

放射性廃棄物の処分

Disposal of Radioactive Waste

田 中 知 (たなか さとる)

東京大学教授 大学院工学系研究科システム量子工学専攻

1. 原子力発電の魅力と核燃料サイクル

日本におけるエネルギー消費量の約8割は輸入に依存しており、特にエネルギー消費量の約6割を占める石油は99%以上を輸入しているのが現状である。化石資源への過度の依存は、エネルギーセキュリティという国家の安全保障上の問題に加えて、酸性雨や地球温暖化などにみられる地球規模での環境問題の観点からも問題がある。核エネルギーは核分裂を利用するものであるが、ウラン235原子核一つの核分裂で発生するエネルギーは約200 MeV ($1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{ Joule}$) である。一方、メタン1分子が燃焼する際に発生するエネルギーは約10 eV であるのでこれらの間には数桁の違いがある。逆に述べると、核エネルギーでは、単位エネルギー発生当たりに必要な燃料の量が極めて少ない(石油火力発電の46 000分の1以下、石炭火力の73 000分の1以下)ことが大きな長所である。しかし、放射線や核に対する不安のために原子力エネルギーの社会的受入れについてはやや逆風的な面があることは事実である。しかし、それは地球環境問題や将来のエネルギー問題を真剣にかつ客観的に考慮した結果でないことがややもすればある。石炭、石油、LNG という化石燃料においては炭酸ガスによる地球温暖化を深刻に考えるべきである。図-1はプラント寿命30年間に発生する全CO₂量をその間の発電電力量で割ったものである。この図より地球温暖化防止と言う観点よりの原子力の優位さは明白である。一方、太陽、風力、地熱などの再生可能エネルギーはクリーンなエネルギーとしては魅力的であるが、必要な電力の中で実際にこれらによりどこまで供給可能かについて客観的な評価を考えると慎重にならざるを得ない。したがっ

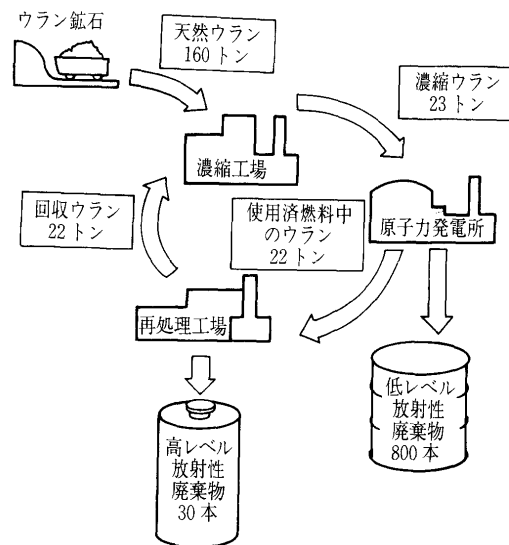


図-2 100万kWの原子力発電所を1年間運転した場合に核燃料サイクルから発生する廃棄物量
(「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について」(原子力委員会 平成10年5月))

て、適正規模での原子力発電の利用は、我が国におけるエネルギー源の多様化と地球環境との調和という観点から必須である。

原子力発電所においては核燃料を燃焼(核分裂)させ、熱エネルギーを介して電気エネルギーを発生する。原子力発電所以外に図-2に示すようなウラン濃縮工場、燃料加工工場、再処理工場が核燃料サイクルを構成する。電気出力100万kW(熱出力約300万kW)の原子炉(軽水炉)中には約100トンの核燃料が装荷されている。1年に1度原子炉の定期検査があり、そのとき同時にウラン235が約3%に濃縮された新燃料約25トンが装荷される。ほぼ同量の燃料(使用済み燃料)(ウラン235の濃縮度は1%程度に低下)が同時に取り出される。この使用済み燃料中には約0.2トンのプルトニウムが含まれている。また、核分裂の破片およびその放射性崩壊物である核分裂生成物と、ウランの中性子吸収・崩壊によって生じた超ウラン元素が含まれている。再処理工場ではこの使用済み燃料よりウランとプルトニウムが取り出され再利用に供される。

25トンの3%濃縮ウランを作るのに必要な天然ウラン(ウラン235の割合は0.72%)の量は約160トンである。図に示されていないがウラン濃縮の後、燃料加工工場にて酸化ウランのペレットを作り、これを燃料ビンに装荷

