

アクチノイドの燃焼：補足的な廃棄物管理オプション

アクチノイドおよび核分裂生成物の核種分離・消滅処理は、廃棄物管理戦略におけるさらに新たな手段として役立つと考えられる。

世界の原子力発電所の設備容量はほぼ3億4千万kWに達しており、これから発生する使用済み燃料も年間で重金属換算で9000トンに達している。使用済み燃料1トンあたりで約10キログラムの超ウラン（TRU）アクチノイド元素を含んでおり、このうちの0.8キログラムがマイナー・アクチノイドである。また1トンあたり30キログラムの核分裂生成物を含んでいる。このうち半減期が30年を超える長半減期核種は4キログラムである。

使用済み燃料をどうするかは、その国の核燃料サイクル政策にかかっている。使用済み燃料の再処理を行いプルトニウムを回収するとともに、その残りについてはガラス固化し廃棄物を処分するという政策をとっている国は、原子力発電所の設備容量でみると、世界では半分に達している。こうした国の代表例は、フランス、イギリス、日本、ドイツ、ベルギー、スイス、独立国家共同体（旧ソ連）、旧ソ連の同盟国などである。これまでに大型の再処理工場が建設されてきており、フランスとイギリスで稼働中のほか、現在、日本とロシアでも建設が進んでいる。

原子力発電設備容量で世界の半分に相当するこれ以外の国では、使用済み燃料を廃棄物として取り扱っている。いわゆる「ワンス・スルー

・サイクル」は、米国やカナダ、スウェーデン、スペインをはじめとした国々で採り入れられている。工学施設に長期にわたって使用済み燃料を貯蔵することが考えられている。貯蔵のあと、適切な地層中に処分されることになっている。

TRUアクチノイドは、重金属換算で年間約90トンの割合で増えつづけている。このうち約45トンが使用済み燃料中に収蔵されて残り、約45トンが利用できることになる。さらに、このうちリサイクルされるプルトニウムは92%で、残りの8%はネプツニウムやアメリシウム、キュリウムなどのマイナー・アクチノイド元素であり、廃棄物としてガラス固化される。

こうしたガラス固化廃棄物は、地下貯蔵所での最終処分に備え、工学施設に貯蔵される。マイナー・アクチノイドを含むガラス固化された高レベル廃棄物（HLW）、あるいはプルトニウムやマイナー・アクチノイドを含む使用済み燃料の処分では、少なくとも最初の1000年間については、環境面において類似点が相当ある。地下貯蔵所の技術的寿命である10000年を超えると、プルトニウムの分離が行われていない使用済み燃料の環境に対する危険が顕在化してくる。

L.H.ベーツレ¹⁾

核種分離・消滅処理への関心

「TRUアクチノイドと長半減期の核分裂生成物に関連した長期にわたった危険を避けるこ

1) ベーツレ博士は、ベルギーのモルにある原子力研究センター（SCK/CEN）の会長および統括管理の顧問。

とができるか」という疑問が、すでに20年前に提起されていた。この問題を研究するための重要な研究開発(R&D)プログラムが欧州共同体(EC)と米国で進められた。しかし、こうした努力からも限られた成果しか得られなかった。そうこうするうち、すべてのTRUアクチノイドを除去することは不可能であるばかりか、テクネチウム99やセシウム135、ヨウ素129といったある種の核分裂生成物が、何100万年という将来にわたって、人の被曝線量を評価するうえで同じように重要であることが明らかになった。

しかし、核種分離・消滅処理(P&T)に対して、新たに関心が高まってきている。こうした背景には、公衆がすんなりと受け入れることができるような適切な地層を見つけるうえで、世界各国が困難に直面したという大きな原因がある。

日本の原子力委員会は1988年、非常に重要で広汎な研究開発プログラムに着手した(次に掲載の記事を参照)。これは、原子力発電所の稼働から生じる長期にわたった危険を除去するとともに、資源の最適な利用をめざしたものである。こうした先導的な動きが、フランスをはじめとした他の原子力先進国の関心を喚起することになり、現在使用されているピューレックス法を改良あるいは採用するための研究プログラムの制定へと向かわせた。

この目的は、高レベル廃棄物中に含まれているプルトニウム含有量を減らすと同時に、新規あるいは追加的な抽出工程を備えつけることによって、マイナー・アクチノイドを除去することにあった。

P&T戦略は、再処理を組み込んだ燃料サイクル政策によってのみ実施することができる。その基本的なステップは、ウラン、プルトニウムといったすべての重要なアクチノイドがリサイクルされ、またその次の消滅処理段階の準備を行うために、途中でマイナー・アクチノイドと長半減期の核分裂生成物が分離されるという

