予想されている。

① アメリカ

米国では商業用発電炉の使用済燃料は再処理せずにそのまま地層処分されることになった。高レベル放射性廃液はタンクに貯蔵されており、環境回復プロジェクトの一環としてガラス固化計画が進められてきた。1953 年より流動床仮焼法、スプレー仮焼・ガラス化法をはじめ種々の方法が並行して研究されてきたが、総合的な評価の結果、流動床仮焼法および廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法が採用された。サバンナ・リバーおよびウェストバレーの再処理工場では 1996 年からガラス固化体の製造が開始され、ウェストバレーでは 2002 年までにすべてのガラス固化体の製造 (275 本) が終了した。

② フランス

フランスでは 1956 年よりポットガラス化法の研究開発と並行してロータリーキルン仮焼・誘導加熱ガラス熔融法が開発され、1978 年マルクール工場において実規模のホット運転が実施され、現在稼働中である。同様の処理施設がラ・アーグ再処理工場においても稼働中である。

③ イギリス

英国においては 1956 年よりポットガラス化法の試験研究が開始され、規模を大きくした HARVEST 計画がすすめられてきたが、この計画は途中で中止された。これに代わり 1983 年フランスからロータリーキルン仮焼・誘導加熱ガラス熔融法が技術導入され、セラフィールド再処理工場にガラス固化施設を建設し、1990 年から運転が開始された。

④ ドイツ

ドイツでは 1970 年代に入りスプレー仮焼・セラミックメルターガラス固化法の開発、引き続いてビトロメットのできる廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法をベルギーと共同で開発し、実廃液を用いた実証実験がパイロット・プラントで行われてきた。なお同様の技術が商業用バックースドルフ再処理工場に適用される計画であったが、この計画は途中で中止された。1991 年に操業を停止したカールスルーエ再処理工場のデコミッショニングの一環として、カールスルーエ再処理工場に貯蔵されていた高レベル放射性廃液については廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法によりガラス固化が行なわれる予定となっている。

⑤ 日本

日本の高レベル廃液固化技術については、1970 代初期に動燃および原研（現在の日本原子力開発機構）において、模擬高レベル廃液を用いて仮焼の研究が開始された。その後、動燃の高レベル放射性物質研究施設および原研の廃棄物安全試験施設が完成し、1980 年代初めから実際の高レベル廃液を取り扱う研究が開始された。

日本の高レベル廃液処理処分具体的方策について、1980 年 10 月に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会が「放射性廃棄物処理処分方策について」をまとめた。

「高レベル廃液の固化処理技術開発は、ホウケイ酸ガラスによる固化に重点を置く。この技術開発の成果は、海外委託再処理に伴う返還廃棄物対策（1990 年以降）および民間再処理事業者の行う固化処理への活用を図る。使用済燃料として原子炉から取り出された後、再処理を経てガラス固化された固化体はそれに含まれる放射性核種の崩壊熱が深地層の岩盤に与える影響を緩和するため、深地層中に搬入されるまでの間、30～50 年間程度、冷却のために貯蔵される。」

動燃の高レベル放射性物質研究施設では模擬廃液を用いた実規模のガラス固化装置（廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法）による実績を約10年積んだ。その後、1982年から実廃液を用いたホット試験を実施した。この成果をふまえて廃液直接供給セラミックメルターガラス固化方式によるガラス固化技術開発施設を設計して1988年に着工、1993年試験運転開始、1994年ホット試験運転終了、1995年12月に使用前検査合格証を受領してガラス固化体の製造を開始した。その後、2002年から2004年にかけて、ガラス固化の処理能力低下の防止や溶融炉の長寿命化を図るため、高レベル廃液中に含まれる白金族元素の抜き出し性を向上させた改良型溶融炉への更新を行なった。2006年3月までに1号炉からのものも合わせ218本のガラス固化体を製造している。東海再処理工場の廃止措置に伴い、再処理工場内に残る350 m³（立法メートル）の高レベル放射性廃液を2028年度までに564本のガラス固化体を製造する計画であったが、2021年10月4日、溶融炉内の金属の堆積が想定を上回ったことを理由に作業を中止した。この間に製造したガラス固化体はわずかに13本にとどまっている。

