

核燃料サイクルとバックエンドの基礎

稻垣八穂広^{*1}

原子力発電を行うための一連のプロセス全体を核燃料サイクルと呼ぶが、その各プロセスからは様々な種類の放射性廃棄物が発生する。それらの廃棄物は放射能レベルや物理化学的特性等によっていくつかの種類に分類され、それぞれの特性に応じて安全で効率的な処理と処分が行われる。ここでは、核燃料サイクルのバックエンドと呼ばれる放射性廃棄物の処理・処分の基礎について概説する。

Keywords: 核燃料サイクル, 放射性廃棄物, バックエンド, 地層処分, 性能評価

Radioactive wastes are generated from each process of nuclear fuel cycle, and the wastes are categorized into several groups based on the radioactivity and physical/chemical properties. Each categorized waste is or will be managed in each suitable method for safe storage and final disposal. The present paper summarizes fundamental aspects of radioactive waste management.

Keywords: nuclear fuel cycle, radioactive waste, waste management, geological disposal, performance assessment

1 はじめに

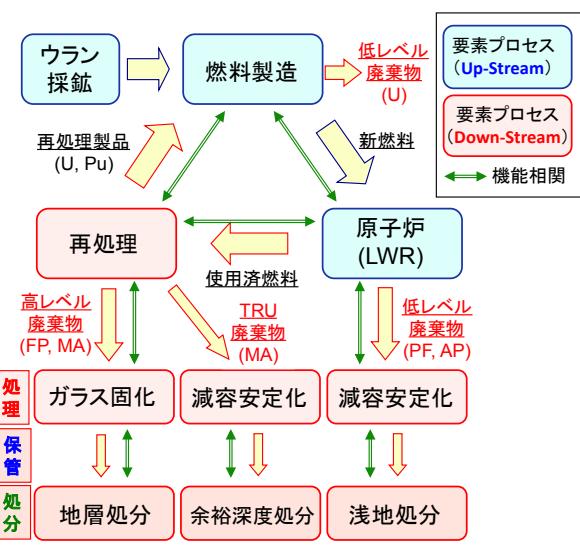
日本は現在、世界第三位の経済大国であるが、エネルギー資源に乏しくその自給率は約 5%にすぎない。現在の日本の経済力を支える主要な産業は製造業であるが、その競争力を今後とも維持発展させて行くためには、安価で質の高いエネルギーの安定的な確保と供給が不可欠である。また同時に、環境負荷が小さいエネルギーへと順次転換していく事も必要である。しかしながら、東日本大震災以降の日本の一次エネルギーに占める化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の割合は 90%を超える、エネルギーの安定確保と環境負荷低減という目標から実質的に遠ざかる方向に進んでいるように思われる。このような現状を客観的に認識すれば、燃料の調達及び貯蔵が容易で温暖化ガスの排出量が少ない原子力の利用（原子力発電）は現在の日本にとって重要な一次エネルギーの一つであると判断される。しかしながら、原子力の利用を進めるにあたっては、充分な安全性の確保とともに放射性廃棄物の安全で合理的な処理・処分の実施が大前提となる。放射性廃棄物の処理・処分は「バックエンド」と呼ばれるが、本稿ではこのバックエンドの基礎について概説する。

2 核燃料サイクルの基礎

原子力発電を行うための一連のプロセス全体を核燃料サイクルと呼ぶ。具体的には、燃料となるウランの採鉱から始まり、ウランの精錬、転換、濃縮（ ^{235}U を 3-5%に濃縮）、燃料製造（ウラン酸化物ペレット）、原子炉での燃焼（ ^{235}U の核分裂）と発電を経て、使用済燃料の再処理（再利用可能なウラン・プルトニウムの抽出）、抽出したウラン・プルトニウムによる燃料製造、さらには各種廃棄物の処理と最終処分に至る多くのプロセスからなるサイクルである。現在のサイクルである軽水炉（LWR）サイクルの概要を図 1 に示す。その特徴は、多種のプロセスを高度に統合した総合システムであることと、システムを構成する各プロセス

