

日本の原子力施設全データ

【電子版・第3章】

北村行孝 著
三島 勇



ブルーボックス



第3章 原子炉の燃料と核燃料サイクル

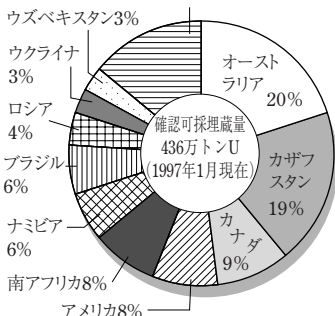
ウラン資源

原子炉の燃料になるウランは、自然界で最も重い元素で、一部の岩石の中にごく微量が含まれている。このほか、海水中にもきわめて微量が含まれており、その総量は四〇億トンともいわれるが、現状では安価に回収する手法がない。そのため、現実にはウラン成分を含んだ陸上の鉱石からウランを分離して、燃料にまで加工している。

世界のウラン資源は、四〇〇万トンを超える可採埋蔵量があると見られている。だが、ウラン一キログラムあたり八〇ドル以内で採掘できなければ経済的に引き合わないとされ、このコストで線引きすると、世界の埋蔵資源量は約三一〇万トンと推定されている。世界の年間ウラン需要量は五万トンあまりといわれ、単純に計算すると、約六〇年分ほどの資源量となる。

世界の各大陸にウラン資源は分布しているが、特にオーストラリア、カザフスタン、カナダ、アメリカ、南アフリカが資源に恵まれている(図3-1)。日本では人形峠(岡山県)や東濃(岐阜県)

その他14%（うち日本0.1%）



日本の確保状況

購入契約形態	相手先国	契約数量 (U ₃ O ₈ ・ショート・トン)
長期契約、短期契約及び製品購入	カナダ、イギリス、南アフリカ、オーストラリア、フランス、アメリカ等	約250,800
開発輸入分	ニジェール、オーストラリア	約51,000
	計	約301,800

(1999年3月現在)

3-1 世界のウラン資源と日本の確保状況 トンU：金属ウランでの重量トン。1ショート・トン=0.907トン。U₃O₈：八酸化三ウラン

でウラン鉱石が発見されているが、埋蔵量は微量で、現実的には資源として利用されていない。

ウラン鉱石をウラン燃料にするまではさまざまな工程が必要で、「製錬」「転換」「濃縮」「再転換」「成型加工」がその主なものだ。それぞれの工程は別々の工場で行われるが、再転換と成型加工が隣接工場で行われる場合などもある。

製錬は、掘り出したウラン鉱石を化学処理してウランを取り出す工程だ。製品は黄色の粉末状で、「イエローケーキ」と呼ばれる。

先に触れたように、天然ウランの中には燃料となるウラン235が〇・七%しか含まれておらず、減速材に重水や黒鉛を使う特殊な炉ではそのまま使えるが、世界で普及している軽水炉の燃料にするためには、ウラン235の濃度を高める濃縮作業が必要になる。

転換は濃縮の前段階に必要な処理で、固体状（粉）の

ウラン（イエローケーキ）にフッ素ガスを反応させるなどして、気体状になりやすい「六フッ化ウラン」にする。ウラン濃縮にはいくつかの方法があるが、いずれも気体状にしないと濃縮工程にかけられないからだ。

ウラン濃縮

ウランの濃縮技術は、もともとは核兵器開発の過程で開発された。質量がごくわずか違うだけで、化学的な性質が同じである同位元素を分離するためには、化学反応を利用するわけにはいかない。

さまざまな手法が試されたが、真っ先に実用化されたのは「ガス拡散法」と呼ばれる方法だった。微細な穴が多数あけられた隔壁を気体状の六フッ化ウランが通る際に、ウラン235とウラン238では通過速度がごくわずかに違うことを利用する。通過した側のウラン235の濃度が、通過前よりわずかながら高まるのだ。こうした過程を延々と続けることにより、ウラン235の濃度を少しずつ高めていく。