1993年から建設された日本原燃の六ヶ所再処理工場には原子力機構が開発した高レベル廃液ガラス固化技術が採用されており、ガラス固化技術開発施設の建設、運転の経験等をもとに、原子力機構技術者の派遣、日本原燃技術者の教育訓練、技術情報の提供等の技術協力が進行中である。

原子力機構が開発した廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法は、ホウケイ酸ガラスを耐熱、耐食性に富んだセラミックス製の炉の中でジュール加熱により溶融する方法である。この方法は従前からガラス製造工業で用いられ、実績はある。まず、ガラス溶融炉に設置している炭化ケイ素製の間接加熱ヒーターにより溶融点まで昇温後、電極間直接

通電によるジュール加熱により加熱する。その後、高レベル廃液をガラスファイバーカートリッジに吸収させた状態で熔融炉へ供給し、熔融物はキャニスターに注入され、冷えて固化体となる。ガラス固化体はガラス重量約 300kg、体積約 110 リットルであり、キャニスター 1 本分がほぼ使用済燃料 1 トンの高レベル放射性廃液に対応している。電極材には耐食性に優れたインコネル合金などが用いられている。炉の温度は 1100～1250℃に制御される。熔融ガラスは、フリーズバルブ方式のノズルを通し容器（キャニスター）内に流下させる。この方式が、廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法である。この炉の寿命は約 5 年と見積もられているが、廃液直接供給セラミックメルターガラス固化法の特徴は、連続運転および規模の大型化が可能であり、また、炉に廃液が直接供給されるため内部表面が低温に維持されるので、オフガス中へのルテニウム、セシウムなどの揮発性核種の逸散が少ないという利点がある。

日本原燃は、アクティブ試験で溶解炉の不具合で中断停止されていたガラス固化体製造工程を福島第一原発事故後に再開し 2007 年 11 月から 2013 年 6 月まで 5 年 8 カ月をかけて、346 本製造したと報告している。さらに、2022 年度上期に完工した場合、まず高レベル廃液 111 m³ をガラス固化するとしているが、白金族元素の炉底部に堆積したとしてガラス固化体の製造中止している原子力機構の東海再処理工場のガラス固化施設と同じ方式の六ヶ所再処理工場のガラス固化製造施設が機能するとは思えない。

6.5.4 高燃焼度使用済燃料のピューレックス法による再処理の技術的問題

2011 年までに、原子力発電所で発生した使用済燃料の再処理を自国内で実施していた国は、フランス、イギリス、ロシア、日本、インド、そして中国である。このうち、大型の商業用再処理工場を持ち、国際的な再処理役務契約に基づいて事業を行った経験をもつのはフランス（UP3 と

UP2-800) とイギリス (THORP) の 2 カ国のみであり、いずれの再処理工場もアメリカで開発された高燃焼度の軽水炉使用済燃料を PUREX 法で再処理している。しかし、イギリスの THORP 再処理工場は、1992 年に建設完了、1994 年に操業開始、1997 年に本格運転したが、2018 年 11 月に操業を終了している。

従って、現在操業中の再処理工場はフランスの UP3 工場と UP2-800 工場だけであり、これに同じ PUREX 法を採用し 2022 年度上期に竣工予定の六ヶ所再処理工場を加えると 3 工場となる。

ピューレックス法に依る技術的問題は、軽水炉での燃焼度が上がるにつれて、①ルテニウム、パラジウム、ロジウム等の白金族元素の不溶性核分裂生成物が増大することによって発生するトラブル、②使用済燃料の比放射能の増大に伴い、抽出溶媒の放射線劣化が避けることができなくなる問題、③プルトニウムの濃度が高くなり、溶解工程では臨界制御上の制約が特に厳しくなる、④分離捕集が困難で気体で大気中に放出されるクリプトン 85、トリチウム、炭素 14、ヨウ素 129 などの放射能の環境への影響、⑤ガラス固化工程における溶融炉の炉底部への白金族の沈降、堆積が起こる問題、等の改良解決である。