間に双方の密接な機能相関があることである。この相関の一例として、燃料の高燃焼度化（燃料一体当たりのエネルギー発生量を増やす事）をはかる場合を考えると、前段の燃料製造において ^{235}U の濃縮度を高める事や燃料および被覆管材料の耐久性の向上などが必要になるとともに、使用済燃料の特性（放射能、発熱量、等）が変化するため、後段の再処理や廃棄物の処理・処分の条件も変更する必要が生じる。従って、一つのプロセスの性能向上をはかるには、他のプロセスに及ぼす様々な影響を定量的に評価し、サイクル全体としての性能がどれほど向上するかを必要なコストや時間を含めて総合的に評価する事が必要となる。

核燃料サイクルの各プロセスからは様々な種類の放射性廃棄物が発生する。それらの廃棄物は放射能レベルや物理化学的特性等によっていくつかの種類に分類され、それぞれの特性に応じて安全で効率的な保管および処分に適した形態に処理される（安定固化処理）。安定な形態に処理された廃棄物は「廃棄体」と呼ばれ、放射能や発熱量がある程度減衰するまで適切に保管された後、最終的に処分されることになる。最近の一部マスコミ報道を見ると、放射性廃棄物の処理・処分はその道筋が全く立っていないかの様な誤った印象を受けるが、現時点ではその道筋が全く立っていないかの様な誤った印象を受けるが、現時点では処理・処分技術の大枠はすでに確立されており、技術的な観点からはその詳細を詰めて信頼性や合理性を向上させる段階にある。



FP: Fission products, MA: Minor actinides, AP: Activation products, U: Uranium

図 1 軽水炉（LWR）サイクルの概要

Fundamental aspects of nuclear fuel cycle and waste management by Yaohiro INAGAKI (inagakiyh@nucl.kyushu-u.ac.jp)

*1 九州大学大学院 工学研究院 エネルギー量子工学部門

Kyushu University, Dept. of Applied Quantum Physics & Nuclear Engineering
〒819-0395 福岡市西区元岡 744

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2016 年度バックエンド週末基礎講座における講演内容に加筆したものである。

3 バックエンドの基礎

3.1 放射性廃棄物の分類

前述の様に、核燃料サイクルの各プロセスからは様々な種類の放射性廃棄物が発生するが、それらは廃棄物の放射能レベル（重量または体積当りの放射能）、放射性核種の種類（ α ／ β ／ γ 核種および半減期の長さ）、物理化学的特性（固／液／気の状態、可燃／不燃、等）等によっていくつかの種類に分類される。放射性廃棄物の分類の一例を表1に示す[1]。現在の分類では、放射性廃棄物は「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に大別され、このうち「低レベル放射性廃棄物」はさらに「発電所廃棄物」「ウラン廃棄物」「超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU廃棄物）」に分類される。また、核燃料サイクル以外の病院や研究所等の施設から発生する放射性廃棄物は「RI研究所等廃棄物」と呼ばれ、「低レベル放射性廃棄物」に分類される。

「高レベル放射性廃棄物」は使用済燃料の再処理工程において発生する高レベル廃液であり、放射性核種である核分裂生成物（FP: Fission Products）とアクチノイド（マイナーアクチノイドと呼ばれる Np, Am, Cm および再処理で回収できなかった U, Pu）を高濃度に含むためその放射能レベルは極めて高い（発生直後で約 10^7 GBq/m³）。なお、使用済燃料を再処理せずそのまま処分する場合（フィンランド、スウェーデン等で実施予定の直接処分）は、使用済燃料自身が高レベル放射性廃棄物となる。