ものである。

一般戦略と概要

廃棄物管理の代替オプションとしてP&Tを導入するという戦略は、放射線学的なメリットをベースにしており、一種の冒険的事業のようなものと考えられている。消滅処理によって除去する価値のあるアクチノイドや長半減期の核分裂生成物をどうやって選びだすかは、危険係数や除染係数、地層閉じ込めの効果などの、いくつかの技術的要因によって決まる。²⁾

約600年以上の半減期を持つ長半減期の核分裂生成物は、ストロンチウム90やセシウム137が崩壊するときの危険指数をベースにすると、アクチノイドよりはるかに毒性が少ない。(危険係数によるアクチノイドと核分裂生成物の順位については表参照のこと)

再処理工程で、マイナー・アクチノイドと長半減期の核分裂生成物を分離するには2つの方法がある。1つは、単一の溶液、たとえば高レベル廃液の中に重要な核種を新しいルートで送り込み、これを分離プロセス用として使用するために、現行のプロセスを変更することであり、もう1つの方法は、在来のピューレックス法のプロセスを、第二世代の再処理工場ですべてのマイナー・アクチノイドと長半減期の核分裂生成物用に拡張することである。

これらの計画のうちのどちらかを実施するより前に、まず現在稼働中の工場内で、高レベル廃棄物からのプルトニウムの分離収量を改善することの方が賢明であると考えられる。ある核種を単一の製品あるいは廃棄物の流れの中に新しいルートで送り込むことは、ネプツニウムに関して特に重要である。というのもネプツニウムは、多くの異なった工程で生じるからである。

テクネチウムを回収するステップを設けるこ

2) この技術的な詳細についての問い合わせは著者まで。

とはP&T戦略にとって重要なだけでなく、ウラン・プルトニウム汚染を削減させる意味も持っている。

アクチノイド分離用の抽出剤がいくつかあるが、そのうちこれまでに最も有望なものとして知られているのはCMPOで、いわゆるTRUEX法の中でTBPとともに使われる。こうした分離技術あるいはこれに類似した分離技術は、特別な作業が必要になるが、もし十分な資金の提供があれば、ピューレックス法と互換性を持った信頼できる方法になると期待できる。この分離ステップにより、単一の元素あるいは一群の元素をつくることができ、これらは消滅処理に向けられるもとの物質になるだけでなく、将来における戦略物質となることが考えられる。この代表例は前者がネプツニウム、アメリカシウム、キュリウムであり、後者はテクネチウムと白金族元素である。

核分裂生成物の序列が、地質学的な制限によって変わることはない。テクネチウム99とヨウ素129は、岩石圏での移動度から、P&Tオプションの中で検証されるべき核分裂生成物の上位にリストされている。

結論としてP&T戦略は、地層処分の場合と同じ程度の放射線防護を人間社会に対して行うべきであると仮定できるかもしれない。核種分離・消滅処理されるべき核種をどう選定するかは、またこれらの核種がどの程度除去される必要があるかは、人類の尺度で理解できなくなる年月に達するにつれて地層処分のメリットがどの程度減少するかということと、再処理とP&Tの改良がもたらす廃棄物管理費の増加とのトレードオフ関係によって決まることになる。

アクチノイドのP&Tは、長期的な廃棄物管理オプションに取って代わるものではない。むしろ、非常に長期にわたって燃料サイクルがもたらす放射線影響をさらに減少することが可能な、地層処分に対する補足的な技術である。

マイナーアクチノイドのリサイクル

ラ・アーグやセラフィールド、六ヶ所村といった大型再処理工場で分離が実施されることになると、合計で約1700キログラムのネプツニウム237と1500キログラムのアメリカシウム(数キログラムのキュリウムを含む)が毎年得られることになる。これは、世界全体のほぼ44%に相当する。

使用される消滅方法にもよるが、マイナー・アクチノイドは、この目的に特別に建設された特殊な機器を備えた燃料製造施設で、酸化物や金属にかえられることになる。均質か非均質かというリサイクルのタイプにもよるが、専用の製造設備は混合酸化物(MOX)で年間68~85トンの規模にある必要がある。こうした施設は、再処理工場での作業と密接に関係してくる。

金属燃料の製造は乾式冶金精錬プロセスをベースにしているが、この開発は現在、米国と日本でベンチスケール段階にある。米国をはじめとした国々から出てくるマイナー・アクチノイドを処理するためには、合計で80tHM(重金属トン)の乾式再処理燃料製造設備が必要になる。

しかし、こうした施設は従来の再処理作業とは関係のないものになると考えられる。これらは、各サイトの原子炉の出力に左右された専用設備とともに、アクチノイドを燃焼するための高速炉コンビナートの一部として絶対必要なものになると考えられる。

マイナー・アクチノイドの変換

既存の原子力発電所でマイナー・アクチノイドを変換させることは原則的に可能である。しかし変換のスピードは遅く、また本質的により重い核種を生成する。さらに、非均質なリサイクルが採用される場合、使用済み燃料物質を繰り返し再利用することは難しくなる。特別に設計された燃料要素の中にマイナー・アクチノイドを非均質にリサイクルすることは、まだ十分