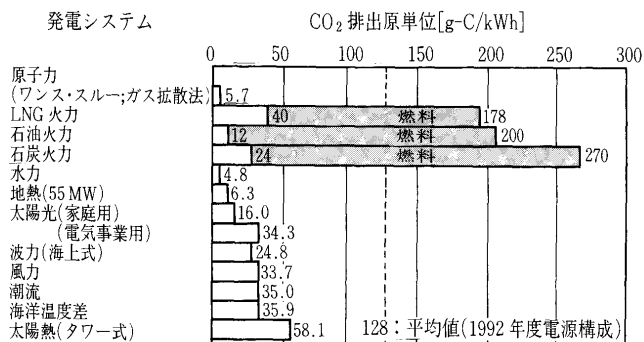


図-1 発電システムの温暖化影響

(内山洋司著「私たちのエネルギー」培風館)

総 説

した後、束ねて燃料集合体を作成する。

2. 放射性廃棄物の発生

放射性廃棄物は原子力発電所を含む燃料サイクルの各行程で発生する。そのうち、主なものは原子力発電所で主に発生する低レベル放射性廃棄物と再処理工場にて発生する高レベル放射性廃棄物である。放射性廃棄物の分類として、極低レベル、低レベル、中レベル、高レベル等に放射能レベルで区分けするのも一つではあるが、明確な基準として世界的に認められたものはない。それよりも処分の観点で分類されることが多く、日本でもそのような考え方に近い。

原子力発電所等よりの低レベル放射性廃棄物は、放射線管理区域で使用した衣服の洗濯廃液や、除染に使用した器材、放射化の程度の低い機器の交換器などである。これらは濃縮減容、焼却、などの処理を受けた後固化（セメント固化、アスファルト固化）されサイトにて一時保管の後適切な処分が行われる。これらの低レベル放射性廃棄物の起源は物理的に見れば核分裂生成物と、中性子との核反応による放射化生成物である。核分裂生成物は燃料ペレット中に、一部はペレットより移行し燃料ピン内のすき間に存在する。もし燃料被覆管にピンホールがあって、核分裂生成物が冷却水へ移行したとき、冷却水の漏洩などに伴ってタービン室などに低いレベルの汚染を引き起こす可能性がある。また、燃料加工中に燃料被覆管の外部表面が燃料で汚染されているとすると、それらが原子炉中で核分裂し核分裂生成物が冷却水中に移行することになる。また、放射化した腐食生成物が冷却水中に移行し、冷却水の漏洩等を通して、原子炉施設の低レベル汚染につながることもある。さらに、中性子によって放射化された機器や、放射化生成物や腐食生成物が冷却水中を移行後付着した機器の取替えによっても低レベルの放射性廃棄物が発生する。

高レベル放射性廃棄物とは、使用済み燃料の再処理工場において、燃料として再利用されるウランとプルトニウムを分離・回収した後に残される極めて放射能レベルの高い廃液に、同工程から発生する処理廃液の一部を加えた廃液および固化体を指す。高レベル放射性廃棄物には、(1)気体を除く核分裂生成物の大部分、(2)未回収のウランとプルトニウム、(3)その他の超ウラン元素の大部分、(4)鉄やニッケル、コバルトなど材料の腐食に起因するもの、(5)ナトリウムやカドリニウム、ホウ素など溶媒やプロセス添加物に起因するものなどが含まれる。ちなみに、使用済み燃料を再処理することなく直接処分することを検討しているアメリカ、スウェーデン、カナダなどにおいては、使用済み燃料自体を高レベル放射性廃棄物と定義している。

このほかにもいくつかの種類の放射性廃棄物が発生する。一つは、 α 核種の放射能濃度が区分目安値（約1 GBq/トン）よりも高く浅地中処分以外の地下埋設処分が適切と考えられている TRU 廃棄物であり、再処理工場や MOX（ウラン、プルトニウム混合酸化物）加工工

場より発生される。TRU 廃棄物処分方策については現在、電力会社、動力炉・核燃料開発事業団により検討が行われているが、低レベル放射性廃棄物より深い地下での処分が検討されている。また、濃縮・転換・成形加工工程などから発生するウラン廃棄物がある。これらの処分方法については現在予備的な検討が進んでいる段階であるが、天然に存在するウランおよびその崩壊により生じる娘核種との関係での検討が重要と考えられる。また、いわゆる低いレベルの放射性廃棄物には原子力発電所より発生するもの以外に様々なものが含まれる。RI を利用している事業所（医療、線源利用等）からは RI が付着した試験管、注射器、ペーパータオルや使用済みの密封線源が廃棄物（RI 廃棄物）として発生している。また、研究機関、大学、民間企業等においては実験で使用した手袋やペーパータオル、廃液等が廃棄物（研究所等廃棄物）として発生する。これらの、RI・研究所等廃棄物の処理および処分についての基本的考え方が原子力委員会において検討されている。廃棄物を放射能濃度等に応じて区分を行い、各区分に応じた適切な処分施設を設置して処分施設（人工バリア）や周辺土壌等（天然バリア）により放射性物質等の生活環境への移行を抑制することが考えられる。すなわち、低レベル放射性廃棄物ではコンクリートピットによる方式、極低レベル放射性廃棄物の場合は素掘り処分方式等である。