6.5.5 乾式再処理法の技術の未確立

軽水炉の使用済燃料の燃焼度は、PWR においては 55000MW 日／トン以上に達しており、その分プルトニウムの濃度も増加している。しかし、高速増殖炉計画が頓挫したなかで、燃焼度が高くプルトニウム富化度の高くなった燃料にピューレックス法を適用するには、溶媒の放射線劣化防止に難点があるだけに装置の改善で克服できないようならば、湿式法を避けて高温冶金法や溶融塩電解法などの乾式再処理法を開発するしかないが、いまだに有効な乾式再処理法が開発されてはいない。

韓国は使用済燃料の再処理によってプルトニウムの分離に関する協定が

ないが、2015 年米韓原子力協定を締結し、2021 年米韓共同燃料サイクル研究（乾式再処理に関する）を 2021 年に完了し、この共同研究の報告書を承認している。乾式再処理技術の詳細は不明である。

6.6 再処理衰退の理由、その 2 再処理の経済性

使用済燃料を再処理し残存核燃料物質をリサイクルする再処理方式と再処理せずに放射性廃棄物として直接処分する方式を比較し、再処理の経済的意義を検討した結果、軽水炉の場合、発電コストに占める核燃料サイクルコストは再処理する方式が直接処分する方式よりも現状において約 2 倍高いとの試算（2011 年 10 月 25 日 原子力委員会）が出ている。2000 年のフランス首相の求めによる研究では、軽水炉燃料の再処理による MOX 燃料の製造コストは、低濃縮ウラン燃料コストの 5 倍とする報告もなされている。

6.6.1 民生用未照射プルトニウム燃料の市場性

軽水炉使用済燃料を再処理工場において PUREX 法で分離した民生用未照射プルトニウムによる MOX 燃料はこれまで述べてきたように需要も市場性もないことからアメリカやドイツなど原発を有する主要な国では再処理を放棄した。イギリスも 2018 年に THORP 再処理工場を閉鎖した。

市場性がないにもかかわらず大規模施設で再処理を続けているのは、フランスだけであり、日本も六ヶ所再処理工場の操業を 2022 年度上期としていたが、2022 年 9 月 7 日 26 回目の延期が公表された。この両国は、使用済燃料の再処理を電力会社に強制（なかば義務化）している。ラ・アーグ再処理工場は約 2 兆 2000 億円かけて建設し、5000 人の労働者を雇用している。

また、いまだ操業開始していない六ヶ所再処理工場に至っては、1993 年に建設着工して以来 29 年たった今日、当初予算が 7000 億円だったものが、約 2 兆 9000 億円も要しており、この間のアクティブ試験で軽水炉燃

料 425 トン再処理し、分離したウラン製品 366 トン、プルトニウム製品 6.66 トン、高レベル放射性ガラス固化体 356 本、その他の固体廃棄物（約 50 トン分）、さらにガラス固化体にできなかった 211 m³の高レベル廃液が残ったままである。これでは、再処理をやめたくてもやめられないのが実態である。

6.6.2 経済性のない再処理を継続する理由は何か

2022年9月現在、民生用使用済燃料の再処理を継続している（しようとしている）のは、フランス、日本、ロシア、インド、中国の 5 カ国である。過去に再処理を実施してこの間にやめた国は、アメリカ、ベルギー、ドイツ、イギリスの 4 カ国である。

フランスと日本が再処理を継続している（しようとしている）のはすでに述べた。ロシアは現在なお高速増殖炉計画に積極的であり、原型炉の燃料は濃縮ウランである。

ロシアは 20 基の大型軽水炉原発を建設し、クラスノヤルスク再処理工場（1500 トン／年）を 1972 年に建設着工したが、資金不足のため、1998 年に進捗率 40%で中断されたままである。