高レベル廃棄物中のアクチノイド

	ICRP-61	1/tHM
1	アメリカシウム-241	$3.3-12.3 \times 10^{13}$
2	アメリカシウム-243	$1.8-2 \times 10^{12}$
3 (1%)	プルトニウム-240	$7.6-8 \times 10^{11}$
4 (1%)	プルトニウム-239	$3.2-3.5 \times 10^{11}$
5	ネプツニウム-237	$4.7-6.4 \times 10^{10}$
6	キュリウム-246	$2.4-2.7 \times 10^{10}$

核分裂生成物

	核種	1/tHM
1	ストロンチウム-90	$3.9 \times 10^{12}-2.13 \times 10^4$
2	セシウム-137	$3.8 \times 10^{12}-3.66 \times 10^4$
3	テクネチウム-99	1.6×10^9
4	スズ-126	6.6×10^8
5	ヨウ素-129	5.8×10^8
6	セシウム-135	1.3×10^8
7	ジルコニウム-93	9.4×10^7

注：序列は国際放射線防護委員会 (ICRP) のパブリケーション 61 勧告の基準に基づいている。同基準は放射性核種が含まれているものを飲料水として容認できる限度に希釈するのに必要とされる飲料水の容量をベースとしている。各核種の危険の序列は、200 年から 1000 年間にわたって冷却された HLW 中に生じると考えられる危険である。

放射線の危険をもとにした
長半減期核分裂生成物とア
クチノイドの序列

に開発されているわけではない。アメリカシウムの変換は、ある特定の条件下では可能である。

マイナー・アクチノイドを最も効果的に変換できるのは、こうしたアクチノイドを核分裂生成物に変換できる高速中性子炉である。ここで注意しなくてはならない重要な点は、高速炉のマイナー・アクチノイドの大量のインベントリである。これは、ほぼ全量の年間生成量の“燃焼炉”への移転を可能にしている。しかし、年間の正味処理量は 5% 程度に限られる。

軽水炉で生成したプルトニウムやマイナー・アクチノイドを燃焼させるための特別設計の原子炉の研究が進んでいる。米国で開発が進んでいる一体型高速炉 (IFR) という考え方と、日本で研究が行われたマイナー・アクチノイド燃焼炉 (MABR) が 2 つの新しい概念であり、それぞれアクチノイドの専焼をめざしている。

取り組み手段と代替法

結論として P&T は、アクチノイドや長半減期の核分裂生成物がもたらす放射線の影響を減少させるための全体的な廃棄物管理戦略を補完するものになってきている。しかし、地層処分

に対する完全な代替法になるものではない。

改良が施された再処理は、高レベル廃棄物に含まれるプルトニウムを大幅に減らすことができる。アメリカシウムとキュリウムの核種分離技術の中には有望なものがあり、また在来の再処理でネプツニウムを別ルートにすることも有益である。

すべてのマイナー・アクチノイドと長半減期の核分裂生成物を含む広い範囲にわたった核種分離は、目標にはまだ遠く及んでおらず、一層の研究開発努力が要求される。

P&T 戦略全体の中で最も重要なことと言えば、分離された核種を燃料ピンや照射ターゲットの中に入れて消滅処理することである。広い範囲にわたった消滅処理技術の枠内で技術的、経済的な分析を加えることが一層必要になる。

消滅処理は時間のかかる方法であり、大きい中性子束と高いエネルギーの中性子束、またはそのどちらかを持った原子炉が必要になる。こうした中性子束は高中性子束炉や高速炉で得られる。IFR や MABR は、まさにこうした目的に適った原子炉であり、炉の中の消滅処理の容量は比較的大きい。それにもかかわらず、核種を破壊するのにかかる時間は、20 年から 30 年というように非常に長い。これは、冷却や燃料サイクルの時間が関係している。加速器を使用した炉は、ほぼ 1 桁大きい中性子束を持つ照射施設になり、照射時間を大幅に短縮することができる。

P&T 法の経済性がどうかという点は非常に綿密な分析が必要になる。改良再処理、化学的な核種分離、ターゲットの製造および燃料開発、高速炉開発、マイナー・アクチノイド燃料のリサイクル——では核燃料サイクル施設の建設・操業が必要になることから、この点が重要になる。さらに、工業規模で利用できる成熟した核種分離・消滅処理技術の開発が必要になる。

こうした努力は、地層貯蔵に対するパブリック・アクセプタンス (PA) に関連した問題や、

地層中の非常に長い半減期の核種の移動による遅発的な障害との比較が行われる必要がある。地層処分の費用を減らす努力は、P&T を支持する経済的な推進力に於ては不足である。また、

人体に対する放射線被曝を最小にするための手段は、原子力発電による長期にわたった放射線影響を減らすための推進力となるべきである。