その後主流となったのが、「遠心分離法」と呼ばれる方法で、円筒容器の中に六フッ化ウランを入れて超高速回転させると、わずかに重いウラン238は円筒の外側に近いほうに集まり、

ウラン235は回転軸周辺に集まりやすい。この回転軸周辺のウラン235がやや多いガスを次の遠心分離機に導き、さらに濃縮をして、次の遠心分離機に……、という工程を繰り返す。

大規模なウラン濃縮工場は米国、ロシア、フランス、英国などにあるが、日本も旧動力炉・核燃料開発事業団（現・日本原子力研究開発機構）が、遠心分離法を独自に開発。この技術をもとに、電力業界が共同出資した日本原燃（株）が、青森県六ヶ所村で六ヶ所濃縮工場を操業している。

現在は遠心分離法がウラン濃縮の主流になっているが、将来技術として「原子レーザー法」「分子レーザー法」と呼ばれる新たな方法も研究されている。

これらは、ウラン原子にレーザー光を照射してエネルギーを与えた際に、ウラン235とウラン238で原子が励起される度合に差が出るという性質を利用する。ウラン原子を二五〇〇度程度の超高温のガス状にしてレーザー光を照射すると、ウラン235のほうが励起されやすく、イオン化されるので、これに電磁界をかけてウラン235を分離するのが原子レーザー法だ。一方の分子レーザー法は、常温でもガス状になりやすい六フッ化ウラン分子にレーザー光を当てて、ウラン235を含んだ六フッ化ウランを励起し、分離するという方法である。

燃料加工

濃縮された六フッ化ウランは、シリンドラーと呼ばれる丈夫な円筒形の容器に詰められて再転換工場に運ばれ、ここで粉末状の二酸化ウランにされる。臨界事故を起こした茨城県東海村のJCOも、日本を代表する再転換工場の一つだった。

再転換工場でできた二酸化ウランはドラム缶に詰められ、最終工程である成型加工工場に運ばれる。ここで二酸化ウランはペレット（写真³⁻¹²）と呼ばれる小さな円柱形（軽水炉燃料の場合、直径約一センチメートル、高さ約一センチメートル）に加工されて一七〇〇度以上の高温で焼き固められる。

原子力開発の草創期には、金属状のウランを燃料にすることも考えられたが、セラミックス状の二酸化ウランペレットのほうが熱に強く、容易には溶けないことなどから一般化した。

ペレットはジルコニウム合金の管（被覆管）に密封される（写真³⁻¹²参照）。これがふつう「燃料棒」と呼ばれるもので、軽水炉の場合は長さが四メートルほどになり、一本に三〇〇個を超えるペレットが収まっている。

燃料棒は、運転中に破れることがあってはならない。燃料ペレットの中で生まれた放射能の高い核分裂生成物が冷却水の中に漏れ出して、冷却水を汚染してしまうからだ。このため燃料棒は、



3-2 ペレット（上）と燃料棒 ペレットは左から「もんじゅ」
「ふげん」、軽水炉用のもの（上部写真：核燃料サイクル開発機構提供、下
部イラスト：東京電力提供）

炉心の高圧にも耐えられるよう内部に高圧のヘリウムと一緒に封入されている。加圧水型炉の場合は約一四〇気圧、沸騰水型の場合は約七〇気圧で、ほぼ炉心の水圧と等しくなっている。

この燃料棒をさらに正方形に数十本たばねたものが「燃料集合体」で、ここまで加工されたものが原子力発電所まで運ばれて、燃料として使われる（62ページの図2-1参照）。