インドは、トリウム資源を活用する方針で原子力開発をすすめ、増殖炉にトリウムを供給するサイクルを実施している。クラブール再処理工場（150 トン）、カルパッカム再処理工場（125 トン）が稼働している。

中国は、クローズド燃料サイクル政策を基本とし、急増している原発建設に対応するように、民生用再処理工場の建設を進めている。酒泉再処理工場（400kg）、蘭州再処理工場（50 トン）の研究プラントが稼働し、商業用再処理プラントが嘉峪関再処理工場（800 トン／年）としてフランスの支援で計画されているが具体的な建設用地がいまだ未定である。

6.7 再処理衰退の理由、その3 危険性 人体・環境に与える影響（汚染）

再処理推進派は、深地下処分場に入れられた使用済燃料から漏れ出す放射能の潜在的な長期的危険性に焦点を合わせて主張する。しかし、再処理の高レベル廃液は地上で作られる。それが地上に置かれている間にもたらす潜在的危険性の方がずっと大きい。

6.7.1 ウラルのキシュティム再処理工場の事故（1957 年）

実際、広範な地域からの避難を必要とした最初の大きな核事故は、1957 年にソ連の再処理工場で起きた高レベル廃液貯蔵タンクの爆発である。この事故はあまり知られていない。20 年間に亘って秘密にされていた。1976 年にソ連の反体制派の科学者で歴史家のジョレス・メドベージェフが明らかにした時には、すでに過去の出来事となっていて、ニュースとはならなかった。2018 年の時点では、これは歴史上最悪の再処理工場の事故であった。

西側の諜報機関においては、この大きな核事故について知っていたに違いない。彼らがこれを公表しなかったのは、その情報が西側の核兵器プログラムにおけるプルトニウム分離に対する反対運動を助長することつながることを危惧したためではないか。ソ連のこの原子炉の設計が、ソ連の軍事用プルトニウム生産炉から派生したものであり、その生産炉の元になったのが、米国の軍事用プルトニウム生産炉だったため、その時点まで米国に残っていた 2 基のプルトニウム生産炉が停止されるという結果を招くことになった。その理由は、これらの炉も、最新の安全システムを備えていなかったからである。

1957 年の事故は、ウラル地方のキシュティムという村の近くに位置するソ連の最初の再処理工場で起きた。キシュティム再処理工場には、巨大なタンクが複数あって、その中には、使用済燃料を溶かしてウランとプルトニウムを抽出した後に残る核分裂生成物その他の放射性核種を含有する

濃縮液が入っていた。

1957年9月、高レベル廃液タンクの一つの冷却システムが故障した。この故障が気づかれないまま、廃液が沸騰して水分がなくなってしまった。照射済みのウランを溶かすのに使われた硝酸の残留物と、溶液からプルトニウムとウランを分離するのに使われた有機溶剤の残留物とが合わさって、爆発性の混合物が形成された。その爆発は、TNT火薬にして最大 100 トンに匹敵するエネルギーを放出し、大量の放射性物質を飛散させた。これには、5 メガキュリー (185 ペタベクレル (PBq)) のストロンチウム (半減期 30 年) が含まれていた。

爆発は、風下の約 1000 平方キロメートルの地域で平方キロメートル当たり 2 キュリーを超えるレベルの汚染をもたらした。これは、2011 年の福島事故がもたらした住民の長期的避難地帯の面積に匹敵する。幸い、細長い汚染地帯 (長さ約 140 キロメートル) には付近の都市や町は入っていなかった。それでも、「ウラル放射能汚染の道」に入った村々から約 1 万人が避難させられた。ストロンチウム 90 は、福島の避難の主たる原因となったセシウム 137 と比べると外部被曝の危険は小さいが、食べ物に入ったものを経口摂取すると、内部被曝の面でより大きな危険を伴う。ストロンチウム 90 は、化学的にカルシウムに似ていて、「向骨性物質」として振る舞う。そのため、体内での生物学的半減期が長く、その分、大きな放射線被ばくを骨髄にもたらす。