「低レベル放射性廃棄物」に分類される「発電所廃棄物」は、原子力発電所の運転および解体において発生する廃フィルター、廃イオン交換樹脂、廃液、金属配管、コンクリート、炉内構造物、等の廃棄物である。その放射能の大半は比較的半減期の短い放射化生成物に起因し、放射能レベルは高レベル放射性廃棄物に比べて7桁以上低いが、その物量（重量または体積）は数桁大きい。「ウラン廃棄物」はウラン燃料製造工程における転換・濃縮・燃料成形加工、等の工程で発生するフィルター、焼却灰、スラッジ、廃器材、等の廃棄物であり、主にウランとその崩壊系列核種を含む

廃棄物である。「TRU 廃棄物」は、使用済燃料の再処理工程において発生する低レベル廃液、溶媒、吸着剤、ハル・エンドピース（燃料被覆管および燃料集合体端末の廃材）、および MOX 燃料の加工工程において発生する廃棄物であり、超ウラン核種（TRU: TRans-Uranium: U より原子番号の大きい Np, Am, Cm 等）とともに放射性ヨウ素（¹²⁹I）や放射性炭素（¹⁴C）等の長半減期の放射性核種を含む廃棄物である。

3.2 高レベル放射性廃棄物

前述の様に、高レベル放射性廃棄物は使用済燃料の再処理工程において発生する高レベル廃液であり、ウラン・プルトニウムの溶媒抽出工程で発生する硝酸廃液（高濃度の FP およびアクチノイドを含む）に加え、溶媒再生工程で発生する洗浄廃液、使用済燃料溶解工程で発生する不溶解残渣廃液、等も含まれる。核燃料サイクルから発生する放射性廃棄物の放射能の大半は使用済燃料中に含まれる FP およびアクチノイドに起因するものであるが、使用済燃料中に存在する非揮発性 FP とマイナーアクチノイドの 99%以上は最終的に高レベル廃液中に移行することから、放射能の総量の観点からは高レベル放射性廃棄物が最も重要な対象となる廃棄物である。

液体としての廃棄物は飛散・分散し易く、また、収納容器を腐食させることから、その安全な取扱い、保管、輸送、処分のためには早期に化学的に安定な媒体中に固化（安定固化処理）する必要がある。放射性廃棄物の安定固化処理では、固化体が放射性核種を必要な期間にわたって安定に閉じ込める性能に加え、廃棄物の減容性、処理プロセスの信頼性、安全性、経済性、等の性能も重要なとなる。ここで、高レベル廃液の放射能の大半は ¹³⁷Cs（半減期 30.2 年）や ⁹⁰Sr（半減期 28.1 年）等の半減期が比較的短い FP によるものであるが、半減期が非常に長いアクチノイド等（例えば、²³⁷Np は半減期 2.14×10^6 年）も含まれるため、その放射能が充分に減衰するまで数万年以上にわたり生物圏から安全に隔離する必要がある（図2）。従って、高レベル廃液の安定固化処理については、固化体の長期隔離方法と合わせて

表1 放射性廃棄物の分類の例[1]

| 廃棄物の種類 | | 廃棄物の例 | 発生場所 | 処分の方法(例) |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--|
| 低レベル放射性廃棄物 | 放射能レベルの 極めて低い廃棄物 | コンクリート、金属等 | 原子力発電所 | トレチ処分 |
| | 放射能レベルの 比較的低い廃棄物 | 廃液、フィルタ、廃器材、 消耗品等を固化化 | | ピット処分 |
| | 放射能レベルの 比較的高い廃棄物 | 制御棒、炉内構造物 | | 余裕深度処分 |
| ウラン廃棄物 | | 消耗品、スラッジ、廃器材 | ウラン濃縮・ 燃料加工施設 | 余裕深度処分、ピット処分、 トレチ処分、 場合によっては地層処分 |
| 超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物) | | 燃料棒の部品、廃液、 フィルタ | 再処理施設、 MOX燃料加工施設 | 地層処分、余裕深度処分、 ピット処分 |
| 高レベル放射性廃棄物 | | ガラス固化体 | 再処理施設 | 地層処分 |
| クリアランスレベル以下の廃棄物 | | 原子力発電所解体廃棄物の 大部分 | 上に示した 全ての発生場所 | 再利用/一般の物品としての 処分 |