原子炉の炉心に挿入された燃料は、三〜四年ほど燃やすと、当初三〜五%あったウラン235の濃度が1%ほどまで低下して、燃料としての役目を終える。

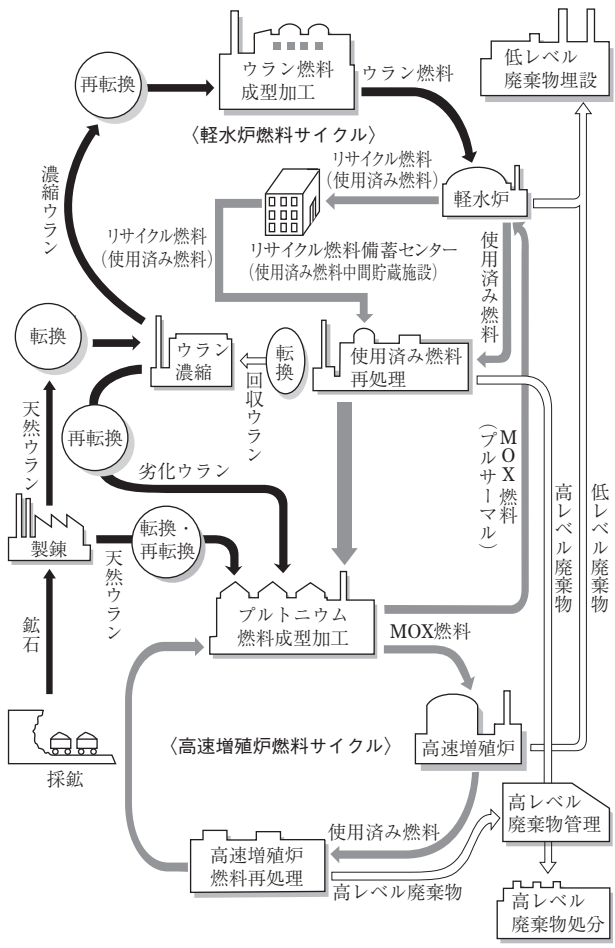
プルトニウムの利用

原子炉の燃料としてウランのことを説明してきたが、もう一つの燃料にプルトニウムがある。原子炉の中でウラン燃料を燃やすと、時間の経過とともに燃料中にプルトニウムが生まれる。軽水炉のウラン燃料には、核分裂性のウラン235のほかには非核分裂性のウラン238が90%以上も含まれており、このウラン238が中性子を吸収してプルトニウム239に変わるからだ。プルトニウム239には、ウラン235同様、中性子が容易に核分裂する性質があり、原子炉の燃料として使える潜在的な能力をもっている。

また、原子炉でウラン燃料を燃やしても、この中のウラン235をすべて燃やしつくすことはできず、使用済み燃料の中にはある程度のウラン235が残る。

プルトニウムや、この燃え残りウランを使用済み燃料の中から取り出して、新たに燃料として使えば、限りあるウラン資源の有効活用につながり、ウランの枯渇を先延ばしすることができる。

こうした考えに基づくウラン燃料の再利用体系が「核燃料サイクル」で(図3-3)、第二次大戦後に原子力の平和利用を本格化させた先進各国の多くは、当初は核燃料サイクルの完成を目指した。核燃料サイクルの中心となる技術は、使用済み燃料からプルトニウムや燃え残りウランを取り出す「再処理工程」と、プルトニウム燃料を効率よく燃やして、使った以上のプルトニウムを生



■ ウラン系
 ■ ウランとプルトニウムを含む系

3-3 核燃料サイクル

「み出すことのできる「高速増殖炉」だ。

一方、使用済み燃料からプルトニウムなどを分離することをせず、廃棄物としてそのまま処分する方式を「ワンス・スルー」と呼ぶ。

高速増殖炉を中心とした核燃料サイクルは、資源の有効活用という観点から、理念的には優れているが、現状ではワンス・スルー方式と比べてかなり経済性が悪い。

設計が成熟し、量産化されている軽水炉と比べるとは気の毒ではあるが、開発過程にある高速増殖炉は建設費用が軽水炉と比べて相当に割高だ。このほか、再処理工程でも費用がかかるため、合わせると軽水炉のワンス・スルー方式に現段階では経済性がかわらない。