6.7.2 ゴアレーベン再処理工場建設の二つの条件

キシュティム事故が西側で知られるようになってから 3 年後の 1979 年、ドイツのニーダーザクセン州のエルンスト・アルブレヒト首相は、独立のアナリストの国際的グループを招集した。ドイツの電力会社が同州のゴアレーベンの町の近くで建設を計画している再処理工場の設計について評価するためである。国際的グループによる批判を咀嚼・消化したうえでアル

ブレヒトは、工場の建設に同意した。ただし、二つの条件を付けた。サイトに「受動的安全性」を備えた使用済燃料貯蔵施設を設けることと、高レベル廃液を貯蔵しないことである。電力会社は結局、再処理工場を建設しないことに決め、このサイトは最終的に、使用済燃料と、英仏でのドイツの使用済燃料の再処理で生じた高レベル廃棄物ガラス固化体を置く中間貯蔵サイトとなった。

6.7.3 再処理工場に付属する高レベル廃液タンクの危険性

高レベル廃棄物のガラス固化用機器は、しばしば故障する。それが起きた際にプルトニウムの分離プロセスを止めてしまうことは避けたいと、膨大なコストを伴う再処理工場の事業者らは考える。それで、現存する再処理工場はすべて、非常に大量の高レベル廃棄物を液状で保管するタンクを備えた設計になっている。例えば、日本の六ヶ所再処理工場には、高レベル廃液用の大型タンクが 2 基ある。原子炉から取り出し後 5 年の使用済燃料を再処理して出た高レベル廃液を容量満杯になるまで入れた場合、これらのタンクには、それぞれ 1000 ペタベクレル (PBq) のセシウム 137 が入っていることになる。稠密貯蔵の使用済燃料プールの場合と同等の量である。チェルノブイリ原発事故のセシウム 137 の放出量が約 85PBq だった (約 12 倍) ののを忘れてはならない。このタンク内の高レベル廃液が蒸発乾固爆発する危険性がある。

6.7.4 レッド・オイルの加熱爆発の危険性

高レベル廃液タンクの乾固は、再処理工場における爆発をもたらす唯一のシナリオではない。核分裂生成物からの強烈な放射線の影響の下では、硝酸が有機溶媒と反応して「レッド・オイル」の層が形成され、これが加熱して爆発する可能性がある。レッド・オイルはまた、溶解した使用済燃料からプルトニウムとウランを分離するために溶媒が注入されるプロセス・タンク、あるいは、高レベル廃液の体積を減らすために廃液を濃縮す

る蒸発器でも形成され得る。

実際、再処理工場ではレッド・オイルの爆発が何度も起きている。2018年現在、最も深刻な爆発は、1993年に、ロシアの西シベリアのトムスク市に近いセベルスク軍事用再処理工場で起きたものである。爆発は、再処理建屋の側面を吹き飛ばした。幸い、タンク内の放射性物質の濃度は低く、セシウム 137 の放出量は福島第一原発事故の放出量の約 0.003 パーセントに過ぎなかった。

6.7.5 平常時被曝の危険性

六ヶ所再処理工場について政府が定めた放射性物質の放出量の管理目標値では、年間で希ガス・クリプトン 85 が 160,000 兆ベクレル、液体トリチウムは 9,700 兆ベクレルとなっており、他の原発と較べると桁違いに大きく、「原発 1 年分の排出量を再処理工場は 1 日で排出する」と言われるゆえんである。1989 年 3 月段階の申請時には、クリプトンやトリチウムの処理建屋が図示されてあったにもかかわらず、コスト削減を理由に実際の申請時には処理建屋が削除された結果、クリプトンとトリチウムの全量が垂れ流されることになっている。