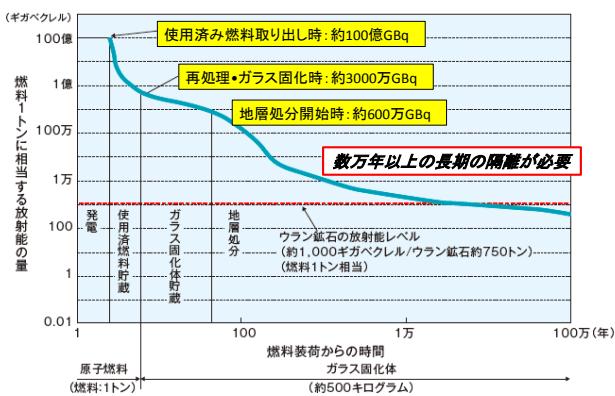


図2 高レベル廃棄物の放射能の減衰の例 ([1]に加筆)

世界中で様々な検討が行われてきた。それらの様々な検討を経て、現在、多くの国で選択されている最も確実で合理性および信頼性が高い長期隔離方法は、高レベル廃液をウケイ酸ガラスを用いてガラス固化し、地表施設で30-50年間冷却保管した後、地下数百メートル以深の安定な地層中に処分する方法（地層処分）である。

3.3 地層処分の概念

高レベル放射性廃棄物の処分方法については世界中で様々な検討が行われてきたが、その論点は「人間による恒久的な管理の継続は困難であり、将来世代に管理の負担を負わせる事がないよう、最終的には人間による管理がなくなても安全に処分できる事」にある。その方法として、地層処分、宇宙処分、海洋底処分、氷床処分、さらには長期管理を含めた様々な提案がなされ、安全性、実現性、信頼性、世代間の公平性の観点から総合的な評価が行われた結果、最終的に最も優れた方法として選択された方法が「地層処分」である。

地層処分は、物質を長期にわたって閉じ込める能力を持つ安定した深い地層、すなわち「天然バリア」と、それを補う人間の技術である「人工バリア」を組み合わせたシステムから成り、これを「多重バリアシステム」と呼ぶ（図3）。わが国の場合、人工バリアはガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材で構成される[2,3]。オーバーパックはガラス固化体が高い放射能を持つ一定期間（1,000年間程度）地下水との接触を確実に阻止するよう約20cmの厚さ

を持つ金属製の容器が用いられる。一定期間経過するとオーバーパックの腐食劣化により地下水がガラス固化体と接触するが、ガラス固化体中の放射性物質はガラスの網目構造中に原子レベルで取り込まれている（固溶）ため容易に地下水に溶出しない。ガラス固化体が全て溶解するまでの期間は約7万年と評価されている。また、ガラス固化体から少しずつ溶出する放射性物質は緩衝材中を移動していく。緩衝材はベントナイトと呼ばれる粘土を主成分とする材料であるが、ベントナイトは水に触れると膨らむ性質があり、水を通しにくいため、周りの地下水が人工バリア内部に侵入するのを防ぎ、また、放射性物質が人工バリアから外部に出ていくことを遅らせる働きをする。さらに、ベントナイトは放射性物質を吸着する性質があるため、地下水に溶出した放射性物質の移動を遅らせる機能も有している。このように放射性核種が人工バリア内に長く留まっている間に、その放射能は半減期に応じて減衰していくことになる。一方、天然バリアである岩盤は一般に深いほど緻密で地下深部の地層の透水性は低く、また、地下深部では地表の高低による水圧差などの影響も小さくなるため、地下水の流れが遅くなることが知られている。さらに、地下では活性な酸素がほとんど存在せず（酸素はSiO₂等の安定な形態で存在）地下水は還元性であるため、金属の腐食や物質の溶解等の化学反応が極めて遅い環境である。太古の化石や考古学的遺跡などが発掘されることとは、地下深部の地層が還元環境にあり「モノ」を閉じ込める高い機能を有していることの証拠でもある。これらのことから、天然バリアと人工バリアから成る多重バリアにより、人間が管理し続けることなく、長期にわたって人間の生活環境に影響を及ぼさないよう放射性物質を隔離することが可能である。