こうしたことから、高速増殖炉開発に熱心な国は少なくなり、日本でも実用化を急がずに研究だけは続けることにしている。

再処理工場

沸騰水型や加圧水型などの軽水炉のウラン燃料には、燃料となるウラン235が三〜五%含まれており、残りがウラン238だ。原子炉に入れて三〜四年間燃やすと、新たな燃料に取り替えられる。

こうして原子炉から取り出された使用済み燃料の中には、燃え残りのウラン235が約1%、プルトニウム239が約1%、さらに高い放射能を帯びた核分裂生成物が3%ほど含まれている。残りはウラン238だ。プルトニウム239の比率が1%程度なのは、発電中に生まれたプルトニウム239のかなりの部分が、核分裂してウラン235と同じように燃料の役割を果たすからだ。

使用済み燃料からウラン(235と238)とプルトニウムを分離するのが再処理で、「ピュアレックス法」と呼ばれる方法が一般的だ。

原子炉から取り出され、再処理工場に運ばれた使用済み燃料はまず、三年程度は水を張った貯蔵プールで保管される。核分裂生成物が熱を出して崩壊するため、この熱を冷ますのと、放射能がある程度弱まるのを待ったためだ。

この後、再処理工程にかけられるが、まず管(燃料棒)に収まった使用済み燃料を機械(剪断装置)で三〜五センチメートルほどに細かく切り刻む。これを溶解槽に入れて、中身を硝酸で溶かし出し、管などが取り除かれる。

次に「ミキサセトラ」と呼ばれる装置で溶媒が加えられ、まず核分裂生成物を分離し、さらにプルトニウムとウランを分離する。別々に取り出されたウランとプルトニウムは精製装置で不純物が取り除かれ、硝酸成分を抜く脱硝処理の後、再利用のための燃料原料製品として、燃料加工

に回されるまで貯蔵される。

再処理工程はもともと、核兵器用のプルトニウムを分離するために開発されたもので、米国、ロシア、英国、フランスなどが実用化している。日本は、核兵器と無関係に、平和利用のみを目的に動力炉・核燃料開発事業団（現・日本原子力研究開発機構）が、フランスからの導入技術をベースに技術開発を行い、茨城県東海村に東海再処理工場を建設し、一九七七年から操業している。しかし、技術開発のためのテストプラント的な性格の施設のため処理量が少なく、日本の原子力発電所から出る使用済み燃料のごく一部しか再処理できない。

このため、電力各社は英国とフランスに再処理を委託し、これまでに約五六〇〇トンの使用済み燃料が両国に搬出され、順次、再処理が行われている。

一方、国内に本格的な商用再処理工場を作る計画も進められている。青森県六ヶ所村に日本原燃が電力業界の資金で建設している六ヶ所再処理工場は、完成すると年間八〇〇トンの再処理が可能になる。日本の原子力発電所から発生する使用済み燃料は年間約九〇〇トンだが、ほぼこの量に見合う処理能力をもつことになる。

再処理工場は、原子力施設の中でも、原子炉と並んで最も厳重な安全確保対策が求められる。再処理工場は一種の化学工場で、原子炉のように核分裂反応が起きて膨大なエネルギーを生み出しているわけではないが、扱う使用済み燃料にはきわめて放射能の高い核分裂生成物が含まれて

いるほか、プルトニウムやウランなどの核燃料物質が一定量以上、一カ所にまると核分裂の連鎖反応を起こしかねない。これが「臨界事故」と呼ばれるもので、装置類の形状や容量などが、臨界事故を起こさないよう工夫されている。

また、建物も特に丈夫に作られ、放射性物質を閉じ込める機能も、嚴重なものが求められる。日本は地震国であるため、耐震設計も必要だ。

こうしたこともあり、六ヶ所再処理工場の建設費は二兆円を超えると見積もられている。一〇万キロワット級の軽水炉一基の建設費は約四〇〇億円といわれるから、その五基分以上の資金が投じられるビッグプロジェクトだ。