平常時における原発周辺の住民被曝の目安線量を日本政府は、 $50\ \mu\text{Sv}$ (5 ミリレム) と定めている。しかし、六ヶ所再処理工場から放出される放射能の被曝影響については、申請書では「年間 $22\ \mu\text{Sv}$ (2.2 ミリレム) であり安全性に問題はない」としている。一方で、福島第一原発事故で新規規制基準が適用されると、政府は 2013 年になって公衆の被曝限度である年間 $1000\ \mu\text{Sv}$ (1 ミリシーベルト) を持ち出し、再処理工場からの平常時被曝はこれを上回らないとして、事実上放射性物質の「垂れ流し」放出を容認している。

これらはみな申請書、安全審査において、平常時被曝線量を誤った仮定と推定による計算・評価に基づいた過小評価によるもので、海外で先行し

て操業されたハンフォード、セラフィールド、ラ・アーグなどの再処理工場周辺で再処理工場から大気や海水へ垂れ流された放射性物質の影響によって、小児白血病が多発し、住民にがん死の恐怖を与えている事例を無視したものである。

高木仁三郎の『下北半島六ヶ所村 核燃料サイクル施設批判』（甲 E 第 64 号証、171 頁以下）によれば、六ヶ所再処理工場の平常時の放射能放出がいかに大きいかよくわかる。

再処理工場が平常時でもひどい汚染をもたらすことはすでに実証されている。イギリスのセラフィールド再処理工場では、開設当初からアイリッシュ海に汚染水を垂れ流し、長さ 1 マイル（約 1600 メートル）の放水管からプルトニウムやセシウム、その他の放射性核種が海洋へ放出された。またセラフィールド再処理工場周辺の子供の白血病の多発についてもサザンプトン大学のガードナー教授の報告で明らかである。

また、アメリカで公開された文書によれば、ハンフォード再処理工場では 1944 年から 47 年までの間に全部で約 68 万 5 千キュリーものヨウ素 131 を放出している。1940 年代にハンフォードの近くに住んでいた人々の放射性ヨウ素による甲状腺被曝の量は、1986 年のチェルノブイリ原子炉爆発事故の際に周辺に住んでいた人々のそれより多いというものである。（『プルトニウム』核戦争防止国際医師会議・エネルギー環境研究所・著、1993 年）

1997 年 1 月、フランスのプザンソン大学のヴィエル教授らは、ラ・アーグ再処理工場周辺（半径 35 k m 圏内）小児白血病が多発していることを公表している。

このように、再処理工場は事故時のみならず、平常時の環境汚染、住民被曝の危険性はきわめて大きい。

6.7.6 結論

たとえ事故が起こらないとしても、再処理による環境面での便益は、わ

ずか、あるいは、ゼロである。そして、再処理工場で実際に起きた一つの事故が、将来、深地下の使用済燃料処分場の破損による漏れによって影響を受け得る地帯の面積より何桁も大きな広さの地域の汚染をすでにもたらしている。また、事故が起こらなくても、平常時における周辺住民の被曝の危険性もハンフォード、セラフィールド、ラ・アーク等の再処理工場の事例からして明らかである。

多数のプルトニウム増殖炉の初期装荷用にプルトニウムが必要だという再処理正当化のよりどころが消え、さらに軽水炉でのプルトニウム・リサイクルも経済的でないという状況のなかで、再処理・高速増殖炉推進派は、今度は、いずれにしても、使用済燃料から超ウラン元素を分離し、これを核分裂させるために高速中性子炉を使用することは、環境面から必要だと主張している。推進派は、自分たちのプログラムは原発から発生する高レベル廃棄物が地下処分場に送られる前にその体積と毒性を減らすのに必要だと断言する。

しかし、以上の説明から明らかなように、このとてつもなく費用のかかるプログラムから得られる環境面での利点は小さい。負になる可能性の方が大きい。いずれにしても、このプログラムに伴う核兵器拡散や核事故のリスクの増大の方がはるかに重要な問題である。