3. 放射性廃棄物の処理および処分

これらの様々な放射性廃棄物について処理および処分に向けた検討の現況は様々である。原子力発電所より発生する低レベル放射性廃棄物のうちコンクリート等に均質に固化されたものについて青森県六ヶ所村での浅地埋設処分が数年前より実施されており、既にドラム缶約11万本の処分が行われた。そこでの処分方法は、地下数 m のところにコンクリートピットを作成し、なかにドラム缶を積み、その間にセメント系充填材を流し込むものである。さらにコンクリートピットの上および側面にはベントナイト混合土を巻き、さらにその上に厚さ約4 m 以上の覆土で覆う。原子力発電所等よりは均質低レベル放射性廃棄物以外に雑固体や金属類の低レベル放射性廃棄物が考えられる。これらについては基本的には同様な処分方法で可能であることが原子力安全委員会での検討で示されている。低レベル放射性廃棄物の範囲に入るものの、原子炉の解体時に発生する炉内構造物がある。これらは、ガンマ、ベータ放射能濃度が現行の政令濃度上限値を超え、現在六ヶ所村にて行われている方式のままでは適切でなく、さらに、天然バリア性能を高めた方式が原子力委員会にて検討されている。一方原子力発電所等より発生する低レベル放射性廃棄物には放射能濃度が極めて低いもの（コンクリート、金属等）があり、これについてはトレンチに埋設することが合理的と考えられる。さらに放射能濃度の低い廃棄物については放射線防護の観点から特別な配慮を必要としない放射性物質の濃度（クリアレンスレベル）を定め合理的な対応を考える

ことが国際的に検討されている。我が国においても、原子力安全委員会において、当面、原子炉施設から発生する固体状の廃棄物を対象として、クリアレンスレベルの設定について検討が行われている。

放射性廃棄物の発生量は図—2に示すとおりで、100万kWの原子力発電所を1年間運転した場合、原子力発電所より発生する低レベル放射性廃棄物は200lのドラム缶約800本、高レベル放射性廃棄物は100lのキャニスターに固化されたガラス固化体で約30本である。1996年11月現在、我が国での51基の原子力発電所が稼動し、総発電容量は4 271.2万kWに達している。これは、年間約1 300体のガラス固化体が発生する計算となる。これらを他の廃棄物と比べることは興味深い。日本人一人当たりが1年間に発生する廃棄物の量は平成2年度の統計によると、放射性廃棄物は約0.06 kg（内、低レベル放射性廃棄物は0.058 kg、高レベル放射性廃棄物は0.0029 kg）であるのに対して一般廃棄物と産業廃棄物の合計は約3 900 kg（内訳は一般410 kg、し尿294 kg、汚泥1 392 kg、その他1 813 kg）である。重量のみで比較することには注意を要するものの、放射性廃棄物が量的に小さいことより適切な処分方法により安全に対応することが難しくないことを示している。

我が国においては、高レベル放射性廃棄物は動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場でのみ発生し、1995年3月現在、液体約552 m³が同施設に貯蔵されている。また、青森県六ヶ所村に建設中の商業用再処理施設（日本原燃㈱）でも、2005年ころ以降には高レベル放射性廃棄物が発生することとなる。電気事業者は、フランスのCOGEMA社およびイギリスのBNFL社に使用済み燃料の再処理を委託しており、再処理後の高レベル放射性廃棄物はガラス固化され、我が国に返還されることとなっている。1995年4月に150lのガラス固化体28体がフランスより返還され（第1回）、現在六ヶ所村の日本原燃㈱廃棄物管理施設内に一時貯蔵されている。

高レベル放射性廃棄物はあとで説明があるように深地下に処分することが考えられている。これは放射性廃棄物のなかで今後の最大の研究開発対象であるとともに、そこでは深地下を利用するという点でも土木工学的、地盤工学的な課題がある。したがって本小特集では以下、特に高レベル放射性廃棄物に焦点をあてて述べることにする。