高速増殖炉の役割

核燃料サイクルの輪の中で、重要な役割を果たす高速増殖炉の狙いを一言で表現すれば、プルトニウムを燃料としていかに効率よく燃やすかということに尽きる。

プルトニウムの核分裂で発生する中性子を、軽水炉のように減速させることなく高速のまま使うので、「高速」の言葉が炉の名称に冠せられる。さらに、燃料として使った以上のプルトニウムを生み出すことから、「増殖」という言葉がつけられている。

軽水炉で使われるウラン燃料中のウラン235は、一回の核分裂で平均して二・四個の中性子が出る。これに対してプルトニウム燃料（実際はプルトニウムのほかにウランが混ぜられている）のプルトニウム239は、一回の核分裂で平均三個の中性子を生み出し、中性子の発生効率がよい。発生した中性子は次のプルトニウムの核分裂に使われるだけでは余るので、プルトニウム燃料に混ぜられている燃えないウラン238が中性子を吸収してプルトニウムに変わるといった、増殖の仕組みだ。

生み出されたプルトニウムの量を、燃料として使ったプルトニウムの量で割った値を「増殖比」といい、高速増殖炉では増殖比が一を超える。

軽水炉では、中性子の速度を減速するための減速材として水（軽水）を使い、この水が炉心から熱を取りだす「冷却材」の役割も兼ねる。これに対し高速増殖炉では、中性子を高速のまま使うので、冷却材としては中性子を減速することなく、しかも熱を伝える効率のよい液体ナトリウムが使われるのが一般的だ。

高速増殖炉は、米国、英国、フランス、ドイツなどで手がけられ、日本でも旧動力炉・核燃料開発事業団（動燃。現・日本原子力研究開発機構）が、開発に取り組んできた。

新型炉の開発は、実験炉、原型炉、実証炉、商用炉と、手順を踏んで開発されるのがふつうで、動燃ではまず、実験炉の「常陽」を茨城県大洗町に建設し、その成果をもとに原型炉の「もんじ

ゆ」(電気出力二八万キロワット)を、福井県敦賀市に作った。

一九八五年に着工し、約六〇〇億円の建設費を投じた「もんじゅ」は、一九九四年四月に初臨界に達した。液体ナトリウムを冷却材に使い、増殖比一・二を目指す本格的な炉だった。

ところが、一九九五年一二月に、二次冷却系の配管からナトリウムが漏れる事故を起こし、停止した。この事故の影響は大きく、原型炉「もんじゅ」の運転実績をにらみながら、電力業界が中心になって作ることになっていた「実証炉」計画が、白紙状態に戻され、日本の高速増殖炉計画は大きく後退することになった。

動燃が改組されて生まれた核燃料サイクル開発機構(現・日本原子力研究開発機構)では、ナトリウム漏れ事故を教訓に改修計画をまとめ、国の安全審査などを受け、地元の了解を得て改造工事を行い、二〇一〇年五月から運転を再開した。しかし、同年八月に炉内事故を起こし、運転を停止している。

新型転換炉

核燃料サイクル政策の一環として、高速増殖炉に先駆けて建設された原子炉がある。

同じく動燃が手がけた「新型転換炉」(ATR: Advanced Thermal Reactor)と呼ばれる国産の原

子炉だ。

減速材として重水を、冷却材として軽水を使う炉で、原型炉の「ふげん」（電気出力一六万五〇〇〇キロワット）が、福井県敦賀市に建設され、一九七八年から運転が続けられているが、二〇〇三年に運転を終了し、現在は廃炉に向けた作業を行っている。