7 まとめ

7.1 日本はただちに核燃サイクル政策を放棄すべき

ここまで述べてきてわかるように、日本の核燃料サイクル政策は、軽水炉原子炉による原子力発電を推進し、その両輪として使用済燃料を全量再処理し、再処理で分離回収したプルトニウムを燃料にした高速増殖炉で発電を行うという政策であった。

しかし、2016年の高速増殖原型炉「もんじゅ」の廃炉決定によって、使用

済燃料の再処理で分離したプルトニウム 239 とウラン 238 を燃料にした高速増殖炉計画を放棄せざるを得なくなり、軽水炉でプルトニウムを MOX 燃料として消費する以外に道はなくなった。MOX 燃料のコストは低濃縮ウラン燃料の 5 倍といわれ、経済性も市場性もまったくない。

福島第一原発事故以来、プルサーマル自体もうまく操業されず、日本は余剰プルトニウム（約 46 トン）をかかえ、IAEA をはじめ国際的な懸念が広がっている（日本の核兵器保有、核兵器用に外国へ売却、核の抑止力としての保持の恐れ）。

日本は、ただちに再処理計画をとりやめ、六ヶ所再処理工場を閉鎖・廃棄する政策を決定すべきである。

7.2 六ヶ所再処理工場の中止と廃止措置

2022 年 3 月現在、1993 年に着工した六ヶ所再処理工場は 2022 年 9 月現在いまだに竣工していない。この間に要した建設費用は約 3.13 兆円に達し、これに設備更新費用、操業費等と工場の廃止措置費用、さらに返還廃棄物管理、廃棄物輸送処分費用まで含めると、総事業費は約 14.44 兆円といわれている（2022 年 6 月試算）。

2006 年 3 月までにアクティブ試験で 425 トンの軽水炉使用済燃料を再処理し、ウラン製品 366 トンとプルトニウム製品 6.66 トンを分離生成している。全プルトニウム量では、約 2.944 トンとなっている。アクティブ試験が停止したのは、ガラス固化工程での不具合であり、2007 年 11 月から再開されたガラス固化体の製造で 2013 年 6 月までの 5 年 8 カ月で 346 体の製造にとどまっており、再処理工場の高レベル廃液タンクには廃液 211 m³が貯蔵中である。このうち、高レベル廃液の小型タンクで冷却機能を 8 時間にわたり喪失するという事故を 2022 年 7 月 2 日に起こしている。

また六ヶ所再処理工場には溶解槽に連結する冷却貯蔵プールにはこれまで

3393 トンの PWR と BWR 燃料が搬入されており、現在は 2968 トンが貯蔵されており、プールの占有率は 98.93% で満杯状態である。

日本の PWR および BWR の軽水炉使用済燃料は年々燃焼度が上がり、その分硝酸に対する難溶度が上がっている。それだけ硝酸の濃度を高めることによって、溶解槽の腐食の問題と白金族などの溶解残渣が発生し、ガラス固化工程でのトラブルが続くことになる。また、使用済燃料中の比放射能の増大に伴う、抽出溶媒の放射線劣化が避けられず、溶媒抽出の効率が悪くなる。

六ヶ所再処理工場は「もんじゅ」と同じ運命をたどることになるのは必定であり、一刻も早く再処理をやめる決断をし、六ヶ所再処理工場の操業計画を中止し、廃止に向けた準備を行なうべきである。

そのうえで、使用済み燃料の処分を確定し、残余の高レベル廃液の処分方法を確立させるのが急務である。

7.3 使用済燃料を全量直接処分すべき

世界で商業用再処理を実施しているのは、フランスのみであり、六ヶ所再処理工場の操業が事実上無理なことから、全量再処理政策を堅持するかぎり、フランスに再処理委託する以外にない。使用するあてのないプルトニウムを再処理で分離する無駄をやめるべきであり、政策の転換が求められる。