4. 高レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方と地盤工学的課題

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種の主なものは、ストロンチウム-90（半減期28.8年）、セシウム-137（半減期30.2年）などの核分裂生成物、ならびにネプツニウム-237（半減期214万年）やアメリシウム-241（半減期433年）といった超ウラン元素である。核分裂生成物は放射能レベルが高く量も多いが、半減期が比較的短いものが多い。一方、超ウラン元素の多くは放射能レベルは低い半減期が非常に長い。このため、高

レベル放射性廃棄物自体が有する放射能レベルは、原子炉から取り出した後、数百年間はストロンチウム-90やセシウム-137などの核分裂生成物によって支配されているが、その後時間の経過とともに大幅に減少し、ジルコニウム-93やテクネチウム-99などの長半減期の核分裂生成物とともにネプツニウム-237やアメリシウム-241などの超ウラン元素の寄与が大きくなる。

それでは、このように発生した高レベル放射性廃棄物をなぜ処分するのであろうか。また、その方法はなぜ地層処分なのであろうか。「分散」か「閉込め」かの選択を考えたとき、分散が、環境中に廃棄物を計画的に放出し空気および水によって希釈させて安全上十分低いレベルにする操作であることから、放射性廃棄物の量のごく限られている場合にのみ可能となることがわかる。一方、閉込めは、放射性廃棄物が環境中に放出されないように、廃棄物の周囲に障壁（バリア）を設置することである。高レベル放射性廃棄物については、原則として分散ではなく閉込めでなくてはならない。「永久関与」か「パッシブ・システム」かを考える。永久関与は、廃棄物の長期的安全性を確保するために、永久的に人間の関与を必要とすることを意味する。つまり、無期限の長期貯蔵がその例として考えられるわけであるが、この場合、制度的な管理が無期限に実施できると考えるのは難しく、その限度は200～300年以内とするのが今日の世界的な合意であると考えられている。一方、このような制度的管理に依存しない安全対策をパッシブ・システムという。数万年以上の超長期の安全性が求められる高レベル放射性廃棄物には、人間による直接的な管理が保証されない以上、パッシブ・システムでなければならない。これらが、「貯蔵」ではなく「処分」することの理由である。「処分」とは、もはや人間が関与・管理しない形態をいい、人間の関与を前提とする「管理」とは異なった概念である。

高レベル放射性廃棄物の処分方法については、宇宙処分、氷床処分、海洋底下処分、地層処分などが、安全性、実現可能性、不測の事態への対応性などの観点から検討されてきた。その結果、当初地下の鉱物資源が非常に長い時間にわたって不動化されていることに着目して提案された地層処分が、その後の多くの研究を通じて、最も適切な処分方法であるとの認識に至り、今日それぞれの国情に適した地層処分の研究開発が進められている。

地層処分が、今日、高レベル放射性廃棄物対策として国際的にも有望視される理由は以下の5点である。

(1) 長期的に見て、人間の継続した関与なしでも安全が確保できる処分方法であり、処分後の監視やモニタリングで継続する必要がない。

(2) 高レベル放射性廃棄物が処分場にとどまる限り、人間とその生活環境が影響を受けることはなく、また地下深部の処分場への人間の侵入は起こり難いことから安全性が高い。さらに放射性核種が処分場から移動する可能性については、地下深部における放射性核種の挙動などに関する科学的理解に基づいて長期的な予測ができる

総 説

見通しがある。

(3) 世界各国に分布する様々な地質環境に対応して具体化できる柔軟性を備えている。また、高レベル放射性廃棄物を発生する国々が、その自国内において処分することができる可能性が大きい。

(4) 処分場の建設に際し、鉱業や土木工学の分野でこれまでに蓄積されてきている経験を利用することができる。このため技術的実現可能性を見込むことができる。

(5) 高レベル放射性廃棄物を処分した後それを取り出すことは原則的には考慮されないが、何らかの理由により取り出すことが要請された場合、地層処分では再取出しは不可能ではない。

地層処分において重要な点は、廃棄物中に含まれる放射性核種が地下水とともに移動し、その結果、人間の生活圏に到達した場合、放射線による人間への影響が無視し得るほど小さいことを科学的に明らかにすることである。そして、そのために(1)廃棄物が地下水と接触する可能性を十分小さくする、(2)もし廃棄物が地下水と接触したとしても、廃棄物中から地下水中へ放射性核種が溶け出しにくくするとともに、たとえ溶け出したとしても処分場施設外へ移動しにくくする、(3)もし放射性核種が処分場施設外に移動したとしても、人間生活圏に至り有意な影響を及ぼさないようにする、という多重バリアシステムの考えが採用されることとなる。