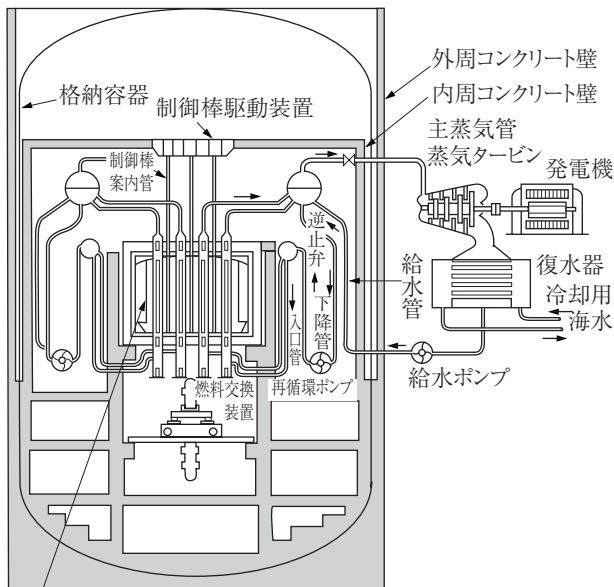
一つの圧力容器に燃料棒を収めて一炉心を形成するタイプの炉ではなく、圧力管二三四本の管にそれぞれ燃料集合体が収まっている。それぞれの管で起きる核分裂反応によって発生した熱を、管を通った水が蒸気となって運び出すという圧力管型の原子炉だ（図3-4）。

減速材の重水が入った、レンコンのように多数の穴のあいた円筒容器を「カランドリアタンク」と呼んでいる。

ふつうの軽水炉のウラン燃料より濃縮度の低い二％程度の微濃縮ウランやプルトニウムの混ざったウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料など多様な燃料を使えるのが特徴で、単一の原子炉としては世界一の量のMOX燃料燃焼実績を達成している。

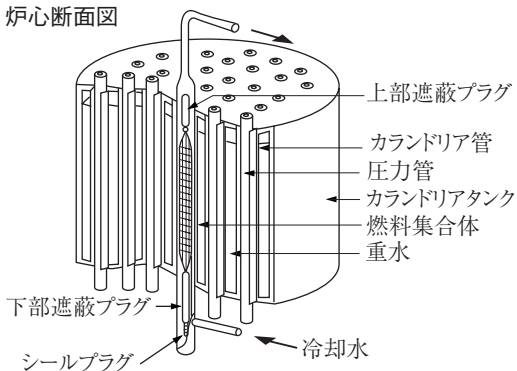
高速増殖炉のように増殖はできないものの、使った燃料に対して生まれる新燃料（プルトニウム）の比率（「転換比」と呼ばれる）が軽水炉より高く、そのことが「転換炉」という炉型の名前の由来になっている。

電源開発（株）が青森県大間町に、「ふげん」後継の実証炉を作る計画があったが、経済性で軽



カランドリアタンク

炉心断面図



3-4 新型転換炉「ふげん」の仕組み

水炉にかなわないという理由で、計画は中止された。

プルサーマル

「もんじゅ」の事故などで高速増殖炉計画が退潮の時代を迎えるなか、再処理で生まれるプルトリウムを使い道として注目されているのが、「プルサーマル」だ。

軽水炉など、核分裂で生まれる中性子を減速して使う炉を総称して「熱中性子炉」(Thermal Neutron Reactor)という。減速された中性子は「熱中性子」とも呼ばれるからだ。プルサーマルは、熱中性子炉でプルトリウムを燃やすことを意味する和製英語で、ふつう、軽水炉でウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料を燃やすことを指す。

核燃料サイクルの理想は、軽水炉の使用済み燃料から取り出したプルトリウムを高速増殖炉で燃やし、使った以上のプルトリウムを生み出して、さらに高速増殖炉で使うという形だ。限られたウラン資源を何十倍にも有効活用できることから、ウラン資源に恵まれない日本にとって「準国産エネルギー」と期待された時代があった。国が核燃料サイクルの完結に終始こだわった理由で、動燃を中心に技術開発を進めてきた。

ところが「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故で、高速増殖炉の実証炉計画は白紙状態になり、

プルトニウムが余るのは必至の情勢となった。プルトニウムは、核兵器への転用が可能な核物質であり、使途のないプルトニウムを大量に保有することは、国際的な疑惑を招きかねない。