日本は、今後イギリス・フランスに再処理委託した使用済燃料を除き、すべての使用済燃料の再処理計画を取りやめ、貯蔵期間の長い燃料から順次、キャスクに移し、全量直接処分に転換すべきである。プルトニウムやウランを含む使用済燃料は、各原発で 5 年間冷却貯蔵し、5 年を超える燃料から順次中間貯蔵施設に搬出すべきである。六ヶ所再処理工場の燃料プールで貯蔵されている約 3000 トンの使用済燃料は、搬出元の原発に返却されるべきである。

7.4 日本は原子力政策を根本から見直すべきとき

昨年（2021 年）の総裁選に出た自民党の河野太郎氏は、2015 年に次のように主張している。

「今回、（六ヶ所）再処理工場が完成しても、この工場を稼働させる必要がそもそもない。（核燃料サイクルと呼ばれる）我が国の原子力政策だが、もはや核燃料サイクルは国民にとってまったくメリットがない。」

河野氏は、経産省と電力会社が使用済燃料の再処理を強引に進めようとする理由についてこうも述べている。

「経産省と電力会社はこれまで、原発の立地自治体に対して、使用済燃料は原発敷地内のプールで一時的に保管するが、その後、青森県の再処理工場に搬出されるので、使用済燃料は立地自治体には残らないという約束をしてきた。」

「他方、青森県に対しては、使用済燃料はプルトニウムを含む重要な資源であるという説明を繰り返し、六ヶ所村での再処理工場の建設を認めてもらった経緯がある。」

「また、もし（核燃料サイクル）政策が変更され、青森県に運び込んだ使用済燃料を再処理しないことになれば、国と電力会社は速やかに核のゴミとなった使用済燃料を青森県から運び出す約束もした。」

「もし、使用済燃料を再処理せず直接処分するという政策変更をしたならば、途端に青森県から使用済燃料を持ち出さなくてはならなくなる。しかし、原発の立地自治体に対しては、核のゴミは残さないという約束をしているため、原子力発電所に使用済燃料を戻すことができない。そうかと言って、青森県から使用済燃料を持ち出しても、持って行くところがないのが現実だ。」

「そのため、経産省と電力会社は、再処理の継続を明言し、使用済燃料の問題を先送りする道を選び続け、巨額の無駄なコストを支払ってで

も再処理を進める、あるいは進めるふりをしてきた。そこで、再処理を継続するための理由として、経産省はウラン資源のリサイクルだと言い張った。しかし、使用済燃料を再処理しても、再利用できるウラン資源はごくわずかであり、そのために莫大なコストがかかる再処理に経済的な合理性はない。」

「使用済燃料の再処理によって再利用できるのは、プルトニウム 1 % とプルトニウムとともに回収される回収ウラン 1 % の合計 2 % にすぎない。残りの回収ウランは不純物が多く、当面、貯蔵しておくしかない。だからほとんどウランのリサイクルにはならない。」

経産省と電力会社は、再処理政策をとりつづける理由として、あらたに使用済燃料の有害度短縮を持ち出しているが、河野氏はこの点についてもこう述べる。

「経産省は次の理由付けとして、使用済燃料を直接処分すると天然ウラン並みの有害度に低減するまで 10 万年かかるが、再処理すればそれが 8000 年（軽水炉のガラス固化体の場合）に短縮されると言い出した。」

「しかし、使用済燃料にはプルトニウムがすべて含まれているのに対し、再処理するとプルトニウムが分離され、高レベル放射性廃棄物だけが残る。」

河野氏の弁を借りるまでもなく、これまで述べてきたとおり、日本は核燃料サイクル政策を直ちに放棄すべきである。そして、竣工時期の見通しの立たない日本原燃の六ヶ所再処理工場を廃止・閉鎖にすべきである。もちろん使用済燃料は、今後とも再処理することなく直接処分をし、残余の高レベル廃液を早急に安全に処理処分すべきである。そして、全ての原発について、再稼働中の原発も含め停止して、廃炉に向けた具体的な政策をとらなければならない。