高レベル放射性廃棄物は、ガラス質（一般にはホウケイ酸ガラス）に熔融され、ステンレスなどの金属容器（キャニスター）に封入されて固化された状態（これをガラス固化体という）で30年から50年程度冷却のために貯蔵される。その後、オーバーパックと呼ばれる容器に封入して安定な地層中の深部地下（数百m）に埋設し、周囲の地層との間の空間には粘土質の充填物（緩衝材）を詰めることが現在最も有効な処分方法であるとされる。多重バリアシステムは、地下水による放射性核種の溶出・移動を効果的に抑制するために人工的に設けられたバリア（人工バリアといい、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材などから構成される）と、地下水の浄化、分散、希釈などの機能を元来備えた地層（天然バリアという）を組み合わせ安全確保を図るものである。この多重バリアシステムが超長期間にわたって有効に機能し、放射性核種の人間生活圏への影響が無視できることを科学的に示すためには、多重バリアシステム全体についての長期的安全評価が重要な課題となる。この評価においては、熱や地下水の流れ方、さらには地層中で起こる様々な化学反応や物質輸送などが相互に影響を及ぼし合う複雑な系を対象とするため、多重バリアシステムにおける個々の諸機能に影響する因子、現象などを科学的に解明し、その有効性を定量的に明らかにしなければならない。ガラスの溶解、オーバーパック・キャニスターの腐食、緩衝材の吸着特性など、いくつかの主要な現象につ

いては、現在までの研究成果により基本的な挙動が明らかになりつつある。

高レベル放射性廃棄物処分の概念的検討が進むなかで土木工学的、地盤工学的な課題も整理され、次のようなものが挙げられている。

(1) 処分場の設計・建設・操業などに関しては、種々の要素技術に基づいた総合的な解析技術、調査技術、施工技術などの一層の向上が重要であり、坑道などの空洞の長期安定性についても検討を要する。硬岩・軟岩ともに我が国の地質環境に柔軟に対応できる処分施設の設計要件を提示し、空洞安定性や熱的安定性などに関する解析手法を開発していく必要がある。また、立坑や処分坑道の建設技術の検討や、処分坑道への固化体設置技術などの操業システムに関する要素技術の検討、閉鎖技術に関して材料開発や設計手法と施工技術の開発、設計要件の検討などが不可欠となる。さらには、設計・建設・操業・閉鎖などの全体スケジュール、モニタリング技術、所要の資材の調達、輸送などを含む総合的な経済的合理性の評価も重要である。

(2) 人工バリアに関して、オーバーパックについては、炭素鋼はもちろんその他の材料についても長期的耐久性研究、溶接の健全性といった製作・施工技術の開発と品質管理手法の検討、遮蔽性に関する解析手法の開発が重要となる。緩衝材については、粘土材料を中心に物性評価や設計要件、施工技術や品質管理が重要であるとともに、粘土材料以外の新しい材料の可能性調査と施工法検討が求められている。そして、人工バリア全体としての構造力学的安定性や耐震安定性評価、吸着性能や非透水性評価が重要である。

(3) 地質環境特性に関しては、表層から地下深部までの岩石の性質や分布、連続性および断層破碎帯の特性といった地質構造、地下水の涵養量、岩盤の透水性、動水勾配分布といった地下水流動、pHや酸化還元電位といった地下水化学、深部岩盤の力学特性、深部岩盤中での物質移動に関する調査・計測技術や機器の開発・改良を進め、信頼性の高い情報を収集することが重要である。また、坑道掘削や人工物の構築に伴うこれらの特性への影響を評価する必要がある。

(4) 地質環境の長期安定性に関しては、火成活動、地震活動、断層活動、隆起・侵食、気候変動、海面変動などの自然現象について、我が国における特徴に留意しつつ、これらの活動の履歴を調査するとともに、それらが多重バリアシステムに与える影響の可能性を検討する必要がある。

(5) そのほか、性能評価シナリオの検討、ニアフィールド性能評価モデルの信頼性向上、データベースの整備・充実、ファーフールドや人間環境までも含めた処分システムの性能評価解析機能の充実、ナチュラルアナログ研究の適用などを検討することも求められている。

(原稿受理 1998.6.22)