3.4 地層処分の性能評価

地層処分を実施するにあたっては、その長期の安全性すなわち長期性能を充分に評価する事が必要である。ここで、数万年以上という長期の性能を直接的に評価する事は不可能なため、その性能は「シナリオ解析」という手法を用いて評価される。これは地層処分が人間環境に影響を及ぼす可能性のあるシナリオを抽出し、抽出したそれぞれのシナリオに沿って性能を評価、確認する手法である。現在のところ、人間環境に影響を及ぼす可能性のあるシナリオは「地下水シナリオ」と「接近シナリオ」に分類されている（図4）[2]。「地下水シナリオ」は地下水により放射性物質が処分場から人間環境に運ばれる可能性に関するシナリオであり、一方、「接近シナリオ」は何らかの原因で廃棄物と人間

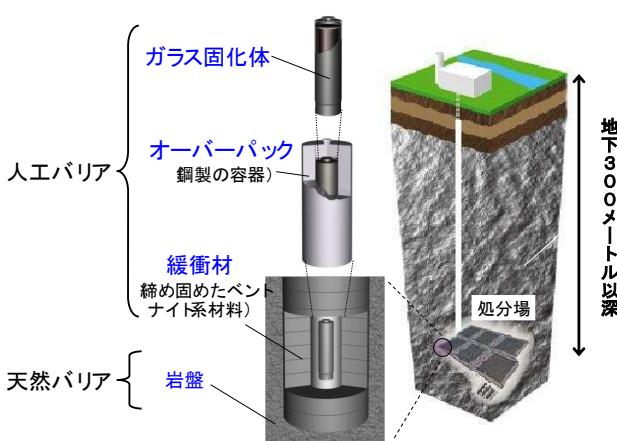


図3 地層処分における多重バリアシステムの例 [2,3]

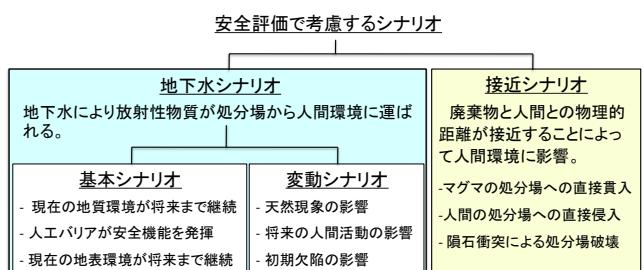


図4 地層処分の安全評価で考慮するシナリオ [2]

との物理的距離が接近する事によって人間環境に影響が及ぶ可能性に関するシナリオである。接近シナリオについては、処分場へのマグマの貫入や人間の侵入等が対象となり、これらのリスクを避けて処分サイトの選定を行う事が基本的な対策となる。一方、地下水シナリオについては、適切な処分サイトの選定とサイトに応じた適切な工学的対策が施されれば、処分システムの機能に有意な影響を及ぼすような天然現象、将来の人間活動、工学的対策にかかる欠陥が発生する可能性は極めて低い。従って、地下水シナリオではまず始めに人工バリアと天然バリアの両者の安全機能が想定通り働くことを前提として、地下水による放射性物質の移動の可能性を評価する。これを「基本シナリオ」と呼び、以下の前提の基に評価が進められる（図5）。