そこで、プルトニウムを原子力発電所の軽水炉で燃やす計画が浮上したのである。

軽水炉のウラン燃料には三〇五%のウラン235が含まれており、残りは燃えないウラン238だが、プルサーマル用のMOX燃料では、ウラン235の代わりにプルトニウムを四〇九%程度混ぜる。また、軽水炉はそもそもMOX燃料を燃やすようには設計されていないため、プルサーマルを行う原子炉でも、MOX燃料は燃料全体の三分の一程度に抑えることにしている。

国と電力業界の計画では、二〇一〇年までに一六〇一八基の軽水炉でプルサーマルを実施することになった。しかし、プルトニウム利用計画の見直しなどがあり、計画は二〇〇九年六月に、二〇一五年度までに一六〇一八基の軽水炉でプルサーマルを実施することに変更された。

この結果、二〇〇九年一二月に九州電力玄海3号機、二〇一〇年三月に四国電力伊方3号機でプルサーマル用MOX燃料を使った営業運転が始まった。この後も、二〇一〇年九月に東京電力福島第一3号機、二〇一一年一月に関西電力高浜3号機でもプルサーマル発電を開始した。

海外に目を移すと、ヨーロッパを中心に、すでにかんりのプルサーマルの実績があり、特にフランスではMOX燃料集合体にして一〇〇〇体以上が燃やされている。

放射性廃棄物

ウラン鉱石の採掘を「核燃料サイクル」の最上流とすれば、最下流が「放射性廃棄物の処理・処分」ということになる。

原子力発電所をはじめとした原子力施設からは、さまざまな放射性の廃棄物が出るが、廃棄物に含まれる放射性物質の放射能の強さで「低レベル放射性廃棄物」と「高レベル放射性廃棄物」の二種類に大きく分けられる。

低レベル廃棄物は主に原子力発電所で発生し、作業に伴う衣服や床などの洗浄液、放射性の気体や液体を濾したフィルターなど多様だ。

各地の原子力発電所で発生した低レベル廃棄物は、セメントやアスファルトなどで固められ、鋼鉄製のドラム缶に詰められる。これが、青森県六ヶ所村の「低レベル放射性廃棄物埋設センター」に運ばれて、地下一〇メートル程度の比較的浅い地中に埋められる。この埋設センターは電力各社などが出資して設立した「日本原燃株式会社」が設置、運用しており、当面、二〇〇リットルドラム缶で一〇〇万本分の収容能力がある。将来は増設することも考えられている。

低レベル廃棄物に比べて、処分がやっかいなのは高レベル廃棄物で、原子力発電を行っている各国にとって共通の悩みになっている。

高レベル廃棄物は、再処理工場で原子力発電所の使用済み燃料からプルトニウムや燃え残りのウランを取り出した後に残る、きわめて放射性の強い液体で、その危険性の高さから、人間の生活圏から嚴重に隔離しておかなければならない。

液体のままでは扱いにくいいため、各国ともガラスに溶かし込んでステンレスの容器に密閉する方法をとっている。これを「ガラス固化体」と呼ぶ。

ガラス固化体は放射性物質の崩壊熱で高温になるため、地上で三〇〇五〇年間冷やした後、数百メートルもの深い地下に埋設処分（地層処分とも呼ばれる）することになっている国が多い。しかし、その用地選択は、地域住民の反対などで多くの国で難航しており、実際に埋設処分をはじめた国はまだない。

日本の電力会社は、原子力発電所の使用済み燃料の再処理を英国とフランスに委託してきたため、この両国で一萬本を超えるガラス固化体が生まれており、順次、専用船を使って日本への返還輸送が行われている。この返還ガラス固化体は、青森県六ヶ所村の日本原燃の「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター」で一時保管されている。

問題は、これらを地層深くに埋める埋設処分をいかに行うかだ。安全な埋設処分のための研究や技術開発は核燃料サイクル開発機構が行っており、実際に埋設処分地を選んだり処分場を建設したりする事業主体として、二〇〇〇年一〇月に「原子力発電環境整備機構」が設立された。二

○二〇年代中の処分場の建設開始を目指しており、処分に必要な資金は電力会社などからの拠出金で賄われることになっている。