- ・ 現在の地質環境条件が将来まで継続する
- ・ 人工バリアは期待される安全性能を発揮する
- ・ 現在の地表環境条件が将来まで継続する

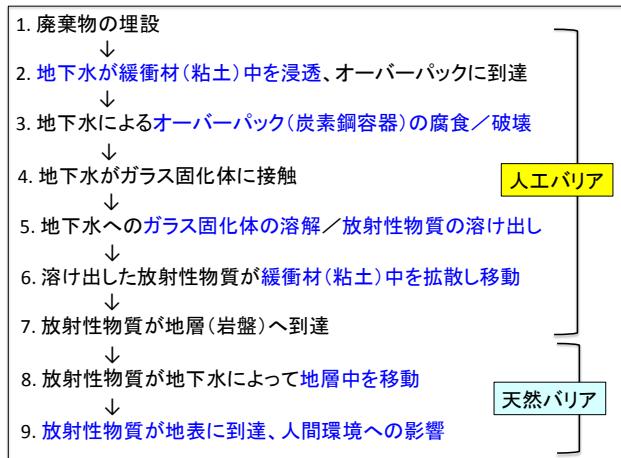


図5 地下水シナリオ（基本シナリオ）の一例

一方、天然現象や将来の人間活動および工学的対策にかかる欠陥については処分システムの性能に大きな影響を及ぼす可能性は低いものの、それらの影響も定量的に評価されなければならない。シナリオ解析では、それらの影響はシナリオの不確実性として取り扱われ、その発生頻度等を考慮して評価が行われる。これをシナリオを「基本シナリオ」に対して「変動シナリオ」と呼ぶ。

以上の様な基本的考え方のもとにそれぞれのシナリオについてその詳細が設定され、また、シナリオ解析に必要な各種の技術データの収集やモデルの開発を加えて、性能評価が進められる。地層処分の性能評価（安全評価）結果の一例を図6に示す[2]。図6の縦軸は被ばく線量を表し、日本の場合、その値は最大で $0.01 \mu\text{Sv}/\text{年}$ 程度である。この値は ICRP (国際放射線防護委員会) が定める一般公衆の線量限度 ($1000 \mu\text{Sv}/\text{年}$) および自然放射能による被ばく線量 ($900-1200 \mu\text{Sv}/\text{年}$) に比べて 5 衝ほど小さく、充分に小さい値と判断される。なお、評価で最も重要な点は、被ばく線量の値の大小ではなく、評価手法の正当性や信頼性を示すことにある。従って、より信頼性の高い評価とするための更なる研究開発が期待される。

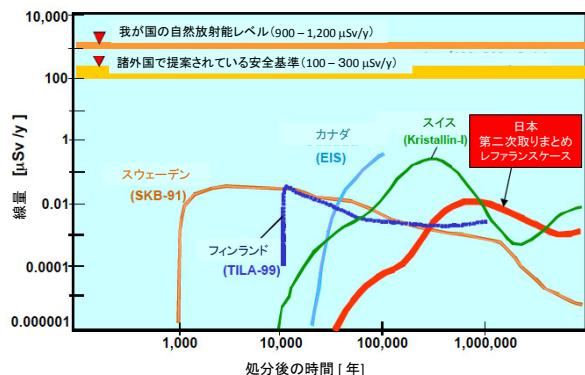


図6 地層処分の安全評価結果の一例 [2]

4 おわりに

本稿では、原子力発電を行うための一連のプロセスである「核燃料サイクル」と、その「バックエンド」と呼ばれる放射性廃棄物の処理・処分の概要を理解するための基礎について、高レベル廃棄物の地層処分を中心に概説した。なお、バックエンドには、低レベル廃棄物の処理・処分や原子力施設の廃止措置も含まれ、これらも核燃料サイクルを完結するための重要な項目である。また、バックエンド事業を進めるには、技術的な側面に加えて国民の理解や合意形成という社会的な課題も解決しなければならない。これらの現状と課題については、本稿に続く稿で解説するので、そちらについても是非ご一読いただきたい。これらの稿が多くの方にとってバックエンドの全体像の理解の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 原子力・エネルギー図面集 2015, 電気事業連合会 (2015). <http://www.fepc.or.jp/library/pamphlet/zumenshu/>
- [2] 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 総論レポート, JNC TN1400 99-020 (1999).
- [3] 山本陽一, 地層処分の考え方と進め方, 原子力バックエンド研究, Vol.23, No.1, pp.87-92(2016).